

第八届全国高等学校  
物理实验教学研讨会  
论文集  
(上册)

中国 哈尔滨 哈尔滨工程大学

2014年7月



# 第八届全国高等学校物理实验教学研讨会 论文集（上册）目录

## 第一部分：物理实验教学研究

《普通物理实验》双语教学的体会.....	康秀英(1)
改革物理实验,培养创新人才.....	隗群梅(3)
物理实验教学中心建设与拔尖人才培养的探索 .....	张 杨,朱 正,陈淑妍,李庆波,王 朔,孙晶华(6)
略论高校物理实验教学 .....	范士民(10)
探究性基础物理实验教学平台建设的探索与实践 .....	鲍德松(12)
构建大学生创新实验辅导平台的构想 .....	郭山河,张金宝,王 丹(15)
改进实验模式 培养学生创新能力 .....	周玉芳,胡连军(17)
基于 WIFI 的物理实验教学实时评价体系创新建设.....	陈水桥,乐静飞,殷利明,王 玮(21)
大学物理实验仪器的配置和利用 .....	叶树中(27)
关于开设内光电效应实验的探索与思考 .....	陈 彪(29)
基于网络环境的实验室教学管理体系建设 .....	王素红(33)
一种新型综合设计性实验系统的研制和应用.....	韩 力,卢 杰,曲延吉,刘铁成(35)
建构缄默知识,提升创新能力.....	何焰蓝,陈旭灿,彭 刚,于晓燕,刘一星,马奇奇(39)
依托国家级实验教学示范中心平台 提高创新能力的培养.....	戴心锐,韩 忠(44)
让学生看到音乐的数理之美.....	李俊庆,刘建龙,方光宇,林 珊,赵海发(46)
大学文科物理实验探索与实践.....	林 珊,李俊庆,赵海发(52)
在 大学物理实验课程中开设“DIY 研究型课题实验”的探索和实践 .....	赵海发,刘世刚,刘建龙,张立彬,耿完楨(58)
构建“创新班”大学物理实验课程体系的探索与实践 .....	王爱军,吴 冲,唐军杰,吕志清,冯金波,赵嵩清(62)
加强制度建设、保障实验教学质量 .....	冯金波,王爱军,张国林,唐军杰,刘淑霞,刘卫红,杨振清,赵 卉(67)
量子信息前沿实验课程设计.....	陈 凯,刘乃乐(71)
军校大学物理实验教学改革探索.....	林上金,胡 澄(75)
浅议军校物理实验教材建设.....	胡 澄,林上金,白 忠(80)
大物实验、大创项目、物理竞赛三位一体的实验教学改革实践.....	韩立立(84)
最近发展区及相关理论在大学物理实验教学中的应用.....	韩 璐,孙敬姝,杨名超(87)

大学物理课程与学生制作实践融合的培养模式探索.....	黄彦,朱泉水,龚勇清,陈凤英(90)
物理实验网上选课系统常见的问题及解决方法.....	徐如凤,李向亭(95)
清华大学与基辅大学实验教学对比.....	董占民,梁昌林,陈墨轩,陈宜保(97)
基于学生应用能力构建地方院校大学物理实验项目的模式研究.....	盖双旗(100)
近代物理综合性实验开发及其提高学生综合能力.....	云月厚,那日,张常在(105)
对大学物理实验课评估方法的调查报告.....	刘丹(108)
关于大学物理实验层次化教学的探讨.....	胡清,魏云,吴晓立(111)
“产学研”一体化实践教学模式探索 .....	于白茹,梁小冲,李伟,李紫源,朱俊,郝彦军(115)
任务导向,问题牵引,以探究式教学方式,培养学生的创新思维 .....	王秀庭,杨冰(117)
浅谈大学物理实验教学的“内涵驱动”建设.....	魏云,吴晓立,胡清(121)
物理实验教学内容体系的设计与构建 .....	梁小冲,朱俊,穆万军,于白茹,李伟,李紫源,郝彦军(124)
以学生为主导的物理实验创新实践基地介绍 .....	郑志远,李传涛,董爱国,董敬敬,高华,樊振军,张自力(128)
设计性研究性实验题目设置和分类指导之研究.....	张映辉(131)
人文社科背景下物理实验的课程架构和教学探究.....	何春娟,汪六九,夏天龙,王善才(134)
物理实验项目管理初探.....	沈学浩,周红,杨文明(138)
大学物理实验教学管理模式的探讨 .....	周红,赵西梅,窦葳,王锦辉,杨文明,沈学浩,叶庆好(142)
产学研结合物理实验教学模式的探索.....	董敬敬(145)
用创新的方法推动大学生创新实验发展.....	李传涛,郑志远,董爱国,张自力(148)
浅议大学生科研精神与创新能力的培养 .....	樊振军,郑志远,冯娟,董敬敬,高华,张自力(151)
拔尖人才培养中综合物理实验教学改革实践与探索 .....	张俊武,程向明,王红理,高博(154)
大学物理实验教学质量评估体系的研究与实践.....	王铁云(157)
师范生探究性基础物理实验项目建设的思考与实践 .....	柴志方,崔璐,戚小华,宦强,赵强(165)
观国际知名赛事对中学生实验能力培养的作用.....	刘丽珮,张春玲,宋峰,李川勇(169)
信息化时代PI教学法创新教育研究.....	姜东光,申人升,李建东,周玲(172)
近代物理实验课开展研究性实验的探索与实践 .....	钱建强,张高龙,郝维昌,崔益民,蔡微,李华(176)

医学类专业物理实验课程分层次教学效果的调研与探讨	冀敏, 苏卫锋, 姚红英, 岑 剌, 张新夷, 马世红, 孙利军 (179)
物理实验教学内容、方法和手段的深化改革	秦颖, 周 玲, 姜东光, 李建东 (183)
构建物理实验创新实践平台的探索	李 晔, 王翠香, 李 磊, 苗 征 (187)
物理实验室管理的经验和体会	吴庚柱 (193)
电工技术实验和学生能力的培养	郭超修, 杨彦婷 (194)
大学物理设计性实验的作用不可小觑	曾乐贵 (197)
物理实验教学培养学生创新能力的探究	张锐波 (200)
运用专题教学法组织大学物理实验课堂教学	倪 晨, 方 恺, 汤 纯, 何雨华, 陆 萍 (204)
特色物理实验类选修课程对培养 卓越工程技术人才的初步实践	杨振清, 吴 冲, 张国林, 林春丹, 张万松 (207)
基于数据挖掘技术在高校教学实践中的应用	姜 芸 (210)

## 第二部分: 近代物理与综合实验

探究微波在波导中传输时膜片对驻波比的影响	郭 劼, 罗 举, 张志华, 杜 艾, 王晓栋, 方 恺, 赫 丽 (215)
蒙特卡罗模拟塑料晶体探测宇宙线 $\mu$ 子的测量	杨通智, 陈 星 (221)
光子计数器在液芯光纤谱仪中的应用	陆国会, 卢 杰 (231)
$^{60}\text{Co}$ $\gamma$ 射线铅的吸收系数测量实验的数据拟合法	张国强, 边 纪, 方 恺, 张志华, 杜 艾, 赫 丽 (235)
量子纠缠实验中 SPDC 光谱分布的计算分析与实验研究	孙文博, 王合英, 陈宜保, 陈 宏 (240)
用二极管激光测量气体分子的高分辨吸收光谱	娄秀涛, 武东城 (247)
一种基于非线性晶体参量下转换的纠缠光子实验	夏慧枝, 陈 凯 (252)
一种基于 BB84 协议的量子保密通信实验方法	许穆岚, 刘乃乐 (258)
一种基于关联光子对的双缝量子成像实验	杨 青, 陈 凯 (261)
基于纠缠光源的单光子干涉和 HOM 型双光子干涉实验	刘 敏, 蔡昕东 (264)
大气压等离子体实验演示仪	董 馨, 孙智兴, 于江涛 (269)
利用时域有限差分法模拟金纳米球及球壳光学特性	钱 钧, 刘丽军, 张春玲 (274)
热光二阶关联影响因素实验研究	田 甲, 林海龙, 高 禄 (279)
基于聚合物全息光盘的大容量体全息存储演示仪	刘鸿鹏, 王维波 (285)

利用霍尔效应研究热退火对黑硅材料电学性质的影响.....	王科范, 刘平安(290)
数字化密立根油滴实验仪.....	何雨华, 方 恺, 倪 晨, 郭先红, 陆 萍(295)
复合真空计操作规程应用研究.....	刘嘉滨, 沈学浩, 周 红, 杨文明(300)
流水式核磁共振实验中低流速下共振信号反常增强原因探究及纵向弛豫时间准确测量 .....	杜晓波, 许 强, 孙 昕, 龙北玉, 付成伟, 周 亮, 梁桁楠, 韩 炜(303)
适应近代物理实验课堂要求的高压实验装置的改进 .....	梁桁楠, 周海宁, 李 岩, 刘 帅, 郭茂森(306)
水热法制备 ZnO 纳米棒.....	甄春阳, 杨 坤, 付康宁, 董敬敬(309)
氢等离子体处理对 ZnO 光电性质的影响.....	董敬敬, 杨 坤, 付康宁(315)
夫兰克-赫兹实验的改进.....	冯 娟, 张 贺, 赵 飞(319)
巨磁电阻效应实验的研究与应用.....	郭 琳, 衣 岩, 杨显浩, 蒲泓羽, 李传涛(322)
基于 T 型表面等离子体波导的双向分光器.....	陈 靖, 陈宗强, 钱 钧, 孙 骞(326)
针对不同类型样品的原子力显微镜实验教学研究 .....	王中平, 谢 宁, 张宪峰, 张增明, 孙腊珍(331)
利用有限元法模拟 MIM 波导的光传输特性.....	陈宗强, 刘丽军, 陈 靖, 孙 骞(340)
钠原子光谱漫线系的研究.....	李 斯, 毕 超, 戴继福, 冯 洁, 杨卫平(346)
软 X 射线光学表面散射检测 .....	陈淑妍, 程 丽, 张 杨, 苏丽萍, 李 昆(352)
微波布拉格衍射中立方晶体晶面衍射测量与模型选取讨论 .....	徐春阳, 陈文婷, 王晓栋, 张志华, 方 恺, 赫 丽(359)
X-ray Computed Tomography(X-CT)分辨率的研究.....	周 震, 苏卫锋, 冀 敏(365)
垂直磁场对光抽运信号的影响.....	陈 森, 王点庄, 曹庆睿, 张师平, 吴 平(370)
核磁共振及其成像实验.....	姚红英(375)
扩展发光微生物检测急性毒物应用范围的算法研究 .....	魏胜非, 李忠民, 陈彩云, 夏 彬(382)
用 X 射线衍射仪测量普朗克常量.....	王合英, 孙文博(387)
利用光栅单色仪测量红宝石晶体的吸收和发射光谱的教学实验研究 .....	朱 玲, 郑 虹, 王中平, 张 权, 张增明, 孙腊珍(392)
巨磁电阻效应实验仪.....	吴春姬, 纪 红, 徐智博, 张剑楠, 王文全(398)

# 第一部分

物理实验教学研究





## 《普通物理实验》双语教学的体会

康秀英

(北京师范大学 物理系, 北京 100875)

**摘要:** 双语教学是我国高等院校走向国际化的必然趋势。《普通物理实验》通过中英文双语教学,充分利用实验课堂教学的灵活性和开放性,以及广泛的专业英语词汇积累,对学生的专业英语的提高有极大的帮助。根据几年的双语教学体验,本文总结了在教材和教学方面的一些经验和体会,为实验型双语教学改革提供参考。

**关键词:** 双语教学; 普通物理实验; 专业英语

实施双语教学是促进我国高等教育与国际接轨、培养高层次创新人才的有效途径,也是实现我国教育现代化的重要手段。因此双语教学是我国高等院校走向国际化的必然趋势,近几年来各校都在积极地进行尝试和推广。物理学在人的科学素质培养中具有重要的地位,物理实验课程曾经为培养 20 世纪的优秀人才作出了卓越的贡献。以计算机信息科学技术、生命科学、空间科学、材料科学等为代表的新的科学技术革命,极大地加速了科学技术的发展和各学科之间的相互交叉和渗透,新的综合化趋势已成为科学发展的主流。因此,高等教育人才培养的思路必然要适应这些变化,课程体系,教学内容和教学方法、手段必须由封闭型向开放型转变<sup>[1]</sup>。物理实验作为大学生在进校后的第一门科学实验课程,不仅应让学生受到严格的、系统的实验技能训练,掌握科学实验的基本知识、方法和技巧,更主要的是要培养学生严谨的科学思维能力和创新精神,培养学生理论联系实际、分析和解决实际问题的能力,特别是与科学技术的发展相适应的综合能力,因而实验教学应该面对时代的发展,科技进步的新趋势和新挑战,不断有所创新。只有这样,才能适应社会对人才知识和科学素质越来越高的要求。《普通物理实验》作为物理专业及其它理科专业的必修课,也必然引进双语教学,培养适应当今世界发展的国际化人才。

《普通物理实验》通过中英文双语教学,充分利用实验课堂教学的灵活性和开放性,使学生能够掌握本学科基本概念、基本规律和实验技术的书面及口头的英语表达,并初步具备用英语思维和进行交流的能力,为使他们最终成为专业过硬、语言交流能力强的国际复合型人才打好基础<sup>[2, 3]</sup>。同时,通过本课程的建设,造就一支理论教学与实验教学相结合、教学与科研相结合的双语教学师资队伍。

另外,《普通物理实验》包括物理基础的各个方面,如力学、热学、电学、光学和原子物理等,因此相对于其它单科教学,需要广泛的专业英语词汇积累,教学难度比较大,更需要教师花费大量的时间和精力备课,但在当今教师评价体系更注重科研成果的形势下,势必影响这门课程的双语化进程。

但也正因为其集合了所有的普通物理知识,对学生的专业英语的提高有极大的帮助,同时操作过程也是英文交流的大好机会。通过三年的双语教学体验,有一些经验和体会来一起分享。

首先关于实验讲义的编写。目前大部分教师都具备了科技英语的写作能力,在国际期刊发表许多文章,但毕竟英语不是母语,虽然能精确地表达清楚其中的物理思想,但语感还是欠佳。大学物理双语教材使用原版英文教材或影印版英文教材,教材涉及的知识范围包括力、热、声、电、磁、光、近代物理、物质结构、现代物理发展等具有广阔物理知识和物理背景的教材。这样从知识入门的角度确保学生体味到原汁原味的英语物理知识表达,也让学生掌握到物理发展的历程因此尽量借鉴国外的原版教材。近几年来有许多新出版大学物理

实验的教材,如《Experiments and demonstrations in physics》,《Experiments in modern physics》等,由于仪器的差别,因此在此基础上还需大量修改,尽量做到最好.同时也可作为学生的英语参考教材,保持母语教材的风格。

另一方面,学生每完成一个实验都需要写实验报告,这是一个练习写作的大好机会,刚开始可能花费比较长的时间完成一个报告,但一两个学期坚持下来,学生的写作水平得到很大的飞跃,逐步掌握了英文实验报告写作的方法与技巧,消除了对英文写作的恐惧,增强了写作信心,英语表达能力明显感到更流畅,更得心应手,同时也增强了他们将来有志于向国际发展的信心.另一方面,实验报告中要写实验原理、误差分析和实验结论,促使学生更多、更仔细地阅读英文教材相关内容,在斟酌英文表达的同时,对实验的内容也将更深入地理解,相辅相成,事半功倍,这正好反过来促进了双语理论课教学。

当然实验室也是一个极自然的“英语角”,为学生提供了英语对话的极好机会.由于实验中学生会遇到各种各样的问题,除了寻找老师的帮助外,更可能的是同学之间进行讨论,这样他们自然而然地进行了口语练习.当然学习语言首先要敢于和勇于张口,尝试几次就会变得十分自然,因此教师应该在如何鼓励学生张开口方面想办法,这样学生通过英语来掌握专业知识,熟悉英语思维、求和、交流的习惯,熟练地用英语来解决实际问题.以便在精通母语和母语文化的同时更好地了解世界各国的文化,使他们具有进行跨文化交流的能力,一旦将来有机会参加国际性的学术讨论会议,就会更好地显示自己的才华,得到著名学者的青睐,从而可能有更好的发展空间。

总之,《普通物理实验》教学的双语化将对学生们的专业英语能力提高提供极大的帮助,同时也是势在必行的教学国际化要求,因此对教师的教学能力有极大挑战,为此,教师可能需要找机会去国外深造,以便更好地完成双语教学任务,从而为国家培养更多的国际化人才,壮大我国的科技经济实力,实现中国梦。

#### 参考文献:

- [1] 杨黠, 胡燕飞. 大学物理实施“双语教学”的思考[J]. 四川理工学院学报(社会科学版), 2007,22:104-107.
- [2] 赵秋塘. 大学物理实验双语教学初探[J]. 实验科学与技术, 2008,6(2):89-91.
- [3] 徐峰, 黄楠楠. 用英文撰写实验报告的探索[J]. 理工高教研究, 2004, 23(5):124-127.

## Bilingual teaching experience on General Physics Experiment

KANH Xiu-ying

(Physics Department, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Bilingual education is inevitable trend towards internationalization for Chinese universities. "General Physics Experiment" by bilingual teaching, due to the advantages of the flexibility and openness, as well as a wide range of professional English vocabulary, can improve students' professional English with a great help. According to our bilingual teaching experience during last years, this article summarizes some experience and understanding, especially in bilingual textbooks and teaching, and may provide a reference for the teaching reforms of the experimental bilingual education.

**Key words:** bilingual education; general physics experiment; professional English

# 改革物理实验，培养创新人才

——以中国石油大学(华东)为例

隗群梅

(中国石油大学(华东)理学院, 266555)

**摘要:**本文介绍了我校以提高物理实验教学质量和教学效率为目的的一系列实验教学改革,通过梳理实验方法、总结实验技巧来实现创新人才的培养。

**关键词:** 创新教育; 实验模式; 教学方法; 教学体系

## 1 引言

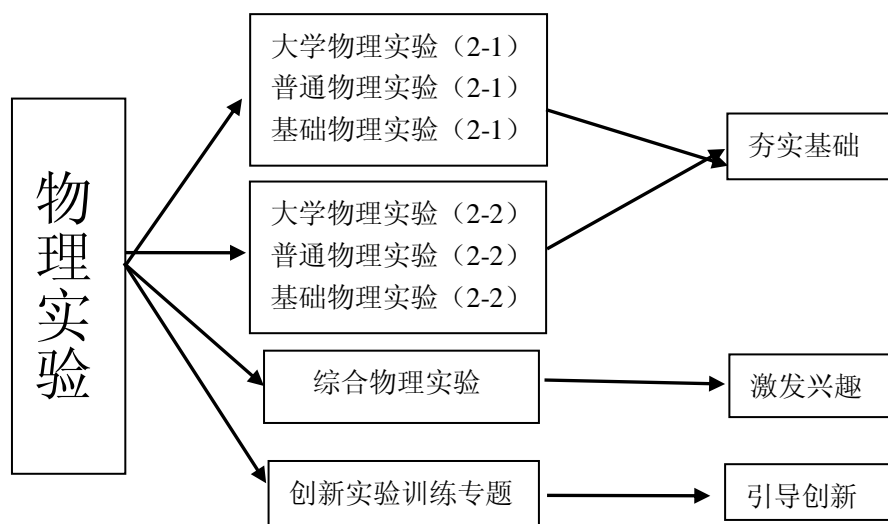
关于创新理论和方法在美国教育学家Smith和Jorgen所进行的创新教学设计研究中有较详细的介绍,其中值得我们学习和借鉴的有<sup>[1]</sup>:教学设计如何根据学生的特点(如:共同点与差异性;变化与稳定性的特点以及先前的学习和训练等)来进行实验教学、评价等。在欧美学校里,仪器更新换代快,且孩子从幼儿园到大学就注重动手和创新能力的教育,教学模式也采用非灌输式的教育方式,在这样的大环境下造就了一批像麦克斯韦、波尔、卢瑟福、布拉格等的物理界科学名人。在国内,别说是创新教育,就连物理实验的教学也才始于上世纪20年代,由北京大学的颜任光老师和南京高等师范学校的胡刚复老师开创,但当时仅仅是一些验证性实验和物理量的测量实验<sup>[2]</sup>。随着科学技术和外来文化的不断冲击,教育事业也随之在高速地发展和飞快地进步,其间的变化主要体现在物理实验教学方法<sup>[3]</sup>和教学体系上<sup>[4]</sup>。教学方法:主要分为教学内容和教学技巧。教学内容在传统教学的基础上增设了近现代物理实验和创新实验。教学技巧<sup>[5]</sup>包括多媒体的引入、启发式、引导式的教学理念,测评方法的不断优化和改进等。教学体系:层次化(有些学校是以实验内容分为基础性实验、综合性实验以及设计和研究性实验;有些学校是将学生分为好、中、差,再进行不同级别的教学)和专业化的教学模式。总之,为了适应社会的高速发展,培养出优秀的现代化人才,大学物理实验教学也与时俱进地进行着革新。

## 2 物理实验中心介绍

以提高教学质量和教学效率为教学核心<sup>[2]</sup>,培养出更加优秀的现代化人才。在激烈竞争的现代化教学中,我校的物理实验也不断地进行着改革。自1998年以来我校物理实验率先实施全面开放式教学,到2006年取得山东省首个示范中心的荣誉称号,2007年《大学物理实验》被评为省级精品课程。在改革期间取得过优异的成绩,但也存在着不足。

## 3 现有实验模式的介绍

为深入贯彻落实《教育部关于全面提高高等教育质量的若干意见》(教高〔2012〕4号)和《教育部等部门关于进一步加强高校实践育人的若干意见》(教思政〔2012〕1号)文件精神,根据《教育部财政部关于“十二五”期间实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”的意见》(教高〔2011〕6号),物理实验中心本着“以学生为主,教师为辅”的实验教学模式,激发学生兴趣,启发他们独立解决问题,培养他们的创造性思维能力。现有的实验结构分布可用如下的方框图表示:



物理实验首先通过两个层次的基础性实验来对学生进行基础测量知识和数据处理能力的训练，此部分以夯实基础、拓展知识面为目的；然后是综合物理实验的训练，以此来激发学生的学习兴趣和；最后就是在做好以上前提工作之下去达到创新创业的训练目的。在不同的学习阶段采取不同的教学方法和手段来提高教学质量，如初学阶段除引进多媒体教学之外，还根据不同实验类型采用不同方法，像在密立根油滴实验和光电效应实验时引入相关诺贝尔奖的物理学史，在电桥实验中引入日常生活中电阻的应用等，从而吸引学生的注意力，激发他们的学习热情；加强与专业相结合的实验项目训练（如：油品的粘滞系数、比热容等），以实现与专业接轨的横向拓展；提高实验课在本科教学中的地位（如：学分的增加）。除此之外，还增设了旨在提高学生实验创新和实验开发能力的“提高实验项目”。如：①“系列”综合性实验——综合性高、技术性强、系列性浓，可以开阔实验研究视野，引导学生在现有实验基础上把物理实验的思维方法拓展和转移到专业学科领域，从而达到培养学生进行科学研究和实验创新的综合能力。②设计研究性实验——实验要求灵活性较大，重视测量方法、测量条件、测量仪器的优化设计。给那些实验能力强、对实验有兴趣的学生提供基本的实验探究设计机会，以此加强实验创新能力的训练和培养。③现代物理测量技术实验——现代物理测试方法、测试技术及应用，这些有效地增强了教学内容的科学性、先进性，让学生感受现代物理科技的魅力，激发创新意识和探究兴趣。④物理创新实验专题训练——实施系统创新综合训练。2—3 人组成一个小组，把分析和创意留给学生，特别提倡以专业接轨、横向拓展的实验开发与创新，以规范的科技论文提交研究成果，并择优进行答辩，为培养学生全面创新能力提供平台。

下面对我校新开设的“系列化”综合性实验和创新性实验进行详细地介绍：（1）“系列化”综合性实验：根据我校办学特色（研究型理工科综合学校）和专业特点（石油与地质勘探），以强化学生实践能力为重点，整合相关实验室资源和师资队伍，建立目标清晰、载体明确、考核科学的实验教学体系，构建功能集约、资源优化、开放充分、运行高效的专业类实验教学平台，为应用型、复合型、创新型人才培养创造有利条件。将教学与科研有机结合，统筹相关教学科研实验室资源，促进教学科研互动，实现科研成果向实验教学内容的有效转化，使学生了解科技最新发展和学术前沿动态，激发科研兴趣，启迪科研思维，掌握科研方法，培养科研道德，提升科学研究和科技创新的能力。（2）创新性实验：它分为教师主导和学生主导的实验。教师主导的探索创新性实验是根据教师科研中的小（子）课题进行文献调研、教学研究、科研探索等。将教师主导设立的探索创新性课题纳入创新性实验课程训练体系，学生以选题的形式参与探索创新性实验。学生主导的探索创新性实验则是学生经过一定的知

识积累,掌握了一定的基础知识,对专业领域有了初步认识后,对于他们在实验学习过程中迸发出的有价值的创新性思路,实验中心提供实践经验丰富的专业人员参与实验支持和指导。

#### 4 近五年取得的成绩

在老师指导下学生发表各类论文总计 22 篇,申请的省级和校级项目有 9 项,获奖的创新项目有 34 项,其中特等奖 3 项,一等奖 6 项,二等奖 12 项,获批专利 15 项。

#### 5 实验室的持续发展

1) 以创新理念统领整个物理实验教学体系和系列课程建设,把创新技法训练落实到各个实验项目,把创新能力培养实施到各门物理实验课程。

2) 优化实验师资队伍建设是保障。建立一支教学科研能力强,勤奋敬业、具有创新精神、结构合理稳定的高水平实验师资队伍,是深入进行实验教学改革、实验室建设和学生创新能力培养的保障。

3) 引进先进实验设备是可持续发展的源泉。让学生及时了解和接触先进设备和技术,拓宽学生视野。

4) 建立创新教学有效激励机制是可持续发展的动力,唯有形成持续的推动力,才能使实验创新教育变成教师的自觉行为。

#### 参考文献:

- [1] 张锐波,沈剑峰,杜金潮.大学物理实验创新教学[J].实验室研究与探索,2010,29(1):80-82,163.
- [2] 朱德生.STS 教育思想在大学物理实验教学中的应用[J].科教文汇(下旬刊),2011(10):120,206.
- [3] 胡成华,史玲娜.大学物理实验教学创新模式的探索与实践[J].物理与工程,2012,22(1):44-46.
- [4] 徐志君,魏高尧,隋成华.改革大学物理实验教学 培养自主实验能力[J].实验室研究与探索,2011,30(6):272-274,327.
- [5] 付静,梁璐光,姜广军.把物理学史引入大学物理教学的研究[J].大学物理实验,2009,22(1):114-116.
- [6] 肖文波,何兴道,邓懿媛,等.大学物理实验教学与创新能力培养的讨论[J].大学物理实验,2010,23(1):83-85.
- [7] 李永涛,毛巍威,刘猛洪,等.搞高大学物理实验教学质量思考[J].大学物理实验,2013,26(1):117-119.

### **Reform physical experiments, cultivate innovative talents ---- With China University of Petroleum (East China), for example**

WEI Qun-mei

(College of Science, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266555, China)

**Abstract:** This article introduces a series of experimental teaching reforms in my school which are aimed to improve the teaching quality and efficiency in physics experiments. We intend to achieve the cultivation of innovative talents by combing through the experimental methods and summarizing the experimental techniques.

**Key words:** innovation education; experimental pattern; teaching method; teaching system

# 物理实验教学中心建设与拔尖人才培养的探索

张 杨, 朱 正, 陈淑妍, 李庆波, 王 朔, 孙晶华  
(哈尔滨工程大学 理学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 介绍了哈尔滨工程大学物理实验教学中心的基本情况, 建设的指导思想, 针对拔尖型人才培养在教学改革方面的几点做法, 取得的成果, 以及示范中心建设的实践经验。

**关键词:** 物理实验; 教学改革; 能力培养; 创新精神

## 1 概述

哈尔滨工程大学物理实验教学中心始于 1953 年哈军工成立初期, 1999 年, 中心首批通过“全国高校基础课实验室”评估, 2006 年被评为黑龙江省首批实验教学示范中心, 2008 年被批准为国家级实验教学示范中心建设单位。

经过多年的教学实践, 物理实验教学中心在实验教学中形成了“强化基础、注重能力、启发创新”的实验教学理念, 坚持培养“知识、能力、素养”全面发展的创新型人才的目标<sup>[1]</sup>。建立了以好奇心唤醒为起点, 科学素质培养为核心内容, 从兴趣出发培养创新与探索精神的实验教学新体系, 并依此搭建了三大实验教学平台。



教学平台

好奇心唤醒平台——激发学生对物理学的好奇心和兴趣, 催生获取知识的原动力。为此, 我们以《物理学原理演示实验》、辅之以“百年诺贝尔物理长廊”、“科技发现影像展播室”等多种形式, 旨在唤醒学生的好奇心, 重新点燃他们探索未知的欲望。

科学素质养成平台——培养学生掌握物理实验基本知识、基本方法和基本技能, 提高发现、分析和解决问题的能力。通过一系列“基础性”、“综合性”、“设计性”物理实验项目, 培养学生的科学素质。

创新实践探索平台——培养学生的创新精神, 提高学生对实验方法和技术的综合运用能力。通过大学生科技训练计划、大学生科研立项和一系列科技竞赛活动, 培养学生的创新能力、竞争意识、合作与协作能力以及团队精神。

**基金项目:** 校教改重点项目 (JG2013ZD08); 校教改项目 (JG2012YB26)

**作者简介:** 张杨 (1979-), 男, 博士, 副教授, 物理实验教学中心 副主任, 主要从事高精度磁力仪研制和地磁导航研究。

## 2 基于拔尖人才培养的教学改革

依据我国现阶段经济社会发展对人才培养的需要及我校坚持“培养具有坚定信念与创新精神,视野宽、基础厚、能力强、素质优的可靠顶用之才”的目标,确立了哈尔滨工程大学物理实验教学中心建设指导思想:

以培养适应新世纪科技发展要求的高素质人才为宗旨,以转变教育观念和教育思想为先导,以培养学生具备综合的科学素质和创新能力为目标,以课程体系、课程内容和教学模式的改革和建设为核心,创建国内一流的、多功能、多层次、开放型的物理实验教学平台<sup>[2-3]</sup>。

### 2.1 建立分大类教学体系为学生提供自由、自主的学习环境

依托学校“实验室综合管理系统”,对不同的专业分套餐排课,针对不同专业的学生给出不同的套餐和实验项目的选择建议,由学生自主选择上课时间和实验项目。在每一套餐中,为学生提供充足的、优质的实验项目菜单供学生选择。考虑不同专业的共性需要,在不同套餐中的实验项目允许交叉<sup>[4]</sup>。同时为满足个性化需求,允许跨模块选择。

同时建立以学生为中心,采取“时间、内容和空间”上全方位开放的教学模式。在时间上,学生可以自主选择上课时间。在实验内容上,开设足够多的实验项目,供学生选择与本专业密切联系的应用性综合性实验项目。实验允许反复、失败重做,鼓励做得深入,鼓励实验研究,并有加分。在空间上,通过科技创新、科技竞赛等多种教学组织形式,以合作式、研究式为主的学习方式,拓展学生进行物理实验的空间。学生可以通过课堂内外、实验室内外、网络平台、图书馆、虚拟实验室等多种方式进行自主学习,突破了传统物理实验室空间的约束。高水平的研究是实验教学充满活力的源泉。教学中鼓励学生把学习与研究结合起来,在学习中研究、研究中学习,寓教于研,鼓励师生思维相互碰撞,擦出火花,提出问题。其中一些可深入探讨的课题已获得学校的实验立项和大学生科技创新立项的资助<sup>[5]</sup>。通过启发与引导,把研究型教学和自主式学习的思想贯穿物理实验教学的始终。

### 2.2 基于 MOOC 理念建立教师、学生双向无线测评系统

学生对教师教学效果和教学能力的评价是促进教学相长的重要举措,与理论课期末网络评分不同,实验教学的评价需要课堂上进行评价,但是传统的填表等评价方法使得学生在教师的教学效果和教学能力存在质疑的时候也往往不敢表达自己真实的意愿,因此要想获得学生实验教师教学效果和教学能力的客观评价,必须借助新的评价方法和评价系统<sup>[6]</sup>。借助无线通信技术,发展一种基于无线网络的手持式教学效果评价系统,使得学生能够敢于客观的评价教学效果,同时教师对学生学习过程进行时时评测,实现教师、学生双向评价,教师测评不合格的学生要重做,学生测评不合格的教师要进行整改。

### 2.3 培养学生除知识与技术之外的素养

通过实验过程培养学生的基本素养:

禁止编造,抄袭数据——诚信;

仔细观察实验现象,善于发现问题——细心和分析问题的能力;

实验中讨论问题,敢于表达自己的观点——胆识和沟通能力;

提前预期,禁止迟到——积极的态度;

团队立项,协同作战——担当和团队合作精神。

实验流程包括课前预习-老师讲解-动手实验-老师指导-实验后整理仪器-数据处理-撰写报告-老师批改报告-学生分析总结。整个过程有始有终,养成有条不紊的做事风格——沉稳。

培养学生除知识与技术之外的素养:诚信;细心;胆识;积极;担当;沉稳,真正使学生日后能够脱颖而出,成为拔尖型、领军型人才。

### 2.4 推进研究型教学方法

高水平的研究是实验教学充满活力的源泉。教学中鼓励学生把学习与研究结合起来,在

学习中研究、研究中学习,寓教于研,鼓励师生思维相互碰撞,擦出火花,提出问题。其中一些可深入探讨的课题已获得学校的实验立项和大学生科技创新立项的资助。通过启发与引导,把研究型教学的思想贯穿物理实验教学的始终。

对于研究创新型实验,要求学生自己查阅资料、分析消化,制定实验方案,动手实施直到完成实验研究论文<sup>[7]</sup>。教师只是启发和引导学生,充分发挥学生的主观能动性,调动学生学习的积极性。

### 2.5 编写出版特色实验教材

结构上打破传统实验教材的编写方式。从教学目的出发,采取由浅入深,“进阶式”结构。将实验项目按性质分为四个模块:预备性实验,验证性实验,综合性实验,设计性实验。这样做的目的就是时时提醒教师和学生,不仅“教”要明确“教”的目标,而且“学”要明确“学”的目的。在实验内容上较以前的教材都有较大的变化,突出物理学知识与科学技术相结合,与日常生活相结合,与实际应用相结合。在每个实验中,以各种物理现象、历史、科学家小传为背景,从多角度、多方面充分展示各种现象背后蕴含的物理学原理,增加对应的实验在生产实践、生活和科研方面的应用。在版面设计上,为了使教材具有更好的可读性,借鉴国外教材的特点,本书将采用彩版印刷。图片单独安排在每页扩大出来的外侧。在编排方面,注重版面设计,图文并茂,给人以赏心悦目的感觉。

### 2.6 提高实验能力,推行开放式自主式考核方法

学生实验成绩评定着重考核学生动手能力、实验设计能力、综合实践能力,实验数据的测试、分析及处理能力,以及实验报告的撰写能力。基于学校的“个性化、精英式人才培养战略”,进行“拔尖型”实验考试。所有同学自愿参加实验考试,不参加考试的同学成绩已平时成绩进行计算,参加考试的同学有机会获得优秀,考试内容比平时的实验层次更高,以设计性、综合性为主,开拓学生视野,提升动手能力<sup>[8-9]</sup>。同时,为配合个性化拔尖人才培养的目标,学生可以申请期末考试免试。申请免试的学生除要取得平时的基本实验、综合训练环节、专题讨论课等教学环节的优异成绩外,还要选做由主讲教师在不同教学阶段布置的若干结合工程实际、着重创新设计能力培养的免试题目,并根据实际情况获得最终成绩。

## 3 结束语

经过多年的教学实践,结合自身情况,物理实验教学中心在实验教学中形成了“强化基础、注重能力、突出创新”的实验教学理念,明确了培养“知识、能力、素养”全面发展的拔尖型人才的目标。在已有三大平台的基础上,不断地进行改革和探索,行成自己的特色,希望能给其他高校的实验教学改革提供一些参考和借鉴。

### 参考文献:

- [1] 王兴邦.认真总结,提升理念,凝练成果,突出特色,迎接国家级实验教学示范中心验收[J].实验技术与管理,2010(4):1-5.
- [2] 潘信吉.实验教学示范中心可持续发展的研究与实践[J].实验技术与管理,2010(6):111-113.
- [3] 潘蕾.实验教学示范中心建设的探索与实践[J].实验室研究与探索,2005(2):89-91.
- [4] 韩忠,李田.彭华改革大学物理实验教学体系 建设示范性教学实验中心[J].实验室研究与探索,2009(2):89-91,109.
- [5] 孙敬姝,刘倩,霍俊德.物理基础实验室建设与创新人才培养[J].实验技术与管理,2003(1):82-84.
- [6] 李幼真,徐富新.物理实验教学中的若干问题及创新平台建设的思考及实践[J].物理实验,2010(5):102-104.



- [7] 王震, 丁永文。普通物理实验教学中的“提出问题”[J]。物理实验, 2010 (4): 18-21。
- [8] 朱红, 王伟, 原所佳。大学物理实验课程考核方式的探索和实践[J]。实验科学与技术, 2011 (4): 108-111。
- [9] 李林, 施芸城, 钟宏杰。物理实验课不同考核方式的改革与实践——操作考试的积极效应最为明显[J]。大学物理, 2010 (2): 43-46。

## Construction of Physical Experiment Teaching Center and Study of cultivating for top-notch personnel

Zhang yang, Zhu zheng, Chen Shu-yan, Li Qing-bo, Wang shuo, Sun Jing-hua  
(College of science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The basic information, guiding ideology, and some methods of teaching reform of physical experiment teaching center are described in Harbin Engineering University. After that, the achievement, effects of demonstration and experience and its feature are also presented

**Key words:** physical experiment; teaching reform; ability training; innovation spirit

## 略论高校物理实验教学

范士民

(阜阳师范学院 物理与电子科学学院, 安徽 阜阳 236041)

**摘要:** 通过对物理实验教学过程的诸多方面进行深入探讨与思考, 提出自己的观点和看法与同行交流。

**关键词:** 实验教学; 教学过程; 动手能力

物理实验教学是高校教学工作的重要组成部分, 与理论教学一同构成高校培养人才的主要手段, 实验教学对于提高学生的实践能力和创新能力有着无可替代的作用。对此, 实验教师应该明确所从事职业的崇高地位, 树立正确的价值观。

如何上好实验课?这是摆在每个实验教师,特别是年轻的实验教师面前的首要问题, 实验教学不同于理论教学,它要求所有的学生在一定的时间内完成一定的实验内容,达到每次实验教学的目的。学生对实验原理的理解深浅程度不同,学生的动手能力各不相同,实验仪器设备的性能、状态各异,为了培养学生的动手能力,实验教师又不可能代劳,这些都对实验教师提出了很高的要求。实验教师的自身素质和临场应变能力至关重要,甚至决定了实验教学的成败。

首先,为了上好实验课,课前实验教师要做足功课。首先需要透彻理解实验原理,搞清楚每一个已知量、待测量和未知量,对原理公式的来龙去脉要准确把握,做到心中有数。其次一定要先到实验室认真试做实验,了解每一台仪器设备的性能、操作规程和维护维修特点,了解测量值的大小和范围,认真处理实验数据,自己先写出实验报告。

根据实验教学大纲,写出实验教学设计(教案)是每个实验教师的本职工作,本人认为实验教学设计(教案)的基本内容应包括:一是实验目的,要根据实验教学大纲和实验内容准确定位,实验目的要明确、具体、可检测的。二是实验仪器,写清楚实验仪器设备的名称、型号和主要规格参数,对实验耗材的名称和数量也应准确标明。三是实验原理与方法,应简明扼要,重要公式要写清楚推导过程,每一个物理量的符号要规范,实验数据处理应给出公式和处理方法。四是实验内容和步骤,要求实验内容明确,步骤准确规范,给出测量原始数据的具体表格。五是教学过程,这在下面稍后详谈。六是教学小结,对实验教学过程中出现的问题进行反思和总结,提出改进意见,这部分内容是实验教学之后写的。

接下来重点谈谈实验教学过程,在上第一节实验课之前要向学生明确强调的事项,主要目的是立规矩。首先是安全教育,介绍实验室电源系统,让每一个同学知道电源控制开关的位置和切断电源的方法,实验教师要现场演示。其次是卫生教育,禁止学生在实验室吐痰、乱扔垃圾、吃东西,每次实验结束后个人都要整理好自己的实验台,放好凳子,并留下几名同学负责实验室的整体卫生,再次是强调实验教学注意事项,具体包括有禁止学生迟到和早退,未经允许禁止擅自调换实验组别;没有实验预习报告不得进入实验室做实验;独立完成实验,未经允许不得调换座位和实验仪器,未经允许不得乱动实验仪器,保持实验室安静;实验结束后学生应如实填写《实验记录本》,禁止学生调换《实验记录本》或带离实验室,及时提交实验报告;鼓励学生探究实验和大胆创新。向学生给出自己的联系方式,以便课后交流。

建议实验教学过程如下:学生进入实验室,首先提交实验预习报告。并到指定座位就坐,

---

**作者简介:** 范士民(1957-),男,安徽阜阳人,实验师,从事大学物理实验研究。

实验教师提出若干个实验预习思考题,让学生思考并对照实验仪器说明书预习;学生思考时,实验教师批阅实验预习报告并及时将实验预习报告发还给学生,作为记录实验原始数据之用。约十分钟之后,实验教师有针对性地安排提问,同时记录学生回答情况。提问结束后,实验教师简要讲解实验原理、实验仪器、实验方法、实验步骤和注意事项。讲解实验原理时,要注重分析核心公式中每一个物理量的测量方法和测量要求,弱化公式的推导过程,让学生明确测什么量、怎么测。测几次。介绍实验仪器时可以边演示边介绍,明确操作步骤和注意事项,要求学生记录实验仪器的名称、编号、型号和主要规格参数。整个讲解时间不宜过长,一般控制在二十分钟以内,以免占用过多的操作时间。讲解结束后,可以试让学生总结实验过程,对学生的疑惑进行解答。接下来,学生分组实验。实验教师应主动巡视,了解学生实验的进度,及时纠正学生的错误,解答学生的问题,解决实验仪器的小故障。学生实验结束后,实验教师要指导学生按照要求填写《实验记录本》,并签字确认。实验教师应审阅学生实验的原始数据,并签署合格或不合格的评语,对实验不合格的学生应安排适当时间补做。对于提前完成实验的学生不宜让其提前离开,可以安排选作内容或交流心得体会,也可以让其到实验室写实验报告。

如何评价学生的实验动手能力?这是涉及实验教学评价的一个关键问题。理论分析能力可以通过试题检测,实验报告也只能大致反映学生的理论分析能力和表达能力,很难判断学生的实验动手能力,对学生平时成绩的评价,实验动手能力应占有一定的比重。本人并不建议在每次实验都对所有学生的实验动手能力进行现场打分,因为一方面现场打分会占用很多时间,同时现场打分也会让学生过于关注分数而影响实验过程,我认为可以对学生的动手能力进行描述性的记录,如记录学生完成实验的时间,记录学生出现错误的情况,记录学生维修仪器设备的情况,记录学生选做内容完成情况,记录学生的创新思维等等。学期结束后,根据平时记录确定每个学生的动手能力得分。

仪器设备出现故障时实验教师应如何处理?由于学生实验所用的仪器设备利用率高,不可避免会出现各种各样的故障。实验过程中,如果有的学生仪器设备出现故障,实验教师应及时联系实验管理人员维修更换,不能现场维修的应让管理人员课下及时维修。鼓励学生对一些小故障进行维修,实验教师应对维修仪器的同学进行记录,并酌情对学生的实验动手能力进行加分。仪器设备出现故障不能现场维修的,实验教师应及时安抚学生的焦急情绪,并及时安排与其他学生合做实验。

少数学生不能按时完成实验内容的,实验教师应分析学生未能完成实验的原因,并安排学生在适当的时间补做。大多数学生不能按时完成实验内容的,在时间允许的情况下可以适当延长实验时间,并认真分析自身原因,改进教学方法和手段。

#### 参考文献:

- [1] 赵艳艳。大学物理实验教学现状及改进措施研究[J]。高校实验室工作研究, 2011(3)。
- [2] 刘丹。我校大学物理实验课程改革的研究[J]。贵阳学院学报(自然科学版), 2011(2)。
- [3] 应向东, 叶建柱。大学物理实验课程体系改革探索[J]。高等理科教育, 2006(5)。
- [4] 关晓平。工科大学物理实验的教改初探[J]。教学研究, 2000(4)。

### Brief study on teaching of physical experiments

FAN Shi-min

(School of Physics and Electronic Science, Fuyang Normal College, Fuyang 236041, China)

**Abstract:** The article makes a deep research and thinking on many aspects of the teaching process of physical experiments and, puts forward the author's own views and opinions to exchange with the teachers of the same occupation.

**Key words:** experimental teaching; teaching process; ability to work with hands

# 探究性基础物理实验教学平台建设的探索与实践

鲍德松

(浙江大学 物理系, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 针对学生自主创新能力培养的要求及各年级学生的特点, 探索与其相适应的探究性实验平台建设, 使得学生在有限时间内尽可能接触更多、更新的先进技术、手段及方法, 提升大学物理实验教学水平。

**关键词:** 探究性实验; 创新能力

## 1 引言

近年来, 高校都十分重视大学生的创新能力培养, 浙江大学物理实验教学中心在物理实验教学中为学生构筑一个合理的实践能力训练平台, 应尽可能为学生提供综合性、设计性、创造性比较强的实践环境, 让每个大学生在大学生活中能经过多个这种实践环节的培养和训练。物理实验教学中心对本系学生的实验教学做了如下探索: 一是将各研究所、各教授的专业实验室充分为学生开放; 二是吸引长江、杰青等教授直接参加本科生实验教学; 第三, 让学生直接参与前沿课题研究工作。因此, 把物理实验原来的被动式教学变成学生主动的、有浓厚兴趣的研究性学习, 一方面培养了学生的科研能力, 另一方面也提高了学生理论联系实际的能力。

## 2 探究性基础物理实验教学平台

探究性基础物理实验教学平台建设以物理系物理实验中心为主体, 由凝聚态物理研究所、光学研究所和应用物理研究所为支撑, 集物理系科研和教学工作为一体的公共基础课教学实验平台。主要功能是帮助理、工、农、医各专业本科学生, 按照专业公共必修基础课的要求打好相应的物理学基础, 同时开展有教授指导的以本科生为主体的科学研究工作, 培养本科学生的观察能力、动手能力、理论联系实际的能力。探究性基础物理实验教学平台建设以培养高层次的“复合型、研究型、创新型”一流人才为目标; 同时也弥补了目前的大学物理实验环境和设备、经费的欠缺, 充分依托物理系各研究所的实验条件和师资力量以满足大学生创造性才能培养的实验环境。

经过几年的实践探索, 除了物理实验中心教师之外, 到目前为止已得到了物理系三十多位教授的响应, 同时开展了包括凝聚态物理、光学以及应用物理等研究方向数十个课题研究。具体研究内容如表 1 所示:

表 1 目前正在开展的探究性实验内容

1	新型超导体合成和物性探索
2	非常规超导体的探索研究
3	铁基铁磁超导体的物性研究
4	$\text{NaxCoO}_2$ 超导材料的电化学方法制备
5	YBCO 超导火车的制作和演示
6	新型无机超导体的合成和表征。
7	多重极端条件下的物性测量: 方法与技术
8	关联电子材料的开发与应用

9	氧化锌基薄膜晶体管材料与器件的物理特性
10	氧化锌缺陷的顺磁共振谱与光致发光谱研究
11	氧化铝模板的制备与形成机理研究
12	新材料（能源类）电子态的理论计算和实验测量
13	自旋阻挫效应的 Monte Carlo 模拟
14	可调谐半导体激光功率放大器的输出特性、光束和偏振态研究
15	可调谐窄线宽二极管泵浦铷蒸气激光的动力学过程和实验研究
16	荧光寿命型光纤温度传感技术研究
17	半导体激光泵浦固体激光器的输出和选模特性研究
18	超导量子器件
19	基于超导器件的量子计算和量子模拟的实验研究
20	介观超导体包括超导纳米线和薄膜的输运特性的实验研究
21	纳米碳材料制备
22	无线能量传输的实验设计
23	功能材料应用
24	非线性科学
25	光子晶体、激光物理
26	基于冷原子干涉的精密测量研究
27	高能粒子探测
28	碱金属院子自旋态时域技术的研究
29	利用扫描隧道显微镜等手段研究有机半导体的生长及电子态
30	原子或分子与固体表面相互作用的第一性原理研究
31	团簇及其组装材料的结构和电子特性....
32	CUPT 项目（国际青年物理竞标赛题目，每年 17 个）
33	液体表面薄膜的制备
34	超导磁通的动力学

学生通过探究性实验研究，不仅能提高学生分析问题、解决问题的能力，而且也能启发他们的创新思维；有利于加强对学生的创新兴趣、意识和科学研究能力的培养，在教学过程中让学生逐步成为自我开发创造的主体，鼓励学生扬长避短，学有特长，逐步形成各具特色，风格各异创新素质，并在各种创新实践中表现出一定的创新才能；激励教师、学生互动，形成教与学过程中创新意识的良性循环。使实验教学最大限度地挖掘学生的知识潜能，有利于学生科研素质与创新能力的培养。

学生对参加研究性物理实验也有着很大的兴趣。探索性实验始终围绕着重培养学生的实验兴趣、独立实验能力、分析与研究能力、自主、创新能力以及归纳、总结及表达能力等方面展开。在选题上尽量实施个性化教学，及时将科研前沿引入教学中，按照学生自己兴趣选择探索研究方向。在实验过程中及时让学生归纳、总结以纠正实验过程中出现的问题，注重全过程管理：包括文献查阅、方案设计、设备搭建和改进、实验记录、数据分析、合作讨论、演讲、论文写作....。

### 3 结束语

探究性实验研究具体体现以下特色：

- 1) 课内与课外结合、教学与科研结合、变被动型教学为主动性求学；

2) 物理系各研究所的专家教授为了吸引更多优秀的大学生，能积极主动投入到物理实验教学之中；

3) 各指导教师带着前沿课题研究进入本科实验教学，因此形成了制备方式的多样性、样品表征手段的多样性，克服了仪器设备数量少的矛盾。

4) 让本科生尽早接触使用现代大型先进仪器设备，克服了研究型实验设备的大型化、高价位与有限教学实验经费有限的矛盾。

## **The construction of the based physics experimental teaching platform for independent researching**

Bao de-song

(Department of Physics, Zhejiang University, Hang zhou 310058, China)

**Abstract:** according to the characteristics of the cultivation of students' autonomous innovation ability, the based physics experimental teaching platform for independent researching has been built. This scheme can improve the teaching level of university physics experiment, so that the students in the limited time as far as possible, contact more updated advanced technology, means and methods.

**Key words:** Exploratory experiments; innovation ability

# 构建大学生创新实验辅导平台的构想

郭山河, 张金宝, 王 丹

(吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130025)

**摘 要:** 创新实验活动是培养工科学生理论联系实际, 动手实践能力, 以及人与人之间交流协作能力的重要步骤。为学生提供交流辅导的平台, 对增进创新实验的效果将有很大的帮助。

**关键词:** 创新性实验; 教学模式; 辅导平台

## 1 前言

为了鼓励学生在校期间将所学知识与生产、生活、专业相结合, 在实践中锻炼、提高自己的能力, 为了使培养出的学生走出校门时能尽快适应所从事的工作, 并被社会接受认可, 各学校在改进课程体系, 改进实验内容与教学模式上都下了很大功夫。特别是现在, 重视大学生创新实验的环节又在高校中普遍开展起来。如何在完善创新实验机制与形式的过程中收到好的效果, 将该活动深入有效地开展下去, 是我们教育工作者需要共同关注的问题。其中构建大学生创新实验辅导平台, 便是值得我们探讨商榷的内容。

## 2 开展创新实验活动的意义

基础实验教学的特征, 因注重基础知识本身的系统性、连续性, 使得各个实验内容过于传统, 操作步骤过于呆板, 使学生认为这些初中听说过、高中看见过、并再次在大学实验课中验证过的物理基础现象, 对适应社会的需求, 对改善大多数学生先天的重理论轻实验的自身知识结构意义不大。许多学生做实验就是测出数据, 按老师要求写出实验报告就完事。其自身的动手能力, 创新思维方式, 与其受教育的程度不相符合。这点从我校学生提出的创新实验内容上、从电子创新大赛的成果分类上就可以看出。不可否认, 这些活动确实激发了许多学生的创新热情, 并从该活动中得到了锻炼, 每届都有学生拿到了国家级的奖项。根据我指导几届学生创新实验活动来看, 参加活动的同学不少是为了保研而参加的。据了解, 许多没有参加的同学或是有想法, 但不知行不行, 也不知道去问谁; 或是想参加, 但没有想法, 希望能有老师给出建议。但从效果上看, 创新活动普及的面还不够广, 创新的深度还有待于进一步提高。

## 3 创新实验的环节

1) 学生结合学习专业知识, 接触基础与专业实验设备的优势, 去发掘专业上、生活中遇到的的小问题, 设想如何解决这个问题, 是开展创新性实验的第一步。所以, 在基础实验教学活动中, 加大应用性内容, 增加思考性内容, 突出观察性环节, 可有效解决基础实验与创新性实验之间的衔接。

2) 与具有相关领域的老师讨论该方案的可行性, 是创新性实验实施的关键步骤。学生现有的知识水平与实验技能, 使得学生想出来的方案具有“高、大、全”的特点;

高: 是指在解决实际问题的能力方面把自己想的过“高”。比如把传感器功能想象的过于强大、把设备之间的组合想的过于完美、把辅助材料的自制想象的过于简单等。

---

**作者简介:** 郭山河, 男, 教授, 长期从事物理实验教学与研究, 研究方向为测试计量技术及仪器。

大:把实验内容制定的过大。没有以重点解决的问题与要实现的基本功能为核心,作适当的展开。使得部分内容在现有的课余时间、知识水平下无法完成。

全:把功能想象的过于全面。如远距离的遥控、计算机编程、控制等,智能环节的实现。与老师进行讨论,将有助于把实验内容变为可实际操作实施的方案。

3)在相关实验室完成原理性实验,并对方案加以改进与完善,或决定是否继续进行实际研发阶段。借助于实验室的现有资源,通过辅助装置的自制与搭建,学生可通过观测,从定性与定量的角度,检验与实验预期的符合程度。这是是否做出实验成果的最后环节。

4)完成阶段,学生将原理实验的环节组成实用模型,通过最终测试,对其功能做出总结,并对创新实验做出系统的回顾,这也是对学生今后的学习方式、方法的最好的引导。

#### 4 构建创新实验辅导平台的构想

综上所述,创新性实验的实施应由交流平台与实施平台两部分构成。其功能有:

##### 4.1 交流功能

目前,根据学校专业的特点,光机电一体化内容越来越多,与专业结合的程度也越来越大,靠学生接触熟悉的老师解答问题,恐难以胜任,至少不利于开阔思路。借助于学校已有的校园网络,由不同学科的老师组成一个受访群体,从自身专业的角度解答学生提出的相关问题。如有需要还可与学生面谈具体问题。

##### 4.2 实施功能

在基础实验室建立相应的“大学生科技创新辅导站”,依托已有设备、材料,为学生提供实现原理性实验功能的场所,并对学生进行适当的指导。

##### 4.3 信息检索功能

对往届学生完成的创新实验进行汇总(如有可能,可录入全国大学生创新实验的相关信息),扩大学生的创新思路,以及避免做重复性工作。

#### 5 总结

创新性实验的开设,对学生综合素质的培养提高具有非常积极的作用,不仅可以改善学生的知识结构,还可改善人才培养与社会需求的高分低能现象。在当今知识爆炸性增长的情况下,急需不同学科与专业之间的协调与合作。构建辅导平台的需求也越来越明显。学校完善相关的扶植政策是关键。利用有限的资源,力争取得事半功倍的效果,加快提高人才培养质量的步伐,也是每个教育工作者的希望。也希望同行之间通过探讨有效的教学模式,改进现有的教学环节,使创新性实验得到健康有序的发展。

## Conception of construction of college students ' innovative experimental guidance platform

GUO Shan-he, ZHANG Jin-bao, WANG Dan  
(Physics College, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Innovative experimental activity is to train the students of engineering theory with practice and hands-on skills, as well as important step in interpersonal communication and collaboration skills. Counselling for students exchange platform for enhancing innovation in Lab's effect will be of great help.

**Key words:** Innovative experiment; Teaching model; Coaching platform



# 改进实验模式 培养学生创新能力

周玉芳, 胡连军

(山东大学 物理学院, 山东 济南 250100)

**摘要:** 物理实验在更新实验设备的同时更应注重培养学生自主创新的能力. 本文介绍我们在实验教学中, 改进原有的实验模式, 增加学生自主学习、自行设计、团队合作等教学环节, 激发学生对物理实验的兴趣和热情, 发挥学生的主动性和积极性, 最终以培养学生创新能力为目的的教学探讨.

**关键词:** 物理实验; 实验模式; 创新能力

## 1 引言

大学物理实验是学生的一门必修课, 目的是让学生系统地了解物理实验的方法, 掌握物理实验的基本知识与技术, 培养学生独立科学实验的技能. 近几年, 由于国家重视对教学资源的投入, 物理实验室在硬件建设上有了很大的改观, 实验室的教学环境得到明显改善, 仪器设备进行了更新换代, 实验仪器设备的综合性、集成化程度越来越高, 学生参照实验讲义的要求能够更加方便容易地完成实验内容. 实验仪器变得越来越先进的同时, 如果不能及时更新观念、改进模式也会逐渐显露出一定的负面影响, 如学生可以完全参照已有的实验方法和步骤, 只需进行简单的操作便可得出实验数据和结果, 可以不用深刻领会实验原理及思想方法, 操作性大大降低了, 限制了学生的主动性和积极性, 难以激发学生的兴趣和激情, 这对于学生的动手能力和创新能力的培养是不利的. 特别是我们承担了理科多个层次的物理实验课程, 包括教育部在试点高校实施的“基础学科拔尖学生培养试验计划”的实验班学生, 实验课程应该满足对学生科学思维、动手能力、创新能力的培养. 为此, 我们以培养学生的自主创新能力为目标, 对原有的实验模式进行改进, 内容更加充实, 学生的能力得到提升.

## 2 实验模式的改进

在原有的以验证性实验为主的项目中精选出一部分实验, 作为学生自主性、研究性的实验, 并提出实验目的及对实验的要求. 将学生以组为单位分成若干个小组, 每一组同学需经过认真阅读实验讲义、参考书等资料了解掌握该实验涉及到的理论. 此后小组同学要熟悉掌握实验仪器的结构、功能及测量原理. 有了这些准备后, 小组同学发挥集体智慧设计出该实验的测量方案及测量步骤, 并与指导教师一起讨论该测试方案的可行性, 讨论过程中若发现存在某些问题, 指导教师采用提问式、启发式的商讨方式引导学生修正存在的问题, 优化实验测量方案, 最后完成实验测量、数据处理等相关步骤. 实验完成后指导教师要对该实验进行总结, 对比不同组别的实验特点, 使学生能够启迪思维、相互学习、共同提高. 例如对于电子荷质比测定的实验, 学生首先学习熟悉示波管的结构及工作原理, 然后要学习并掌握电子射线的电聚焦及磁聚焦理论, 最后要求学生给出进行电子射线磁聚焦测量的计算公式以及必须进行测量的物理参量. 在这样一种自主学习中, 学生体会到了如何将书本上学到的理论知识真正应用到实际中的一种尝试, 虽然所涉及到的理论都是课堂上或书本上已有的理论, 但能够真正地应用到实际中却还要考虑诸多的因素.

---

**作者简介:** 周玉芳(1959-), 女, 山东大学物理学院教授, 博士, 主要从事物理理论及实验教学.

### 3 实施效果

以上述提及的电子荷质比实验为例,学生在实验小组中相互讨论、积极探索、充分发挥每个同学的特长特点,依靠集体的努力并通过与指导教师的交流,确定出实验所需的测量方法及实施步骤,最后按照设计出的方案完成实验测量.通过这样的过程同学们加深了对理论的理解,增强了理论与实践相结合的能力,使思维更加开放,提高了动手能力.学生一致认为这种实验模式给他们留下了极其深刻的印象,其收获及能力的提高是非常明显的,主要可归结为以下几方面:

首先对示波管的结构及工作原理有了详细的了解,阴极电子发射是由一个表面涂有氧化物的金属圆筒,经灯丝加热后温度上升,部分电子克服逸出功后脱离金属表面而成为自由电子发射,在外电场作用下形成电子流.而栅极电位比阴极低,使阴极发射出来具有一定初速度的电子,通过栅极和阴极间的电场时被减速.在栅极之后装有加速电极,加速电极之后是第一阳极和第二阳极,这三个电极所形成的电场,对阴极发射的电子进行加速,并使之会聚成很细的电子射线,即电聚焦.

若使得所发射的电子在螺线管磁场中运动并聚焦,通常情况下电子的速度  $v$  和磁感应强度  $B$  之间成一角度  $\theta$ , 可将  $v$  分解为平行  $B$  的轴向速度  $v_{//}$  和垂直  $B$  的径向速度  $v_{\perp}$ ,  $v_{//}$  使电子沿轴向作匀速运动,而  $v_{\perp}$  在洛兹力作用下使电子绕轴作圆周运动,电子做圆周运动的规律及半径分别为:

$$F = ev_{\perp}B = m \frac{v_{\perp}^2}{R} \quad R = \frac{mv_{\perp}}{eB}$$

电子做圆周运动所需的时间即周期  $T$  为:

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{eB}$$

电子的合成运动轨迹为螺旋线,其螺距为:

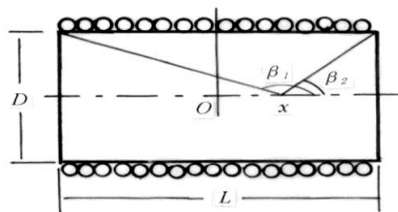
$$h = v_{//}T = \frac{2\pi m}{eB} v_{//}$$

此式表明,电子束从某一点出发,虽然径向速度  $v_{\perp}$  不同,所走的圆半径  $R$  也不同,但只要轴向速度  $v_{//}$  相等,所有电子的螺距是相同的,都会再次聚集到一点,这正是电子的磁聚焦.由此可见实验中要选择合适的轴向速度  $v_{//}$  和磁感应强度  $B$ ,使电子在经过螺线管的路程中恰好包含整数个螺距  $h$ ,实现电子射线的磁聚焦.

上述磁聚焦所需的磁场通常采用长直螺线管型线圈产生的磁场,如图所示,由于螺线管的长度是有限的,轴线上某点  $x$  的磁感应强度为:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I (\cos \beta_2 - \cos \beta_1)$$

若螺线管长为  $L$ , 直径为  $D$ , 上式可表示为:



$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I \left[ \frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2} - x\right)^2}} + \frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2} + x\right)^2}} \right]$$

螺线管轴线上各点的  $B$  值是  $x$  的函数, 为了完成实验测量需要求出磁感应强度的平均值, 若实验中使用的磁场是其中从  $-x_0$  至  $x_0$  中间的一段螺距的长度, 其平均磁感应强度  $\bar{B}$  可通过积分求得

$$\bar{B} = \frac{1}{2x_0} \int_{-x_0}^{x_0} B(x) dx = K \mu_0 n I$$

其中  $K$  由螺线管的几何参数确定, 根据实验中给定的参数得到

$$\bar{B} = 6.85 \times 10^{-3} I$$

由此得到电子的比荷为

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U_a}{l^2 \bar{B}^2} = 4.24 \times 10^7 \frac{U_a}{I^2}$$

在调节电流改变磁场大小进行磁聚焦测量时, 需要观察者的主观判断确定是否聚焦, 这在测量中不可避免会存在偶然误差. 为了减小偶然误差, 在测量时可采用不同螺距的聚焦方法, 即调节励磁电流使电子束在经过一个螺距后聚焦在屏幕上, 此时的电流记为  $I_1$ , 然后逐渐增加励磁电流电子束发散后再一次重新聚焦, 此时对应的使电子束经历两个螺距后的聚焦, 将此电流记为  $I_2$ , 此后继续增大电流, 使得电子束经历三个螺距后再次聚焦, 此时对应的电流为  $I_3$ , 经过这样的三次观察与判断可以大大减小励磁电流的偶然误差. 最后按照加权平均的方法把三次聚焦的电流折算成一次聚焦的平均电流

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{1 + 2 + 3}$$

#### 4 结 语

相同的实验内容, 不同的实验模式, 同学们的收获是显而易见的. 示波管所涉及的原理是电子在电场中的运动, 但要实现电子的聚焦确应考虑诸多因素. 电子射线的磁聚焦所用到的理论是带电粒子在磁场中的运动, 但要实现电子束的磁聚焦要考虑电子速度与磁场的协调一致, 即加速电压与励磁电流的配合, 同时还要考虑长直螺线管中的磁场平均问题. 为了减小偶然误差测量中采用电子束的多次聚焦确定平均电流的方法. 这些方面在课堂学习中是涉及不到的, 而通过实验获得了课堂上学不到的知识与方法, 实际运用知识的能力得到了极大的提升.

参考文献:

- [1] 张增明, 孙腊珍, 霍剑青, 等。研究性物理实验教学的实践[J]。物理实验, 2011, 31(2): 20~24。
- [2] 魏秀芳。开设开放性物理实验项目 培养大学生科研创新能力[J]。大学物理实验, 2014, 27(1), 117~119。
- [3] 王永钢。大学物理课程中围绕学生创新能力的调研与措施[J]。物理与工程, 2011, 21(3): 46~48。

## **Cultivating creative high-quality talents by improvement of physical experiments**

ZHOU Yu-fang, HU Lian-jun

(School of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China)

**Abstract:** To be satisfied the aim of cultivating high-quality of the students, the part of fundamental physical experiments were improved and developed. Compared with original verified substance the reformed experiments consist of design and creativeness parts. Students, especially those of “Taishan School” are very interested in experimental work and their design capacity as well as creativeness will be trained and enhanced.

**Key words:** physical experiment; high-quality talent; creativity

# 基于 WIFI 的物理实验教学实时评价体系创新建设

陈水桥, 乐静飞, 殷利明, 王 玮  
(浙江大学 物理系, 浙江 杭州 310027)

**概 要:** 本文分析了浙江大学物理实验中心传统实验教学评价体系的弊病, 提出了一种全新的物理实验教学实时评价体系, 提高了实验效益, 减轻了学生负担, 整顿了实验次序, 受到了学生的好评。

**关键词:** WIFI; 实时评价体系; 实时实验报告; 物理实验

## 1 概述

物理实验教学评价体系一直是物理实验教学系统中的关键一环, 它关系到学生的切身利益。<sup>[1,2]</sup> 目前为止, 大多高校实行的是“批实验报告—发实验报告”的模式, 这种传统的实验教学评价体系虽然可行, 但是弊病也不少: 其一, 学生实验报告是一种类似小学生回家作业的形式, 所以抄袭实验报告的现象屡禁不止, 也没办法解决; 其二, 物理实验考察的主要是学生的动手能力, 而不是实验报告的书写能力, 但是指导老师是通过实验报告给成绩, 所以这种评价方法有失偏颇; 其三, 学生为了取得好成绩, 把主要精力放在写实验报告上了, 所以往往“捡了芝麻, 丢了西瓜”; 其四, 实验报告回寝室做, 不利于体现学生的实际能力, 使得实验做得不好的学生往往通过抄袭好学生的实验报告而取得好成绩, 从而使这样的评价体系有失公平; 其五, 复杂的实验报告增加了学生的负担, 不利于高校培养实践创新人才的需求。所以改革势在必行。针对浙江大学物理实验传统的评价体系表现出来的问题和现在校园信息的新发展, 浙江大学物理实验中心提出了一种全新的物理实验教学实时评价体系, 该体系最大的特点是: 实验报告的实时性, 即当场做实验并完成实验报告; 实验评分的实时性, 即指导老师当场批实验报告并通过手机或平板电脑的 WIFI 上网输入成绩; 学生评价的实时性, 即学生可以即时通过手机实时对教师打分。通过这种方法提高了学生实验效率, 减轻了学生实验负担, 增进了师生互信, 规整了无序的实验报告收发现象, 建立了健康的学生实验成绩评价体系, 是一种值得在有条件的高校推广的实验教学评价体系。<sup>[3]</sup>

## 2 传统的浙江大学物理实验中心实验教学评价体系

传统的浙江大学物理实验教学评价体系主要存在的问题如下:

### 2.1 实验成绩评定不统一

各指导教师的实验报告成绩打分方法不统一, 没有一个好的标准(浙江大学物理实验中心曾经有过成绩评定标准, 但是这个模板太细, 就像考试给分一样, 完全不从实际出发, 不从操作简单化出发, 所以几乎没有教师会用这个标准来给学生打分), 完全按照教师的个人的感觉在打分, 所以同一个实验, 不同的教师, 打的分数参差不齐; 同一个教师, 不同的实验, 打的分数千变万化。<sup>[4,5]</sup> 比如某学生同样按照要求完成了 2 个实验后, 其中一个实验老师打 80 分, 另一个实验另一个老师打 90 分, 学生意见很大, 但是又都觉得无奈。

### 2.2 实验报告抄袭现象严重

物理实验报告成绩占学生总成绩的 70%, 但是实验报告却是在实验结束后, 学生回寝

---

**项目来源:** “浙江大学大物理实验教学基层组织建设”

**作者简介:** 陈水桥(1971-), 男, 浙江湖州人, 高级工程师, 硕士, 主要方向是物理实验教学与实验技术。

室写好后下周实验时上交的，这就存在一个实验报告抄袭的问题，基本上是没解决办法的，估计这种现象全国各高校都有。所以学生的实验成绩存在虚假成份，从而导致实验做得好的学生可能实验成绩一般，而不好好做实验的学生因为抄袭了更好学生的实验报告反而成绩很好，学生意见很大。

### 2.3 实验时间没有充分利用

浙江大学的物理实验课程有 1.5 学分，每次实验共 2.5 小时，可是现在的普遍现象是学生大多在 1 到 1.5 小时内就完成了实验，虽然实验中心规定学生必须至少在实验室做 2 小时实验，但是实际情况是很难控制。再加上实验时间基本上是上午 9:50 开始，所以学生的实验积极性会有所影响，再加上中午吃饭，下午有课等情况，学生往往不在乎重视实验，而希望早点完成实验。所以实验课的效益将大大受到影响。笔者曾经做过调查，过了 1-2 年后除了本系学生外大多学生对物理实验印象不深或者没印象。

### 2.4 实验报告收发杂、乱、脏

物理实验报告的收发历来是各高校头痛的事情。面向大类学生的教学模式，浙江大学每学期都要面对 3000 人以上的做实验的学生，因为学生是自由选课，使得同一个学生在每次做实验时都面对不同班级的同学，所以不能用传统的方法选个小组长来收发实验报告，为此实验中心专门为教师制作了“收实验报告箱”作为接收学生的实验报告，但是不可能为每位学生制作一个“发实验报告箱”来分发实验报告，所以只能以学生专业为单位制作了“发实验报告箱”，随之而来的问题是，许多学生拿不到自己的实验报告，因为他们的实验报告被有些学生取走了。学生对此意见很大。

为了彻底解决上述问题，浙江大学物理实验中心建设了基于 WIFI 的物理实验教学实时评价体系。较好地解决了上述顽疾，得到了学生的好评。

## 3 基于 WIFI 的物理实验教学实时评价体系

### 3.1 建设稳定的 WIFI 系统

浙江大学为了学生的需求，在物理实验中心大楼建设了稳定的 WIFI 系统，让学生可以通过无线上网获取各种信息，也为物理实验中心的实时实验评价体系的建设和实施提供了强大的保障，使实时评价体系得以顺利实施。依托 WIFI，实验中心的实验内容建设、实验室建设和实验教学创新建设跨上了一个新的台阶。<sup>[6]</sup>使得学生和老 师只要通过手机或平板电脑就能实时获取相关知识，提高了教学效率，节省了学生实验时间。<sup>[7]</sup>下面是浙江大学 WIFI 系统进入页面图，见图 1。

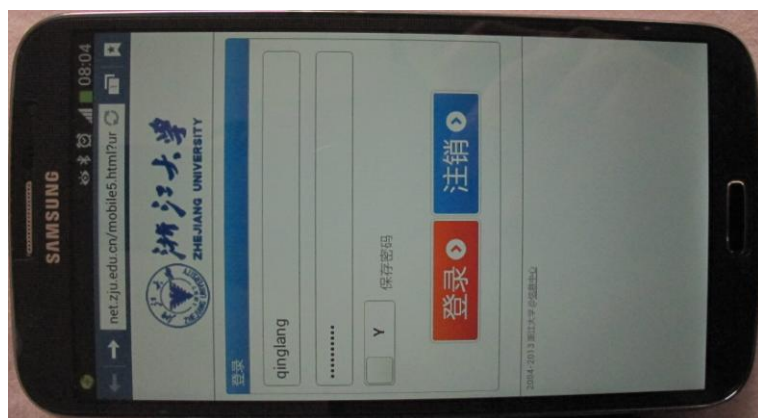


图 1 WIFI 进入界面

### 3.2 建设便利的网络化成绩管理系统

物理实验中心每学期都要面对大量的学生做实验，为了提高工作效率，实验中心建设了

面向学生的系统化实验教学网站，通过实验中心的网络，学生可以下载实验相关的信息和知识，学生可以在网上自由选择上课时间和实验内容。<sup>[8,9]</sup>为了便以学生实时了解自己的实验成绩，网上开设了实验成绩查询系统和针对实验教师或实验室的评分体系，学生还可以通过实验论坛反映自己的诉求。教师可以通过成绩登录页面直接给学生的实验打分。下面是实验中心的网络化成绩管理系统界面图，见图 2。

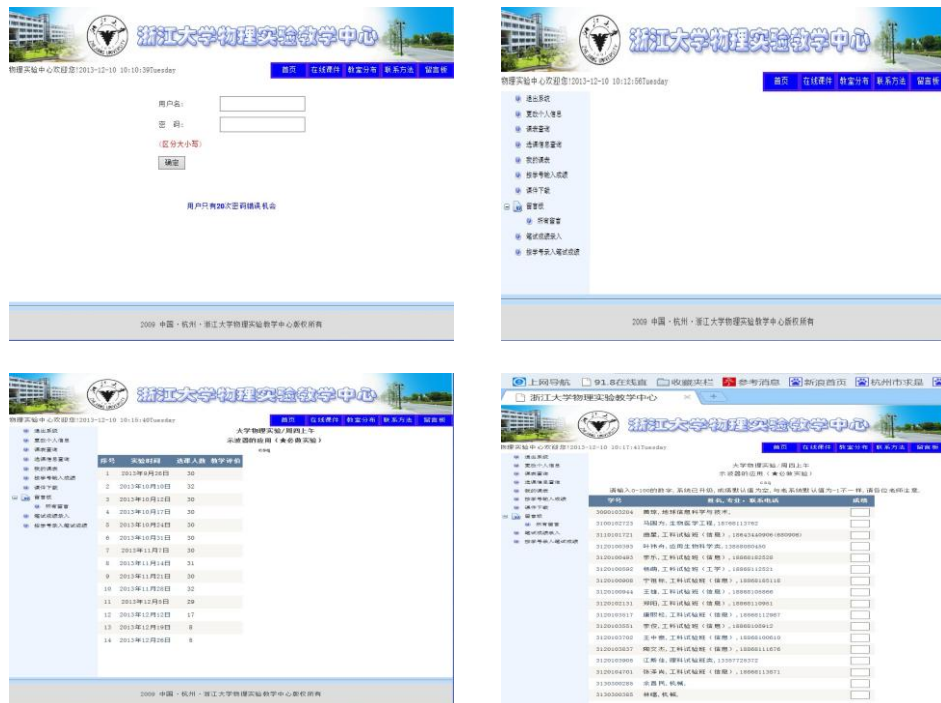


图 2 实验成绩管理页

### 3.3 设计面向实验内容的简易实时实验报告

传统的实验报告就像一张试卷，要写的内容非常多，包括实验目的、实验内容、实验原理、实验数据、数据处理、数据记录、问题解答等，学生反响很强烈，花在写实验报告的时间太多，效果却很一般，增加了学生负担，学生意见很大。<sup>[10]</sup>为适应基于 WIFI 的实时实验成绩评价体系，实验中心取消了原来的实验报告，为每个实验设计了新的面向学生的实时实验报告，即减轻了学生负担，又便以教师现场及时快速评定实验成绩，并及时指正学生在实验中的错误，受到了学生的极大欢迎。<sup>[11]</sup>

图 3 为“用扭摆法测定物体转动惯量实验”的实时实验报告。

### 3.4 规范统一的实验成绩评定标准

传统的评分标准为：预习报告及实验操作 40 分；实验报告 60 分（实验目的：5 分；实验仪器：5 分；实验原理及方法：10 分；实验结果及数据处理：10 分；结果分析及讨论：10 分；思考题：10 分；卷面好：加 2 分）。传统的实验报告成绩评定标准有点像考试卷一样给分，太细，绝大多数老师最后都做不到，废除是迟早的事情。因为每个实验指导教师一般要带三个实验小组，每个小组约 18 人，所以指导教师一周要批大量的实验报告，如果每次都像批改试卷一样，花费在批实验报告上的时间是可想而知的了，对一位即要搞科研，又要搞教学的老师来说，很难自始至终把实验报告当一张试卷来批改，所以传统的给分标准已经不适应现实的需求。<sup>[12,13]</sup>

所以规范统一的实验成绩评定标准也随着新系统的建设呼之而出。新的评分标准如下：先给一个基本分数 90 分，做得特别好的酌情加分，一般不超过 95 分；做得有问题或错误的酌情减分，一般不低于 85 分；最后看实验报告对错，错一个地方扣 1 分，最多扣 5 分；“其

他说明和建议”内有新观点酌情加 1~5 分。这样使得分数能控制在 80 分到 100 分之间（相差 20 分）。因为实验报告的成绩（取所有已做的实验的平均分）占总成绩的 70%（期末考试占 30%），所以实际使得分数能控制在 56 分到 70 分之间（相差 14 分），比较合情合理。另外无故未能做实验的学生，补做后，基本分数从 90 分调整为 80 分，其他不变。

新的评分标准简单明了，便于操作，符合实验课的评分需求。<sup>[14]</sup>

**实验 2.5 用扭摆法测定物体转动惯量**  
(实时报告)

姓名 \_\_\_\_\_ 学号 \_\_\_\_\_

**【实验内容】**

1. 用电子秤和游标卡尺测量待测物体的质量和必要的几何尺寸。

实验次数	1.	2.	3.	4.	5.	平均值
小圆柱体	$m_0$ (g)					
	$D_0$ (mm)					
大圆柱体	$m_0$ (g)					
	$D_0$ (mm)					

2. 测量扭摆的扭转系数

(1) 测定金属圆柱体的转动惯量  $J_0$

实验次数	1.	2.	3.	4.	5.	平均值
$T_0$ (s)						

(2) 测定金属圆柱体上放置塑料小圆柱体的转动惯量  $J_1$

次数	1.	2.	3.	4.	5.	平均值
$T_1$ (s)						

(3) 计算塑料小圆柱体的转动惯量理论值  $J_{0\text{理}} = ( ) \text{ g cm}^2$  .

(4) 计算弹簧的扭转系数  $K = ( ) \text{ g cm}^2 / \text{s}^2$  .

3. 测定大圆柱体的转动惯量

(1) 测定金属圆柱体上放置塑料大圆柱体的转动惯量  $J_2$

实验次数	1.	2.	3.	4.	5.	平均值
$T_2$ (s)						

(2) 计算大圆柱体的转动惯量  $J_2 = ( ) \text{ g cm}^2$  .

(3) 计算大圆柱体的转动惯量理论值  $J_{2\text{理}} = ( ) \text{ g cm}^2$  .

(4) 计算百分误差  $E = ( ) \%$  .

**【思考题】**

1. 实验中，扭摆角度可以任意大小吗？

答： .....

2. 本装置主要误差来源有哪些？

答： .....

3. 其他说明和建议（选做）。

答： .....

指导教师（签名）： .....

成绩评定： .....

图 3 实时实验报告

## 4 基于 WIFI 的物理实验教学实时评价流程与亮点

### 4.1 物理实验教学实时评价过程

物理实验教学实时评价过程主要包括 7 个步骤，见图 4 所示。

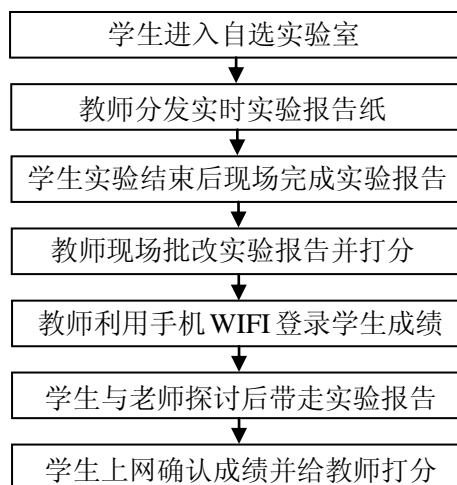


图 4 课堂评价流

新的实验评价系统使得教师可以一边指导正在做实验的学生，一边批改完成实验的学生的实验报告，一举两得。学生也可以现场获得老师的指导，并将错误的地方及时改正。由于



学生等老师批改好实验报告后能及时带走自己的实验报告,所以杜绝了其他学生抄袭实验报告的现象,真正做到了每位学生必须自己完成实验才能获取成绩。由于使用了实时实验报告,也基本消除了好学生得到的成绩不如差学生的情况。总之,这种方法增进了教师与学生的互动和交流,增加了完成实验的时效性。<sup>[15]</sup>

#### 4.2 物理实验教学实时评价系统的亮点

归纳起来,物理实验教学实时评价系统的亮点有如下几点:

1) 基于 WIFI 的物理实验实时评价体系提高了实验教学质量,充分利用了学校的资源,发挥了教师和学生的主观能动性。

2) 物理实验实时实验报告减轻了学生负担,提高了实验效率,消除了学生抄袭实验报告的不良现象。

3) 物理实验实时收发实验报告,去除了学生回寝室做实验报告和交实验报告两个环节,完全解决了以前实验报告到处乱飞的现象,也舒缓了教师批改实验报告的压力。

4) 学生实时完成实时报告使得学生缺课甚至逃课的现象基本消除,学生在实验室的时间大大延长,不再出现早退的现象,甚至出现了延长实验时间的现象,这是以前不可能发生的事情。

### 5 总结

基于 WIFI 实时实验成绩评价体系必须依托学校的资源,如果没有学校的无线网络建设,就无法实行,所以只能在有条件的学校进行推广。它的优点是非常明显的,即有利于学生,也有利于教师;即减轻了学生负担,提高了实验效率,又整顿了实验课程中出现的各种不良现象,解决了许多传统方法无法解决的顽疾。当然,任何事情都不可能是完美的,新的物理实验实时评价体系也将在不断实践中进一步去完善。

#### 参考文献:

- [1] 陈洪山, 陈水桥。从红外成像实验谈物理实验建设思想[J]。江西科学, 2005, 23(5): 645-648。
- [2] 刘燕, 周岚, 胡经国。大学物理实验教学改革的探索与实践[J]。实验室研究与探索, 2009, 28(11): 171-172。
- [3] 陈水桥, 陈洪山。物理实验研究性课题式教学方法的实现与探讨[J]。物理实验, 2008, 28(6): 18-21。
- [4] 张锐波, 沈剑峰, 杜金潮。大学物理实验创新教学[J]。实验室研究与探索, 2010, 29(1): 80-82。
- [5] 陈守川。大学物理实验教程[M]。杭州: 浙江大学出版社, 1995。
- [6] 陈水桥, 王鲲, 陈洪山。浅谈如何合理性选配和组建物理实验仪器系统[J]。物理实验, 2006, 26(8): 16-19。
- [7] 刘海霞。物理实验与培养学生创新能力的思考与实践[J]。实验室研究与探索, 2009, 28(7): 12-14。
- [8] 陈水桥, 等。打造创新型基础物理实验[J]。实验室研究与探索, 2013(4): 106-109。
- [9] 陈水桥, 等。研究型物理实验以内容为中心的站队式教学方法探索[J]。物理实验, 2011, 32(11): 19-22。
- [10] 陈水桥, 等。多元化物理课题实验课程的建设探讨[J]。实验室研究与探索, 2011, 30(12): 118-121。
- [11] 康颖。创新实验教学培养综合素质[J]。物理与工程, 2010, 20(3): 27-29。
- [12] 肖利, 李海波, 刘茂军。全面实施物理实验改革培养学生创新素质[J]。实验室研究与

- 探索, 2007, 26(4): 101-103。
- [13] 霍剑青, 王晓蒲, 汤家骏, 等。分层次的物理实验教学研究[J]。实验室研究与探索, 2009, 28(4): 232-235。
- [14] 朱鹤年。物理实验研究[M]。北京: 清华大学出版社, 1994。
- [15] 孙腊珍, 张增明。研究型大学物理实验教学平台建设的实践与探索[J]。实验技术与管理, 2008, 25 (10): 18-20。

## **Innovative Construction of a Real-time Evaluation System of Physics Experiment Teaching Based on the WIFI**

CHEN Shui-qiao, WANG kun, YIN li-ming, HE liang, WANG Zhou-yang  
(Physics Department, Zhejiang University, HangZhou 310027, China)

**Abstract:** The disadvantage of the traditional evaluation system of experiment teaching of the Physics experiment center of Zhejiang University was analysed. a new real-time evaluation system of physics experiment teaching was put forward. the experimental efficiency was Improved. the burden on Students was Lightened. the order of physics department was rectified.the praise of students was showed.

**Key Words:** WIFI; real-time evaluation system; real-time experiment report; physics experiment

# 大学物理实验仪器的配置和利用

叶树中

（北京工业大学 数理学院，北京 100124）

**摘要:** 国家对被评为国家级实验教学示范中心和省市级实验教学示范中心投资的力度逐年加大，如何引进，配置，利用新设备，新仪器是一个很有讲究的实际问题。我校数理学院物理实验中心被评为北京市级实验教学示范中心以来，积极构建现代化的实验教学体系、整合实验教学项目构建分层次的实验教学体系，引进并合理配置新型实验设备，使物理实验资源不断更新，完善，充实，为学生有效利用这些宝贵资源创造了必要条件。发挥资源优势和政策优势进一步提高教育教学实验水平，提高整体的综合实力。

**关键词:** 资源配置；资源利用；改革创新；服务于学生

## 1 引言

进入 21 世纪，在信息化，网络化，经济一体化的大潮中，科技水平高速发展，先进的生产力把人们从繁重的体力劳动中解放出来，人们对所从事工作用到的工具，设备，仪器的性能，技术含量的要求也在逐步提高，先进的工具，设备，仪器不仅把人们从繁重的体力劳动中解放出来，还能提高工作效率，解决教学，科研中的难题，推动整个社会不断向前发展。我校数理学院实验教学示范中心利用政策优势，与时俱进，对老，旧，过时的实验设备，仪器不断进行更新，改造，合理配置不同实验所需的仪器，设备，为学生创造出一个良好的硬件环境，并利用这些资源为实验教学，科研，创新实验以及最后出成果提供了必要条件。

## 2 资源配置

如何利用投资，配置物理实验仪器设备不是盲目进行的，除了力学，电学，光学传统项目外，更多的偏重于一些发展较快，用途较广的实验设备，例如：多媒体，光纤通信，计算机仿真，PASCO 等，仪器设备的购入数量和品种是根据本科实验教学中大学物理实验，中级物理实验，近代物理实验学生人数和使用频率的不同按比例进行配置的。传统光学实验中的棱镜摄谱仪被开放式光栅摄谱仪所取代，老式的棱镜摄谱仪在进行光谱观测和测量时手动转动股轮时误差较大，准确度不高，换成开放式光栅摄谱仪后，不但体积小，重量轻而且使用起来简单方便，易操作，易观察，数据准确度高，误差也大大减小，另外还新增了组合式多功能光栅光谱仪，其主要功能是将入射的复合光变成单色光射出，再通过光电采集送入计算机进行数据分析，也可以选加样品池进行精雕要求不高的样品透过，反射率测量，分光计在换成大口径望远镜以后，调节光路更加便捷，视场更宽敞，光路部分改为发光二极管使得视场更清晰更明亮，学生使用起来更加得心应手，几年来我们在资源配置方面作了大量工作，进行了有益的探索和尝试，取得良好效果。

## 3 资源利用

几年来，随着实验仪器设备的不断更新与完善，如何有效，合理使用现有资源也成为摆在我们面前的一大问题，对于单独设课的大学物理实验是每个学生必修的一门课程，从目前我校的实际情况来讲人员和实验仪器的配备比例是 1 : 1 : 30 : 30 以表格所示：

实验教师人数	实验员人数	学生人数	实验仪器
1	1	30	30

实验仪器每个学生一套,这种配置为满员满载状态,人力资源和物质资源得以充分利用。

由于我校的物理学实验开放教学是开通和采用了网上选课预约系统,实行网上预约是一种随机行为,经常出现的问题是某个被选择的实验只有一个学生,一个实验教师和一个实验员一大间实验室,几十台仪器服务于一个学生,与非开放实验相比,一旦出现类似问题,虽占据了同样的时间,同样的空间,同样的人力,资源配置明显失调,这就使实验室资源(人力资源和物质资源)不能充分利用,造成资源浪费。如何合理地解决此问题还需要进一步探讨。我们现在考虑是否可以按学生所学专业及兴趣的不同来划分,选择安排实验内容。例如:建筑专业的学生以选择力学实验为主,电子信息专业的学生以选择电学实验为主,某些学生也可以根据自己的兴趣爱好集中选择实验内容,即能满足学生的要求又能充分合理的利用实验室的人力资源和物质资源。

另外,对获得我校星火基金的学生来说,实验教学示范中心大力支持他们搞项目,搞创新,参加大学生物理竞赛,随时可以使用所有实验仪器,并单独给他们设立出一间创新实验室,创造好条件,实验资源得以合理,有效地利用,在2010年北京市大学生物理竞赛中我校学生获得一项一等奖,两项二等奖的优异成绩。

#### 4 坚持改革创新

随着科学技术的迅猛发展,以信息化,网络化,数字化为代表的高新技术目前占据了主导地位,高等院校的教育,教学,科研领域乃至各行各业都与之息息相关,所以在确定引入教学科研实验仪器设备上也要与当前科学技术发展的潮流相一致,除了一些基本的力学,电学,光学等传统的物理实验外,我校也不失时机地引入,补充,开发了光纤通信,仿真,全息照相,核磁共振,计算机模拟等实验,激发学生对新知识,新技术的浓厚兴趣,诱发他们的想象力,创造力,培养他们不断创新意识,把所学到知识真正用在实处。支持教学模式的多元化,激励教师与学生“教”“学”互动共同探索教学改革新途径,先进的仪器设备是搞教学,科研的重要因素,但不是决定因素,出成果的决定因素是人,不是物。所以,坚持改革创新摆正人与物的关系才是唯一出路。

#### 5 结束语

资源配置与资源利用在培养理论与实践相结合的现代化高素质人才中将发挥重要作用,在发展过程中会遇到各种问题,我们相信,经过不懈的努力和探索必将日趋完善,合理,充分发挥其独特作用。

#### 参考文献:

- [1] 浦其荣. 开放型物理实验的研究和探索[J]. 物理实验, 2005, 25(2).
- [2] 叶树中. 大学物理实验开放教学与资源配置[Z]. 北京工业大学教育研究通讯, 2005-4.

# 关于开设内光电效应实验的探索与思考

陈彪

(河北工程大学理学院, 河北邯郸 056021)

**摘要:** 本文重点介绍了开设以内光电效应为理论基础的半导体光电器件的重要性和迫切性。并详尽介绍了内光电效应的理论与半导体光电器件的分类和应用前景。

**关键词:** 内光电效应; 光电导; 光生伏特; 光磁电

## 1 引言

光电效应有内外之分, 外光电效应的内容在各种版本的物理教材中都有详尽的介绍, 以测量普朗克常数和外光电效应实验规律的物理实验仪器应有尽有, 学生对此也有相应的认识, 尤其是在应用技术方面更是如此。相形之下, 而内光电效应的内容和实验尤其是在非光学专业的物理教材中, 几乎均未曾提及, 学生对以内光电效应理论为基础的半导体光电器件的性能和应用更是一无所知, 而在高新技术突飞猛进—信息化时代的今天, 如此下去, 我们所培养的学生将不能够适应当前形式发展的需要! 为此我们认为有必要对我们非光学专业的学生进行加开或选作内光电效应的内容和实验。

## 2 历史回顾

以内光电效应为理论基础的半导体光电器件是随着半导体物理学和半导体工艺学的发展而产生和发展的。1839年培克雷尔(Becquerel)发现了光生伏特效应, 1883年夫利兹(Filts)研制出了第一个Se光伏特电池, 以后随着对半导体内光电效应的研究又相继研制成功了光敏电阻和其它探测器。1941年奥勒(Ohl)制出了第一个单晶硅光电池, 到上世纪五十年代, 在发展半导体器件工艺的同时, 又相继研制成功了光电二极管和光电三极管, 七十年代末, 以半导体光电器件为敏感元件的光学传感器已在好多领域广泛使用。与此同时, 光纤通讯、光纤传感已广泛应用于军事、国防工业、人造卫星等空间技术领域。

半导体光电器件经过一个多世纪的发展, 现在已广泛应用于国民经济、军事、科学技术等各个部门。在工业自动化、自动控制等方面, 光敏电阻、光电池和光电二极管等器件的应用占有重要地位。利用红外光电器件的红外探测、跟踪、遥感、遥测和红外成像技术在军事上有重要意义。太阳能电池为宇宙航行、空间技术提供了可靠的长期能源, 此外随着地球上石油、煤等能源的大量消耗, 太阳能的利用已提到了重要议程, 现在已得到广泛的重视。总之半导体光电器件在现代科学技术发展中占有重要地位。

## 3 思考与探索

既知半导体光电器件的应用如此重要与紧迫, 有必要对非光学专业的学生进行选修内光电效应理论和选作半导体光电器件应用的典型实验, 使之对内光电效应的一些基本观点和基本概念有个清晰认识, 对半导体光电器件应用的技术有一个全新的了解。

### 3.1 内光电效应原理

光电导效应、光生伏特效应和光磁电效应三者均为内光电效应。现分述之:

---

**作者简介:** 陈彪(1951—), 男, 河北省邯郸人, 河北工程大学理学院副教授, 从事物理教学及实验物理光电教学仪器的研究。

1) 光电导效应: 光电导效应是光电导探测器光电转化的基础。当半导体材料受光照射时, 由于对光子的吸收引起载流子浓度的增大, 因而导致材料导电率增大。这种现象称为光电导效应。材料对光的吸收有本征型和非本征型, 所以光电效应也有本征型和非本征型。当光子能量大于材料禁带宽度时, 把价带中的电子激发到导带, 在价带中留空穴, 从而使材料的导电率增大, 这是本征光电导效应。若光子能量激发杂质半导体中的施主或受主, 使它们产生电离, 产生光生自由电子或自由空穴, 从而增加材料导电率, 这种现象就是非本征光电导效应。材料受光照引起导电率的变化, 在外电场作用下就能得到电流的变化。

2) 光生伏特效应: 光照使不均匀半导体或半导体与金属组合的不同部位之间产生电位差的现象称为光生伏特效应。这种效应是基于两种材料互相接触形成内建势垒, 当光子激发后光生载流子注入到势垒附近就形成了光生电压。因为所用材料不同, 于是就有不同的 PN 结、PIN 结、金属与半导体的肖特基结和异质结等多种结构的光生伏特效应。

现以 PN 结为例分析光生伏特效应。当 PN 结受到光照时, 样品对光子的本征吸收和非本征吸收都将产生光生载流子。但是能引起光生伏特效应的只能是本征吸收所激发的少数载流子。因为 P 区产生的光生空穴, N 区产生的光生电子属于多数载流子, 都被势垒阻挡而不能过结。只有 P 区的光生电子与 N 区的光生空穴和结区的电子空穴对(称少数载流子)扩散到结电场附近时能够在内建电场作用下漂移过结。光生电子被拉向 N 区, 光生空穴被拉向 P 区。样品出于开路状态时结附近的 N 区积累着光生电子, P 区积累着光生空穴, P 为正 N 为负, 形成光生电压  $V_S$ , 光生电压方向与内建电场方向相反。此时, 若样品短路会在外电路形成短路电流, 这种短路电流就是光生载流子过结的电流。

### 3) 丹倍效应和光磁电效应

均匀光电导体当光激发不均匀时, 载流子密度也就不均匀。

a. 当某一单色光照射光电导样品时, 且样品的吸收系数  $a$  很大, 而使  $(1/a) \leq d$  ( $d$  为样品的厚度), 则过剩载流子出现不均匀分布, 从而产生扩散电流。当电子和空穴的扩散常数不同时, 存在有垂直于光照表面的内建电场, 即在前后表面之间产生光生电压, 这就是丹倍效应。

b. 丹倍电动势发生在载流子扩散方向上, 当均匀光照时横向(即平行与光照的方向)是不会有光生电压的。若在垂直光照的竖直方向上加一磁场, 此时沿光照方向流动的电子和空穴则受到洛仑兹力的作用, 空穴向上、电子向下, 于是在与光照垂直的另一方向就有一个光生电压, 若用导线短接外电路则有电流通过。该现象即为光磁电效应。

## 3.2 半导体光电器件的分类

就器件的物理过程来说, 有光电导型、光生伏特型和光磁电型三类, 分别利用了半导体的光电导、光生伏特和光磁电三种光电效应。

就器件的构造来说, 可分为均质型和结型两种。均质型半导体器件多利用光电导效应和光磁电效应, 最典型的器件是光敏电阻。结型半导体光电器件按结的种类不同又可分为 PN 结、PIN 结、异质结和肖特基结, 它们多做成光电池、光电二极管和多极管。

就器件的应用, 可分为换能器件和探测器件两种。换能器件着重于光能转换为电能, 最典型的器件就是太阳能电池, 评价这类器件的最重要的指标是转换效率。探测器件则着重于把光辐射信号转换为电信号, 其种类繁多。光敏电阻、光电池、各种类型的光电二极管都广泛应用于各波段的光辐射探测。评价探测器件的主要指标是光谱响应特性、探测灵敏度和它的调制频率响应特性。按照探测的辐射波长又可分为可见光探测器、红外探测器和紫外探测器等。

## 4 典型应用

### 4.1 光敏电阻

1) 光敏电阻的主要性能指标: 光谱特性、暗电阻、照度特性、温度特性、最高工作电压和允许耗散功率。

2) 种类: 按光谱特性和最佳工作波段划分有三种:

a.对紫外光(0.3—0.4 微米)灵敏的光敏电阻,主要用于探测和度量各种射线强度的 $\alpha$ 、 $\gamma$ 射线计量计和 $\alpha$ 、 $\beta$ 射线晶体计数管。

b.对可见光(0.4—0.76 微米)灵敏的光敏电阻,这类光敏电阻主要用于制造自动控制元件,如产品计数器、路灯控制器等以及安全保护装置和位移、液面等自动控制装置的光探测头。

c.对红外光(0.76—6 微米)灵敏的光敏电阻。主要用于科学研究和探测不可见目标。

3)派生器件

a.光电耦合器:它是将发光器件和光敏电阻构成光结合器件的总称,具有体积小、寿命长、无触点,抗干扰能力强,单向传输信号、能传输模拟信号和数字信号。一类用于光

隔离,另一类用于光传感器。

b.光电位器:用于位置检测的无接点电位器。

c.光桥。

3)应用

a.在电子电路中:电视机亮度自动调节、远距离自动切换和增益的自动切换。

b.在仪器仪表中:作照度计、浓度计、辐射高温计、检流计和比色计等

c.路灯的自动点燃和熄灭、汽车前灯的自动切换、浮标灯的自动点灭和自动报警。

d.照相机电子快门

### 4.2 光电池

1) 光电池的主要性能指标:

a.伏安特性

b.转换效率和最佳负载电阻

c.光谱响应

d.响应时间

e.温度特性

2) 种类: Se 光电池、GaAs 光电池和 Si 光电池三种

Se 光电池:适用于可见光的接收,但转换效率低,寿命短。

GaAs 光电池:光谱响应与太阳光谱吻合的好,但转换效率低。

Si 光电池:价格低廉、转换效率高、寿命长、易接收红外光是一种很有发展前途的器件。

3) 用途

a.用作光电探测元件,在气象、农业、林业等方面测量太阳光的辐射量;用于制造各种光电自动控制装置:如光开关、光阀门、光电比色计和光电高温计。

b.用作电源:作为一般能源补充,此时要求价格低廉、功率大;作为宇航电源,此时要求体积小、重量轻、转换效率高;作为一般民用电器的补充,要求价格低廉、体积小,不要求容量大。

4) 应用

a.颜色识别

- b.光电开关电路
- c.照相机用暴光表
- d.弱光检测
- e.比色高温计

#### 4.3 光电二极管

##### 1) 性能参数

- a. 伏安特性    b.最高工作电压    c.光电流    d.暗电流    e.光谱响应
- f.光电灵敏度    g.响应时间    h.结电容    i.指向特性    j.噪声特性

##### 2) 种类

- a. PN 结    b.PIN 结    c.异质结    d.肖特基结

##### 3) 应用

- a.光信号放大电路    b.光开关电路    c.转速测定仪

## 5 结束语

通过开设内光电效应选修课和自行设计、选作半导体光电器件应用的实验,无疑是对非光学专业的学生拓宽了视野、提高了动手能力、提高了分析问题解决问题的能力。但因课时有限,仪器有限还未能如愿将目前好多很有典型很有意义的实验全部开设出来。但我们深信所有选作我们这些实验的同学无疑都看到了新型光电器件的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 王君容, 薛召南. 光电子器件[M].北京: 国防工业出版社, 1982.
- [2] 潘天明. 半导体光电器件及其应用[M].北京: 冶金工业出版社, 1985.
- [3] 刘振玉. 光电技术[M].北京: 北京理工大学出版社, 1990.

## Exploration and reflection about setting the internalphoto effect

CHEN Biao

(School of Science, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China)

**Abstract:** This paper mainly introduces the principle of the internalphoto effect as well as the importance and urgency of the application of semiconductor parts. At the same time it illustrates the theory of the internalphoto effect in detail, the categories of semiconductor photoelectric effect and the prospect of the application.

**Key words:** internalphoto effect; photoconduction; photovoltaic; photo-magnetoelectric effect



# 基于网络环境的实验室教学管理体系建设

王素红

(信息工程大学 理学院 基础实验中心, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了提高实验室规范化的教学管理水平, 我校建设了基于网络环境的实验室教学管理体系, 解决了实验教学中设备、师资力量、课时不足等的困扰, 是激发学生自主学习热情、挖掘学生学习潜能、培养学生自主学习能力、培养创新型人才的重要保证。

**关键词:** 创新型人才; 教学模式; 自主学习; 信息化平台。

## 1 引言

实验教学是高等学校教学的重要组成部分, 是学生学习实验知识、提高实验技能、培养创新思维不可缺少的教学环节。为了更好地搞好实验教学, 加强教学管理, 优化教学环境, 提升教学服务, 完善教学监督和质量评估, 推动实验教学跨越式发展, 充分发挥实验教学在创新实践人才培养的优势作用, 切实提高实验教学效果和人才培养质量。

## 2 建设目标

实验教学是高等教育的重要领域, 是培养学生实践能力、探究精神、创新能力的主要平台。

实际教学中, 由于实验实和师资力量等限制, 很难提供给学生大面积实验预习的环境, 使学生无法对实验环境建立直观认识; 由于教学时间和手段限制, 教师也无法有效的对学生的预习情况进行有效检查。这样导致实验教学中长期存在“走过场”, 严重影响了教学质量的提高。

项目建设以实验教学改革为核心, 通过实验教学过程化管理系统的支撑, 改革传统的实验课程教学模式, 对学生预习、选课、考勤、实验过程、实验报告自动评阅、师生交互答疑等环节实施高效、科学的管理, 创建适应学生自主学习的教学环境, 切实提高实验教学效果、教学管理与服务水平; 以能力培养为主线, 将实验项目面向学生全面开放, 满足各层次各类别的学习需求, 实行教师指导下的学生自主实验, 努力培养学生学习能力、实践技能和创新思维。

在此基础上, 以开放式实验室的建设为试点, 通过信息化手段开放教学资源, 深化实验教学的管理, 建设培养学生自主学习和创新实践能力的教学环境, 实现面向大面积学生开设开放式实验教学, 以满足学生日益高涨的自主学习和个性化发展的需求。

## 3 统功能介绍

### 3.1 教学管理及选排课系统

开放性实验教学是实施以学生为主体、教师为主导的教学理念和教学方法的有效途径。开放性实验教学是指实验的内容、实验教学的时间和空间对学生开放。学生可根据各自的实验基础、感兴趣的领域, 自主安排时间到开放实验室完成实验。开放性实验教学从教学内容、教学时间和空间上给了学生充分的自主性, 充分满足了个性化教学的需要。

利用系统, 可以在现有师资力量的前提下, 通过允许学生自主选择实验内容、自主选择上课时间, 提高实验教学的开放性。同时, 又通过人性化的统计分析功能, 实验课程管理员能够容易掌握学生上课的动态信息, 防止教学过程中学生乱选课、少选课等情况发生, 保证教学秩序的正常进行。

### 3.2 实验预习系统

实验预习不仅要求学生掌握实验理论，而且要求学生初步掌握实验仪器、操作和实验方法。实验预习的结果可作为真实实验前的资格审查依据，应用于实际教学和开放式教学中。

由于实验实和师资力量等限制，很难提供给学生大面积实验预习的环境，使学生无法对实验环境建立直观认识；由于教学时间和手段限制，教师也无法有效的对学生的预习情况进行有效检查。这样导致实验教学中长期存在“走过场”，严重影响了教学质量的提高。

物理实验预习自动评判系统，采用计算机虚拟现实技术，在《大学物理仿真实验》的基础上，进一步加强虚拟实验的模型设计，建设与理论考试相结合的在线实验预习环境，用仿真实验替代了学生按书本抄写实验步骤、实验原理的过程。促使学生完成一个完整的学习链过程，保证大面积实验教学质量的提升，同时大大减轻了教师批改预习报告的工作量。

### 3.3 实验报告自动评阅系统

实验报告的完成评阅是实验教学中的一个重要环节。实验报告体现出学生的数据处理、分析、综合思考和创新能力。教师通过评阅报告，了解学生对实验的理解、发现、总结教学中的问题，针对性的调整教学方案。

在大面积的实验教学中，存在教师人数有限、报告评阅工作量大、报告评阅质量不高的问题，严重的影响了实验教学的质量和水平的提高。

实验报告自动评阅系统采用数据处理自动评判、分析总结人工评判相结合的方式完成评阅。在保证报告评阅质量的基础上，提高了评阅效率，为提高大面积实验教学质量水平提供了有效的工具和方法

### 3.4 开放式实验室管理系统 WEB

开放式实验室需要承担计划内教学（上课时间段）和计划外教学（开放时间段）两项任务。全面开放了实验教学资源，提供开放式教学服务，实现学生自主选课、自由预约、自主实验，充分发挥学生的主动性，激发学习热情。

### 3.5 开放式管理系统—派位、考勤、电源管理

学生可通过网络或到实验室内的派位机实现电脑预约派位，学生进入实验室后到预约台位实验。派位机与式远程电源控制终端联动，派位机在刷卡通过设备控制器对相应设备供电；记录学生的使用记录，自动的提交到管理服务器，生成实验项目、学生、仪器设备使用记录等原始的统计资料与依据。

通过建设，逐步构筑具有先进设备和先进管理机制的实践教学过程化管理体系，实现教学全过程动态管理，促进教学改革与发展，彻底扭转当前实验教学处于相对薄弱地位的局面。

# 一种新型综合设计性实验系统的研制和应用

韩力, 卢杰, 曲延吉, 刘铁成  
(吉林大学物理实验中心, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 提出了一种综合设计性实验系统全新的设计思路。该实验系统采用了多项独创的实验技术和测量方法, 将力、电、光多个实验内容融合成一个完整的实验项目, 非常好的体现了实验的综合性和设计性。介绍了实验系统装置和在实验教学中的应用情况。由于该实验系统采用了组合式的设计理念, 可根据需要非常容易的实现两个不同难度实验平台的自由转换。

**关键词:** 新实验仪器设计; 综合性实验; 设计性实验;

## 1 引言

众所周知, 拥有先进教学理念的高水平综合设计性实验, 是衡量高校实验教学改革取得突破性进展的重要标志, 是培养高质量创新型人才的重要手段和途径之一, 也是提升学校在国内一流大学实验教学所处地位, 体现实验教学核心竞争力和实验教学质量的重要观察点。因此, 研制具有全新实验设计理念和独创性的高水平综合设计性实验系统, 开展与之相适应新的实验教学方法研究工作将具有十分重要的意义。

基于以上重要性, 近些年来, 国内各高校通过提供政策和资金的支持, 纷纷加大了这方面研究力度, 投入大量的人力和物力, 开展和推进新的综合设计性实验方面研究工作, 取得了一些令人可喜的进展<sup>[1-3]</sup>, 开设出一些新的综合设计性实验<sup>[4-5]</sup>。但在研制具有特色和创新的实验仪器, 开展相应的实验教学方法改革方面有进一步提高的空间, 取得跨越式的进展还需付出更大的努力。目前, 在各高校开设的综合设计性实验中, 其实验综合性一般体现在测量手段和技术上的简单叠加, 综合设计性实验课程大多是由一些实验内容相互独立的若干实验堆积组成, 彼此之间实验内容缺乏整体性内在有机联系, 特别是在力、电、光实验内容相互融合与整体综合运用方面还很不足。从某中意义上说, 这样的实验没有充分体现其综合设计性, 在培养学生综合设计实验能力方面作用不大。

近年来, 在多年从事实验教学改革工作基础上, 我们物理实验中心在研发新的综合设计性实验仪器方面, 开展了大量探索和尝试工作, 取得一些成果和经验, 在综合设计性实验的思路和实践方面取得了进展, 提出了一套特色鲜明、理念先进的综合设计性实验研发新思路和实验教学新模式。在 2013 年葫芦岛东北三省物理实验教学研讨会上, 本文合作者刘铁成教授作了题为“综合设计性实验的探索和实践”的专题发言, 介绍了我们研制综合设计性实验系统的新思路和实验教学实践的情况, 引起了与会者的广泛关注。最近, 该实验仪器系统的研制工作取得重大进展, 在学校新仪器研制重点项目的资金支持下, 实现了该实验仪器系统的产品化, 其中在综合设计性实验系统中采用的多项仪器装置的设计和新测量技术的发明专利申请已被受理, 目前已尝试性应用在本科生的综合设计性实验教学实践中。

## 2 实验系统的设计思想和装置介绍

该实验系统的最初设计思想源于本文作者在 2011 年承担全国中学生物理奥林匹克竞赛

---

**作者简介:** 韩力(1962—), 男, 吉林长春人, 吉林大学物理实验中心副教授, 长期从事物理实验教学工作。

的实验命题工作。作为物理实验命题组成员，为提交一个令人满意的，能够代表全国实验竞赛水平的高质量命题，历经近一年时间对实验方案的反复推敲和研究设计，通过对以往命题的特色和优缺点的大量分析研究，决定在实验的综合设计性和考试形式上做大胆的尝试，提出了将大学物理实验中的多个典型力、电、光实验内容融合成一个综合设计性题目：《测定细钢丝材料的杨氏模量、电导率和测量系统中光学元件的参数》。

由于实验仪器系统中多处设计采用了全新实验技术和测量方法，新实验与其它已有的传统实验有了很大的不同。要想最终得到实验测量结果，需要确定一系列系统参数，通过实验装置的特殊设计，使各个系统参数的测定形成一个数据链条，将众多实验内容连成一个整体网状结构。整个实验内容的完成，将涉及到力学的杨氏模量实验和电学的低电阻测量，光学实验部分涉及几何光学和应用光学的实验内容。

实验的综合设计性具体表现在对实验方案的选择、实验流程和实验方法的设计，以及分析实验内容彼此之间联系方面。最终依据该思路设计的实验仪器系统的实验命题，完美的将实验内容的综合设计性淋漓尽致的表现出来，在全国中学生物理奥林匹克竞赛中达到了预期效果，实验考试题目得到许多高校实验竞赛带队教师和考生的高度评价，也得到了国家命题专家组北京大学物理系，长期从事物理实验教学工作的资深教授吕思华先生的赞许和认可。

本文介绍的新实验系统就是在此基础上，重新进行了九处重大的创新和改进，使实验内容综合性更加充实、设计性更强，实验内容的覆盖范围和实验设计难度有了大幅度的提高。学生一般需要 25 个学时以上的时间，才能最终完成这个大型综合设计性实验所有实验内容。利用这个综合设计性实验平台可独立开设一门小型综合设计性实验课程。

CCY\_LDG 型综合设计性实验系统装置如图一所示，整个实验仪器由力、电和光三部分实验测量子系统组成：

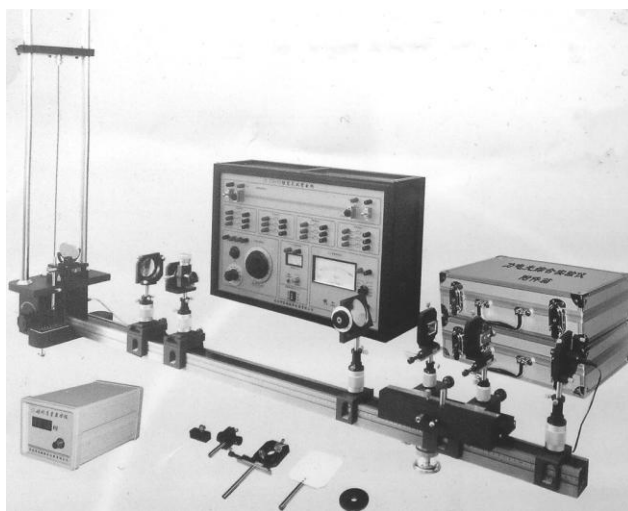


图 1 综合设计性实验系统装置图

力学测量部分为全新设计的改进型数字式杨氏模量仪，用于完成细钢丝材料的力学参数测量。由于在实验测量中使用了全新的技术路线和测量方法，新型仪器与传统的测量仪器相比做了多处改变，用特殊设计的可连续精确改变受力的数显装置，替代了传统的用增减砝码改变受力烦琐方式；考虑到综合设计性的要求，将其连接到光学导轨上与相应光学测量系统的连接，保证与光学实验内容的融合；光杠杆采用 45 度固定角度，测量方向采用垂直向上的方式，大大减小了实验占用空间；连接电学测量系统部分采用了特殊设计的绝缘接线装置，用来完成细钢丝材料的电学参数测量。

光学测量部分由以下多个测量子系统集合而成：双棱镜干涉激光波长测量装置、细丝直

径的衍射测量实验装置、用于提供测量目标的光栅衍射装置、激光准直与几何光学实验测量装置、自组装式望远测距装置及若干附件。光学测量系统只有与力学测量系统相结合,在给定的实验条件要求下,才能完成细钢丝材料的杨氏模量的测量。

电学测量系统是由电源、检流计、若干标准电阻箱、标准钢丝样品、精密可调电阻箱等集合而成。使用者可自行连线组成双臂电桥,采用四端接入方式与杨氏模量仪连接,实现对细钢丝材料的低电阻和长度的测量。

### 3 在实验教学中的应用

从2013年9月开始,该实验系统作为一个全新的综合设计性实验平台,已正式应用在我们物理实验中心的普通物理综合设计性实验课程中,此实验课程是为物理专业高年级学生开设的一门高级物理实验。为了更好的、高效发挥这个综合设计性实验平台潜力,利用好其所提供的实验条件,我们还尝试开展了一系列与之相匹配的实验教学改革工作:

1) 改变以往原有陈旧的实验教学模式,即教师事先排好实验、规定实验内容和实验方法,学生按照实验教材要求被动实验的状态,建立一个以学生为主、教师为辅的自主设计、开放研究式的实验教学新模式。实验中不给学生提供相应的实验教材,学生通过阅读仪器使用说明书和实验任务书,根据实验系统提供的器材和实验要求,自己查找相关的实验资料,自行拟定实验内容和实验计划流程,给出相应的实验测量原理,设计切实可行的实验方案和实验步骤,着重培养学生的独立自主学习能力。

2) 本综合设计性实验平台提供多项新的实验测量原理和测量方法,着重培养学生的实验综合设计能力。由于实验系统结构设计采用了以力、电、光系统参数测量为主线,将与此相关的重多实验内容有机联系在一起,形成具有一个复杂网状结构的大型综合设计性实验,实验的复杂性和实验难度较大,学生一般需要累计不少于26个学时才能最终完成实验。为适应学生对实验时间和实验内容的碎片化要求,实验室将对学生全面开放,学生可自由选择实验时间完成相应的实验内容,利用综合设计性实验平台最终独立完成所有的实验内容。

3) 为方便学生实验、提高仪器的使用效率和实验教学管理需要,必须建立一套多功能实验教学电子管理系统,利用该实验教学网络和视频管理系统,对学生的实验情况进行动态管理。它应具备以下一些功能:学生的实验时间和实验项目内容的预约;实验室进入和离开时间的记录;学生实验情况全程实时视频记录;学生在完成本次实验离开前,需在计算机网络上填写本次实验工作日志,以便用于自己和教师随时备查;由于实验室现场采用全天候无教师值班的管理模式,该系统还应具备类似QQ功能的网络在线呼叫和答疑功能,以便学生与教师随时沟通。

4) 学生实验前需查找收集相关资料,自己设计实验方案,制定实验进度和工作计划,做开题报告,实验方案经过论证合格后,才能进入实验室开始实验。

经实验教学管理系统记录确认,学生在实验室的实验时间必须达到总课时要求的百分之七十五以上。学生平时实验情况将由实验课程管理系统的视频监控和实验进程登记管理系统记录备案,作为学生实验成绩评定的重要依据。

实验完成后,学生需提交8~10页论文形式的纸制打印和电子文档实验报告各一份,申请实验成绩优秀的学生需进行最后的答辩过程。

5) 实验成绩采用评定实验方案设计、平时实验情况与最终论文和答辩相结合的方式给出。实验设计方案占20%,平时实验情况20%,小论文形式的实验报告50%,答辩情况10%,满分100分。

### 4 结论

通过该实验装置在实验教学中近一年来的实际应用,随着在实验教学活动中经验的不断

积累, 我们对该实验系统的性能和特点初步给出以下几方面结论:

1) 由于该综合设计性实验系统采用测量材料的力、电、光特性参数测量数据链的设计思路, 将彼此相关的多个实验内容联系在一起, 组成了一个大型的物理综合设计性实验项目, 用一套实验可完成力、电、光共 9 个实验内容, 因此, 仪器使用效率和性价比较高。

2) 实验系统采用了多项全新的结构设计和实验测量方法, 将所有实验内容很好的结合在一起, 较好体现了实验的综合性和设计性。

3) 教师可在实验前给定一部分实验系统参数, 实现不同难度的实验平台(基本型和高级型)之间的自由转换。通过采用不同实验难度类型的平台搭配, 可以适应不同年级和专业学生的需要, 使本实验系统在实验教学中具有非常大的灵活性和适应性。

4) 该实验仪器将不同实验内容方法综合在一起的独特设计, 使实验不同阶段的流程和方案之间存在密切的相关性, 对学生选择合理的实验流程, 确定各项实验内容的先后次序提出了更高要求, 突出了实验的综合设计性, 强化学生创新能力和综合能力的训练。

5) 实现了由指定、单一的实验内容和教学方法向自主设计研究型、多学科交叉综合型的实验教学新模式的过渡。有利于提高学生提出问题、分析问题、解决问题和理论联系实际的能力的训练, 将对提高综合设计实验课程的教学水平发挥重要作用。

#### 参考文献:

- [1] 郑鹤松。大学物理设计性实验的教改实践与思考[J]。实验技术与管理, 2004, 21(5): 101-107。
- [2] 刘竹琴, 刘艳峰。设计性实验教学探讨[J]。实验技术与管理, 2005, 22(6): 97-99。
- [3] 周殿清。普通物理实验中综合性、设计性实验的开设[J]。物理实验, 2005, 25(1): 31-33。
- [4] 张锐波。大学物理实验项目的系统设计[J]。大学物理实验, 2003, 16(2): 84-86。
- [5] 沈元华。设计性、研究性物理实验介绍[J]。物理实验, 2004, 24(2): 33-37。

## Development and Application of New Comprehensive Design Experimental System

HAN Li, LU Jie, QU Yan-ji, LIU Tie-cheng

(Experimental Physics Center, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** It has proposed a new way to develop a comprehensive design experimental system. A number of original experimental techniques and measure methods have been used in the experimental system, integrating several experimental contents, including force, optical and electric, into a complete experimental project. The properties of comprehensiveness and design in the experiment have been shown very well. The device and the situation of applying also have been introduced in this paper. In addition, this experimental system adopted an associated concept, which means the free conversion between different experimental platforms can be easily realized as needed.

**Key words:** New experimental instrument design; Comprehensive experiment; Design experiment

# 建构缄默知识, 提升创新能力

——《大学物理实验》课程的实践

何焰蓝<sup>a</sup>, 陈旭灿<sup>b</sup>, 彭刚<sup>a</sup>, 于晓燕<sup>a</sup>, 刘一星<sup>a</sup>, 马奇奇<sup>a</sup>

(国防科学技术大学 a. 理学院; b. 训练部, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 实践是培养创新能力的重要环节, 缄默知识是创新能力的基础。《大学物理实验》是理工科院校的一门公共基础实践课程, 在实践教学中用建构主义理论构建学生的缄默知识, 可以有效地提升学生的创新能力。

**关键字:** 创新能力; 缄默知识; 建构主义; 物理实验

实践是引发创新的动力源泉, 人的创新活动必须根植于实践。培养创新人才, 必须充分发挥实践育人对创新能力培养的重要支撑作用<sup>[1]</sup>。实验课程不仅是培养创新能力的重要基础课程, 其实践过程也是培养学生掌握科学思想、基本技能和方法的过程, 是加深知识理解、学会知识应用的过程<sup>[1]</sup>, 是通向创新的桥梁。《大学物理实验》课程的学习是学生在大学接受系统实验方法和实验技能训练的开端, 是其他学科科学实验的重要基础, 必然担负培养与科学发展、社会进步相适应的人才的重要责任。

但长期以来, 《大学物理实验》课程由于是公共基础课, 学生人数众多, 教学流程有批量生产的痕迹, 通常采用如下的教学模式: 检查学生的预习报告→教师授课(介绍实验目的、原理、步骤、仪器设备、注意事项, 并且演示操作过程)→学生实验→教师巡视辅导→教师检查数据→清理仪器→完成实验报告。

这种模式以传统教学论为基础, 强调对知识的传授, 表现出知识传承效率高的优点。但是这种模式下的教学, 教师往往处于教学中心的地位, 是实验知识的传播者和灌输者, 而学生的任务就是要消化、理解教师讲授的内容, 学生被看作外部刺激反映的被动接受者, 成为前人知识与经验的灌输对象。这种“言传身教”“填鸭式”的教学方法忽略了学生的主体地位, 忽视了学生认识过程的主观能动性和创造性。这种教学模式长期潜移默化的影响, 势必影响学生创新能力的培养, 不利于学生探索能力、创造力和学习内在动机的提高。

## 1 缄默知识是创新能力提升的土壤

有学者断言: “在通往成功的道路中<sup>[2]</sup>, 缄默知识的作用远远大于显性知识”。缄默知识理论是由英国著名的物理化学家和思想家波兰尼提出的。在其 1958 年出版的《人的研究》一书中, 首次明确提出“缄默知识”的概念, 并在其随后的著作中系统阐述了缄默知识的逻辑性质, 尤其是深刻地阐述了这种知识对于科学和其他社会实践的重要价值, 并将缄默知识理论的研究逐渐扩展到社会科学的若干学科领域<sup>[3]</sup>。

### 1.1 缄默知识的蕴涵

缄默知识是相对于显性知识而言的。波兰尼指出: “人类有两种知识。通常所说的知识是用书面文字或地图、数学公式来表述的, 这只是知识的一种形式。还有一种知识是不能系

---

**项目资助:** 国防科学技术大学教育教学研究课题(U2012003); 中国高教学会, 2013: “十一五”国家级实验教学示范中心建设与发展分析; 中国高教学会, 2013: 对精品资源共享实验课程之“共享”特征的研究及建议。

**作者简介:** 何焰蓝(1962-), 女, 四川南充人, 国防科学技术大学理学院教授。

统表述的,例如我们有关自己行为的某种知识。前一种知识称为显性知识,后一种知识则称为缄默知识。”

缄默知识本质是一种理解力,是一种领会。心灵的意会在人类认识的各个层次上都起着主导性的决定作用,缄默知识是人类获得知识的终极能力。显性知识必须以缄默知识为基础,被意会地理解和运用。因此,“所有的知识不是缄默知识就是植根于缄默知识<sup>[4]</sup>”。

## 1.2 缄默知识与创新能力的关系

缄默知识往往比显性知识更宝贵、更能创造价值<sup>[5]</sup>。

在缄默知识“认知维度”上,灵感等缄默知识具有创造性思维的特征和性质,创造性思维不仅是创新的必要条件,而且具有创新的功能。在缄默知识传递与人才创新能力的培养之间,思维是知识向能力转换的关键环节<sup>[6]</sup>。人的一部分缄默知识内涵着创新能力,成为创新能力培养的土壤;另一部分缄默知识就是对创新能力的表述。技能层面的缄默知识,其每一步提升就意味着创新能力的提升。

## 2 教学中用建构主义理论构建缄默知识

波兰尼在研究缄默知识的时候曾注意到它与教学的关系,非常重视缄默知识在教学过程中的作用。显性知识主要通过教学活动传递,并且显性知识的传递只有通过缄默知识的应用才能获得成功。波兰尼指出,教学活动只有以这种缄默的“潜在知识”为基础,才能使师生双方意识到自己的“理智的力量”。

教育的功能在于形成缄默知识,知识和能力的培养最终是否有效,取决于对学生缄默知识的影响。这标志着教育是知识与个体经验的结合,从而转化为能力的过程。让学生不自觉地在文化知识、情感、道德以及知识的创新等方面受到教师或教学内容的感染和积极影响,增加其缄默知识,推动学生个人全面素质的发展。

构建学生缄默知识的最佳教学理论我们认为就是建构主义理论。

建构主义是行为主义发展到认知主义以后的进一步发展,是西方教育心理学的最新教学理论。建构主义是一种学习的哲学,其理论包含了一系列对于知识、学生、学习活动与学习环境、教学及评价等方面的基本观点<sup>[7]</sup>。建构主义从独特的视角出发,在学习和学习者方面提出了与传统观点有本质区别的认识。

### 2.1 建构主义学习观

建构主义强调学习者的经验。学习者原有缄默知识是学习意义获得的基础,原有的缄默知识因为新的显性和缄默知识的进入而发生调整 and 改变。

建构主义注重以学习者为中心。学习不是被动地接受信息刺激,而是主动地建构意义,这种建构不可能由他人代替。学习不是由教师把显性知识简单直接地传递给学生,而是由学生自己理解建构和转化缄默知识的过程。

建构主义注重创造真实的冲突的学习情景。建构主义学习理论认为“情境”、“协作”、“会话”和“意义建构”是学习环境中的四大要素。显性知识根植于缄默知识之中,知识的意义总是存在于情境之中,在“同化——顺应”中循环往复,“平衡——不平衡”中相互交替。人的认知能力的发展,就是这样的一个过程。

建构主义注重互动的学习方式。知识,特别是缄默知识是学习者与他人经由磋商并达成一致的社会建构,因此,科学的学习必须通过对话、沟通的方式刺激学习者反省、思考,在交互质疑辩证的过程中,以不同的方法解决问题,澄清疑虑,逐渐完成知识的意义建构。

### 2.2 建构主义教学观

教学不能无视学生的经验,而应该把学生现有的知识经验作为新知识的生长点,引导学生从原有的知识经验中建构出新的知识经验。建构主义认为,教学就是要努力创造一个适宜的学习环境,使学习者能积极主动地建构他们自己的知识,在“学”的过程中实现显性知识和



缄默知识的有机结合和相互转化。

### 3 建构主义在《大学物理实验》教学中的运用

《大学物理实验》这一基础性实践课程的重要意义不言而喻，为了解决传统教学中存在的弊端，我们将建构主义理论引入教学。

#### 3.1 转移教学中心

以学生为主，采取研讨方式，还实验授课环节与学生。

具体流程如下：预备阶段（学生分组课前预习）→学生研讨（以案例实验为主线）→教师点评并进一步讲解一些要点→学生实验→教师巡视并与学生实时交流→教师检查数据→清理仪器→完成实验报告。

在还“授课环节”于学生的过程中，调动学生积极性促使其自觉有效地进行预习。学生自主预习的过程实质上也是一种知识的融合过程，即显性知识转化为显性知识的过程。学生的知识体系中存在着缄默知识和显性知识，在预习和查阅资料的过程中，融合基本上是信息的加工处理<sup>[8]</sup>，是一种将显性知识转化为更为复杂的、系统的显性知识的过程；是将概念系统化到一个知识体系的过程；是将不同显性知识收集起来，进行筛选、补充、分析、组合等工序产生新知识的过程；是一种知识扩散的过程，即知识在不同层次、不同领域渗透、整合；是各种显性知识有机结合的过程。

在还“授课环节”于学生的过程中，以学生为主的研讨模式使得学生能将头脑中零碎的知识进行融合并用逻辑化的语言表述出来，以促使其个人知识上升为显性知识，并为更多人共享，从而创造更大的价值。

此外，个体学生之间所具备的显性和缄默知识体系较教师而言彼此更加接近，因此学生通过预习在构建自身的知识体系基础上，用逻辑化的语言表述出来的东西，更加贴近学生所具有的最新发展区，其“频率”也更加接近学生知识结构的“共振频率”，易于促使学生内部缄默知识处于激活状态。

#### 3.2 建立学习共同体

隐性知识的载体是科学共同体。师生、生生间缄默知识的流动、转移和分享是显性化的重要条件。教学中，一个实践班（不超过 30 人）按学生意愿划分为若干小组，每一个小组是以个体学生为单元的学习共同体；几个小组（一个实践班）又分别以小组形式、或个体形式与教师之间再形成一个新的共同体，且整体循环于实验教学体系中（由若干个案例性实验有机而成的教学体系）。

这种共同体的层次递进关系可以在不同时空更有效地发挥作用。以小组为单位的预习功能前面已经做过相应的阐述，从缄默知识和显性知识的建构与转化过程来看，学生可以分享其他成员对实验思想、原理等的理解与认识，这个认识的过程必然比单个个体所建构的知识体系有效。

课堂上学生以案例性实验内容为主线进行的研讨活动，一方面，可以使学生相互交流并发生思维火花的碰撞，相互启发，相互补充，每个学生都能从不同的思维方式和思想中得到启迪，从而产生新的思想，而在实验过程中，可以直接学到其他学生的技能特长；另一方面，学生在表述自己观点和回答学生质疑的过程中，需要清晰明白的交流思想和看法，需要分析其他学生的看法与自己看法的相似或不同，寻找理由以批驳那些他认为不对的观点，对不明确的地方提出质疑并共同讨论，这就要求他们必须直面自己浅层次的认识，要求他们更好地掌握已学习的内容并去做充实意义的添加、建构或生发，从而对问题加以深入思考。

缄默知识的传递中很重要的一个途径就是师徒制，但在基础物理实验的教学中，我们更关注的是教师的引导作用。具体表现在学生集中研讨环节中的适时引导、研讨完后的点拨以及学生实践过程中的巡视和创造知识建构中的关键节点。

缄默知识显性化后,常常归为知识、思想方法和情感态度价值观等方面,这些内容对学生而言是“新”的,需要进一步统整和提升。在学生独立反思且交流互动之后,再由教师汇总并进行提升讲解。缄默知识是个人知识,课堂中主要是针对学生缄默知识显性化,而这些学生缄默知识对教师来说则往往是显性知识,因此教师可以与学生进行深层次对话,为学生的显性化活动提供引领和提升服务,最后以语言、符号较为规范地表达出来。

### 3.3 抓住交替转折点

学生在实践中,不仅可以使原有的缄默知识得以显性化,同时可以形成更多的缄默知识,从而促进其对物理实验知识的学习。

缄默知识的显性化不是都能事前预设的,因而随机的缄默知识显性化也是必要的。对能进入教学实践环节的、学生群体的缄默知识显性化往往是预设的,而对教学实践中偶然发生的、学生个体的缄默知识显性化则往往是随机的。随机的缄默知识显性化,是在实践进行中,在教师巡视并捕捉到有价值的缄默知识运用时,师生立即抓住它并对其进行研究的过程和结果,因而随机缄默知识显性化的关键在于“抓得住”课堂中缄默知识的运用节点。缄默知识运用时,表现的是不经逻辑过程而直接迅速地认知事物的思维活动,也就是直觉思维活动。而直觉运用与逻辑思维方式是相互补充的:逻辑思维是以一次前进一步为特征的,其中的步骤是明显的、能说明的,而直觉运用是不经过逻辑操作而跃进地、简捷地获得答案,问题的解决往往是通过直觉获得答案,然后再运用逻辑思维进行检验,两者交替着进行直到问题解决。因此,要抓住的就是交替的转折点,即节点[9]。在课堂教学过程中,敏感地判断有价值的节点,抓住它,马上调整教学进程,以刚刚发生的缄默知识运用为对象进行讨论,一起展开刚才运用缄默知识时处于压缩或者模糊状态的思维过程。这种展开工作则既能使缄默知识部分显性化,也能养成追问“怎么想到的”缄默知识显性化的习惯。

### 3.4 评价与发展

建构主义还有一个重要的教学观,就是效果评价。

实时评价:学生研讨中,教师的适时引导和研讨后的综合点评可以属于这一类评价;过程评价:教师对实验过程中,学生解决问题的能力、所发现的新的有价值的或者错误的操作方式等的点评;总结评价:教师对学生实验报告等的综合评定等。

### 参考文献:

- [1] 杨学军。“加强实践动手能力培养 改革创新人才培养模式”[J]。高等教育研究学报,2013(1):4-7。
- [2] 上官子木。“隐性知识教育缺失的代价”[N]。中国教育报,2008(12)。
- [3] 张健,等。“缄默知识理论视阈下的‘实践育人’观”[J]。辽宁教育学院学报,2011(2):38-41。
- [4] 迈克尔·波兰尼。个人知识:迈向后批判哲学[M]。贵阳:贵州人民出版社,2000:87-95。
- [5] 赵士英,洪晓楠。显性知识与隐性知识的辩证关系[U]。自然辩证法研究,2001,(10):20-23。
- [6] 王坚,等。基于知识与能力链接的思维[U]。苏州大学学报(工科版),2009,(2):78-80。
- [7] 张瑞君。在建构主义学习理论指导下进行探究性物理实验教学的策略指导[J]。考试周刊,2011(7):154-155。
- [8] 尹琼芳,等。缄默知识与显性知识的转化及其在教学中的作用[J]。湖南科技大学学报(社会科学版),2007(11):120-124。
- [9] 周文良,等。根植缄默知识以促进深度体验[J]。全球教育展望,2012(10):24-29。

## Construction of tacit knowledge and enhancement innovation ability

### ---Practice of "College Physics Experiment"

He Yan-lan<sup>a</sup>, Chen Xu-can<sup>b</sup>, Peng Gang<sup>a</sup>, Yu Xiao-yan<sup>a</sup>, Liu Yi-xing<sup>a</sup>, Ma Qi-qi<sup>a</sup>

(a. College of Science; b. Department of education and training, National University of Defense  
Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Practice is an important foundation to train innovation ability. Tacit knowledge is the premise of innovation ability and which built using the constructivist theory can improve effectively the innovation ability for students. The method was adopted to teaching practice of "college physics experiment" which is a public fundamental curriculum.

**Key words:** Innovation Ability; Tacit Knowledge; Constructivist theory; Physics Experiments

# 依托国家级实验教学示范中心平台 提高创新能力的培养

戴心锐, 韩 忠

(重庆大学 物理学院, 重庆 400030)

**摘 要:** 重庆大学物理实验中心教学团队以国家级实验教学示范中心为平台, 以拓宽学生知识面为目的, 开展多种形式的教学改革, 在创新教学手段、开展实践育人等方面走在了全国的前列。

**关键词:** 国家级实验教学示范中心; 物理实验; 创新; 实践育人

重庆大学是国家“211 工程”和“985 工程”建设的教育部直属重点大学, 重庆大学物理实验中心依托这两项重要工程的建设, 尤其是被确定为国家级实验教学示范中心建设单位后, 在学校的大力支持下, 实验设施不但上了台阶, 而且实验形式, 实验内容也有较大的创新, 重庆大学物理实验中心教学团队在教学改革、科研转化教学等方面做了大量的工作, 该教学团队以高水平的科学研究为源泉, 形成了具有一定特色的物理实验教学团队。

重庆大学物理实验中心教学团队将科学研究精神融入物理实验教学, 针对问题或现象, 设置与物理学有关的科研课题, 并将其科研成果转换成可用于教学的实验仪器, 所研制的科研成果中多项获得国家发明专利, 并在全国高校自制教学仪器展评中获奖。

重庆大学物理实验中心教学团队在国家级实验教学示范中心建设中, 针对当代大学生具有创新意识, 渴望在学习中产生新思想, 释放创新激情的愿望, 充分利用该物理实验中心的资源, 建立物理创新实践基地, 鼓励广大教师积极参与引导和培养学生开展研究性学习、创新性实验的活动, 在这方面重庆大学物理实验

中心教学团队是走在了全国的前列。教师将科研思想结合科研成果通过物理实验课传授给学生, 将工程技术中实际应用的先进经验和手段通过开展的“国家级大学生创新训练项目”“重庆大学大学生科研训练计划(SRTP)”等活动训练学生, 同时将一些具有物理思想的科研成果开发为有特色的物理实验, 从而使实验教学内容更贴近实际应用, 对激发学生开阔思路、探究创新起到了很好的作用。一分耕耘一分收获, 重庆大学物理实验中心教学团队经过辛勤努力, 换来了丰硕的成果。请看, 重庆大学弘深学院 2010 级本科生王雪丽、史庆岩、刘文鹏、乔荣飞、顾晓龙同学利用重庆大学物理实验中心这个国家级实验教学示范中心大平台, 在重庆大学物理实验中心教学团队的指导下完成了第五届“重庆大学大学生创新基金”资助项目“电阻温度系数的检测节能装置”, 该项目在教育部举办的第一届全国大学生节能减排社会实践与科技竞赛中获得了全国优秀奖, 受到了广大师生们的好评。

---

**作者简介:** 戴心锐(1954-), 男, 重庆人, 重庆大学物理学院高级实验师, 主要从事物理实验教学及研究工作。

从这以后，重庆大学物理实验中心教学团队更加注重培养学生的创新能力，实行开放式实验教学。在改革实验教学，培养综合性能力的大学生过程中，该实验教学团队也不是一帆风顺，也会遇到各种各样的问题，特别是带学生完成课外科技创新项目时遇到的科研技术难题，这时，重庆大学物理实验中心教学团队的教师会亲自带学生走访专家或学者，下科研院所或厂矿企业，寻求解决问题的经验和办法，这样既解决了问题，又使自己获得了新的知识，学生也从中领悟到搞创新不要怕困难更不要怕失败，关键是要解决问题的途径的人生哲理。至今，学生们在重庆大学物理实验中心教学团队的指导下，利用重庆大学物理实验中心这个国家级实验教学示范中心大平台完成了多项“国家级大学生创新训练项目”“重庆大学大学生科研训练计划（SRTP）”等课题，其中多项课题在全国或重庆市或重庆大学的科技创新竞赛中获奖。

下面是重庆大学 2011 级电子信息科学与技术专业的本科生谢奇洋，车晓，贺碧彬同学以现实生活中遇到的实际问题为题材利用重庆大学物理实验中心这个国家级实验教学示范中心提供的资源，在重庆大学物理实验中心教学团队的指导下完成的“重庆大学大学生科研训练计划（SRTP）”资助项目的实例，该项目荣获重庆市教育委员会组织的“第一届重庆市大学生物理创新竞赛”二等奖。该项目设计合理，有创意，虽然整个设计方案有待于完善，但从该项目的设计思路可以看出该项目贴近生活，涉及面广，设计者想象丰富，对科学有积极探索的精神。对这样具有良好学风的学生只要给予正确引导，可以肯定未来他们定能担当起祖国建设的大梁。

重庆大学物理实验中心教学团队在依托国家级实验教学示范中心平台提高创新能力的培养中虽然付出了很多，但想到所做的一切是在尽一个教师的责任，是在为国家培养有用的合格人才，为中华民族的崛起出力，因而他们所有的付出是值得的。重庆大学物理实验中心教学团队的教师说得好：“我们还需更加的努力，为实现重庆大学成为中国最好的大学之一的目标，为国家和社会培养能够适应和驾驭未来的人才，而继续奋斗”。

### 参考文献：

- [1] 魏怀鹏，张再东，安莉，等。建设国家级实验教学示范中心的探索与实践[A]。2008 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会论文集[C]。2008：59-65。
- [2] 谢秉智。积极推进研究性教学，提高大学生的创新能力[J]。中国大学教学，2006(2)：21-23。
- [3] 张凤琴，林晓珑，张铁强。依托优秀教学团队构建创新素质培育型大学物理课程教学体系的实践[J]。大学物理，2014(4)：41-43。
- [4] 彭明昭，申菊生。高校创新人才培养标准浅谈[J]。科技创业月刊，2007（1）：154-155。

## 垂钓装置的优化设计

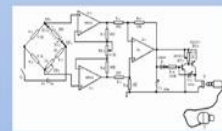
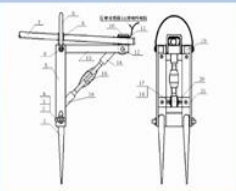
### 一、设计目的

随着社会的发展，人民生活不断提高，休闲娱乐，健身养身成为了人们生活中追求时尚。垂钓就是众多爱好者追求时尚的一种娱乐方式。传统的垂钓方式是垂钓者手拿钓竿，眼睛全神贯注的盯着漂浮在水面上的浮漂进行垂钓；或将钓竿尾端插进泥土里垂钓者空闲着眼睛全神贯注的盯着漂浮在水面上的浮漂进行垂钓；或将钓竿尾端放在简陋的支架上，垂钓者空闲着眼睛全神贯注的盯着漂浮在水面上的浮漂进行垂钓。这样的垂钓方式给垂钓者，特别是视力不好的垂钓者带来诸多不便，因此研制一种成本低，有利于垂钓者悠闲的垂钓，特别是有利于眼睛视力不好的垂钓者垂钓，且安装、携带均方便的垂钓装置是本作品设计的主要目的。



### 二、基本思路

本作品中设计有鱼儿上钩报讯系统，当鱼儿上钩时，其装置给垂钓者发出鱼儿上钩的信息，因而垂钓者不需全神贯注的盯着漂浮在水面上的浮漂，从而悠闲的垂钓，本作品特别适用于视力不好的垂钓者；本作品还设计了机械螺旋移动机构，将回转运动变为直线运动，因而可快速改变钓竿与水平面的夹角，以满足垂钓者选择最佳垂钓观察角度。



### 三、创新点

本作品改变观察浮漂垂钓的传统方式，用声音给垂钓者传递鱼儿上钩信息，所以方便了垂钓者垂钓，特别是方便了视力不好的垂钓爱好者垂钓；本作品能快速改变钓竿与水平面的夹角，以满足垂钓者选择最佳观察垂钓角度；本作品结构简单，体积小，安装、携带均方便，制作容易，本作品有广阔的市场前景。

### 四、作品中应用到的物理学的相关原理

本作品中由压敏传感器、集成运算放大器及半导体器件等构成的模拟电路具有灵敏度高、动态响应好，使用本作品时，将钓竿放在钓竿座上，如果鱼儿上钩，拴在鱼钩上的鱼线就会向下拉动钓竿。由于钓竿的尾端被钓竿座的支承限制，钓竿顶端到支点距离远大于钓竿尾端到支点的距离，根据杠杆原理当二力平衡时，它们离支点的距离与重量成反比，因此，这时被钓竿尾端顶住的压敏传感器因受力突变而产生形变，使电阻值发生变化，该变化直接影响电桥平衡，因而有较弱的信号电流输出，电流再经放大电路推动耳塞发音给垂钓者报讯。本作品另一特征是在钓竿座中设计了左、右螺旋移动机构，将回转运动变为直线运动，可快速改变钓竿与水平面的夹角，便于垂钓者观察垂钓。由此说明本作品所采用的技术均与物理学相关原理息息相关。

## 让学生看到音乐的数理之美

——通过《乐音研究》再谈大学文科物理实验的设计理念与贯彻执行

李俊庆, 刘建龙, 方光宇, 林 珊, 赵海发

(哈尔滨工业大学 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 本文针对新开设的大学文科物理实验之一的“乐音研究”实验教学实践, 着重强调了实验的设计理念、目的和思路。我们目的在于通过这样一个有趣的实验, 使文科学生区分噪音和乐音差异, 了解其作为一种特殊力学振动的时域特征、频域特征, 理解乐音“听起来好听”的悦耳和谐原理, 并通过展示各个音符间的关系, 让学生学会示波器以及 LabView 分析界面的使用, 通过分析归纳出“十二平均律”, 最后利用“三分损益”方法构建管箫, 体验乐音中的包含物理学和数学在内的科学原理, 感受中国古人音乐方面创造的伟大, 并由衷地赞叹其对世界文明的巨大贡献, 进而增加民族的自豪感和增强自信心。

**关键词:** 文科物理实验; 噪音和乐音; 和谐; 频率关系; 十二平均律; 三分损益

### 1 引言

近年来许多高校十分重视文管类大学生综合素质的培养和科学实践能力的提高工作, 一些学校甚至仿照“理工农医类学生要加强人文素质培养”提出了“文科学生要加强科学素质培养”的口号。对此已有一些学校开设了一些适宜文科学生含有动手实践环节的课程, 如物理实验, 电子电工小制作实验等。物理实验作为一个实践性很强又紧密结合日常生活知识性较强的课程, 常被作为文科学生增加科学素质的首选必修课。当然一般给文管类的学生实验授课要求, 包括内容、总学时数等显然要低于理工科学生。

我们知道文科学生的自然科学基础薄弱, 本来就对理工教学内容兴趣不高, 如果所开的课程没有引起其兴趣, 又离生活和其从事的专业相关度小的话, 是不可能有什么良好效果的。如何对此类学生开物理实验课本身就是一个值得研究的课题。在课程的设计等方面, 必须照顾此类学生的特点, 从内容到形式都要精心琢磨。

事实证明, 仅简单地采用适用于长学时理工科学生的所谓“分层次”、“模块式的”实验教学中的最低层次教学模块来组织短学时文科教学效果肯定是差的。客观来讲, 许多学校的文科实验教学也恰似简化版或缩略版的理工科化教学。如果教学过程中仍过度强调培养学生所谓的“理工科的实验基础”(非文科实验基础), 过度要求测量数据处理, 若加之实验内容偏于原理验证及工程应用的话, 就必然造成实验对文科学生来讲显得十分枯燥、乏味。如再辅之以单一的“演示性”的教学, 施以“填鸭”式的、“说明书”式的、甚至是“手把手”式的教学方式, 教学注定是要失败的, 不会达到良好教学效果的, 这样做只能导致学生求知的欲望湮灭, 主动探索的精神消亡, 形成被“填”的惯性, 养成思考的“惰性”, 这样的教学过程也无形地占据了本该留给学生独立思考与实践的时间和空间, 又何谈教学过程中注重启发性、引导性、可探究性及互动性的理念呢!

这些年我们对文科物理实验教学进行了部分改革, 从教学内容的再设计到教学方法探索等诸多方面都进行了尝试, 以期在教学理念上达到如下的转变: 首先要对教学内容从无层次、少思考地设计转变到注重精心筹划、有层次、趣味化地设计; 其次从仅注重讲解、测量、数

**资助项目:** 黑龙江省高等教育教学改革项目(JG2012010151); “985 工程”本科生教学建设项目(HITJG2014008)

**通信作者:** 李俊庆(1963-), 男, 哈尔滨人, 哈尔滨工业大学物理系教授/博士生导师, 博士, 从事物理光学及物理实验教学与研究。

据处理转变到注重引导学生注意观察、分析，佐以数据处理与分析；从无总结和引申探讨的八股文式的报告形式转到注重撰写小科技报告、撰写总结短文，引申讨论等灵活形式；教学方法上从死板的教学转到注重开发内容的趣味性，引人思考方面，教学形式转向注重灵活性，增强教学启发性、开放性、互动性，可探究性方面。我们体会到，学生的兴趣是一个实验教学成败的关键。显然有两个层次的问题要解决，首先要使内容设计得有趣，使人感兴趣，引人入胜，使人思考，还要使教的过程变得生动有趣，记忆深刻。

针对如此的理念，我们从文科教学软硬件方面专门做了一些改革，开发拓展了传统的教学内容，开设了一些新的教学内容以适应文科学生的实验教学。其中《乐音研究》就是一个新开设的实验，几轮的教学试点证明它的开设是相当成功的。本文将从实验目的、所用的仪器与装置设计、实验内容，以及实验过程的控制等几个方面展示实验的设计思想和设计理念，并通过一些学生的反馈展现教学效果。

## 2 实验的目的

这个实验所要到达的目的是什么？概括起来主要有五点：

- 1) 让学生观测乐音间的差异以及与噪音的本质差异；
- 2) 研究乐音间（频率或周期）的关系；
- 3) 探究乐音悦耳和谐的原理；
- 4) 感受古人之伟大（体验“三分损益”制管乐器，体验“十二平均率”）；
- 5) 让学生学会示波器的使用；了解虚拟以仪器的应用。

我们知道声音是一种机械振动，它是一种可以在特定媒介中传播的机械波。而乐音是一种有别于噪音的特殊声音，它经常是悦耳的，当然可作为一种信号被我们或仪器所感知。它可发自一个腔体，这个腔体可以是一个动物的喉咙，如人嗓子，也可以来自一个乐器，如管乐或弦乐器等。

我们要让学生看到不同声音的差别，包括不同乐器发出乐音的音色差异，了解乐音悦耳的原理，理解其组合在一起的和谐原理。

我们靠什么“看到”或“感受到”这些信息、分辨这些信息，我们靠的是声音探测器，如麦克，以及显示装置，如示波器等。因此这个实验的核心目的之一就是让学生了解示波器的功能并有机会接触虚拟仪器。

仅仅了解示波器等是不够的，我们的目的之二是借助示波器通过观察和测量了解乐音和噪音的差异，了解乐音的构成要素，如响度、音色、音调高低、时长与观测声音信号的强度、波形、周期和频率与持续时间等量的对应性。

另一个目的是研究不同乐音之间的关系。比如一个有八度差异的高低不同的同一个音的频率关系，如 Do 和高音 Do，研究一个八度各音阶的频率关系。

实验还有一个目的是在时域分析之外引入频域（频谱）分析的概念，探究乐音悦耳的原理，以及多个特定乐音组合（如和弦）让人感到和谐动听的原因。

最后让学生了解“三分损益”方法来制作发音排箫，以及验证“十二平均率”，进而让学生了解音乐与数学的科学关系，体会中国古人对世界音乐文明做出的了不起的贡献，以期增加学生们兴致及自豪感和自信心，这是相当重要的。

## 3 实验仪器与装置

实验硬件将由发声部分，接收部分，显示和分析部分三大部分组成，如图 1 所示。

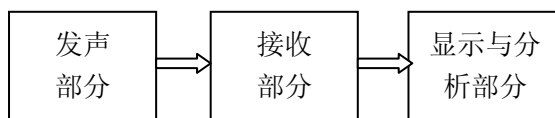


图 1 仪器与装置格局设计

发声部分可以是真实乐器（如管乐笛箫等，弦乐如小提琴、二胡），也可以是电子琴（可以模仿若干种类的音色）；还可以是自制发音腔管，其腔长可调控，如用试管注以不同水位吹响可发出音响，还可以是软管。可是自制的带移动琴码的单弦琴，其弦可调控松紧控制发声频率。可用声频信号发生器将信号经功放后由音箱放出，信号可直接接入后续接收单元上以显示与分析信号的特性。

在接收部分，发出的声音可由麦克接受变成电信号，可考虑使用计算机使用的微型麦克接入带声卡的计算机。

显示和分析部分的功能可由示波器或计算机来实现。乐音信号可在时域和频域被展示出来，即可以得到如波形、强度、主周期或频率的时域信息，也可以得到频谱成分强弱分布的频域信息。用计算机编制的特殊界面，如 LabView 界面（其实例见图 2），可实现乐音的显示与分析。我们可以分析录制的波形文件，也可以直接分析采样接收即时的声音信号。

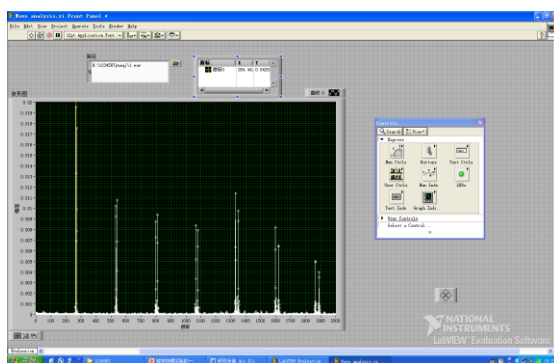


图 2 LabView 界面：声腔（试管）吹出的声音频谱分析，主音和泛音（主音的倍频音）的显示

总之实验需要乐器、模拟电子琴、琴弦、腔管、声频信号发生器、耳麦、有源音箱、示波器、计算机（配有声卡和 LabView 软件）等硬件设备即可开设这一课程。

我们可以看到，过去枯燥的《示波器的应用》实验被巧妙地融到本实验之中，同时一个先进的计算机虚拟仪器技术（用 LabView 实现）也被学生接触到了。事实上学生在实验中不会再感到枯燥乏味了。

#### 4 实验内容

在教学课件的设计中，我们不同以往先给出原理，后列出实验步骤，给出实验要求和问题讨论等讲义写法，为了让学生感兴趣、去思考、去主动找知识，我们在指导书上先预设了若干个引子，之后才提出了一些问题供学生思考，并再在适当的位置给出提示和知识点讲解，或者先提出适当开放的问题鼓励学生预习时上网预先查询，或上课时利用实验室 Wifi 环境即时上网，以期让学生养成了一个主动找知识搞懂原理的好习惯，而不是被动地被灌输知识。

我们在指导材料的引子中谈到了“音乐之神奇”：“提起音乐，大家都会感受到它的无穷魅力。有人说“音乐是一种美妙的宇宙语言”，它能描述出世间万物，传达出万种情感，它很容易让你‘感染’上喜怒哀乐，紧张和放松，让你体会到雄伟与悲壮，感受到缠绵和无奈，甜美和苦涩；‘它是一只神奇的魔笔’，它能给你以形象，描绘出一个场景，展示出一幅画卷，让你‘看到’事物美与丑，刚与柔，它能展示出气势的恢弘与凄凉，让你感受阳光的明媚、以及黑暗的阴森和恐怖。它让人徘徊在梦幻与现实之间，可给人以压抑、或者引起亢奋、亦或是紧张感，它也会给人以无尽的向上力量……”。音乐是个乐音的集合体，它发自不同乐器和我们喉咙，不同高低、不同强弱、不同时间的乐音按着一定顺序如诗一般的流淌。有时它可以是涓涓溪流，有时它可以是奔腾怒吼的大江。那音乐的魅力到底来自何处?.....”。这样就



叙述就比较适于引导学生以自然的非生硬有文彩的方式去接触我们的实验专题。

在小知识点提示里，我们谈到了毕达哥拉斯，谈到了数学与音乐的和谐，谈到了信号的频谱理论，谈到傅立叶（Fourier）和亥姆霍兹（Helmholtz）在物理学和生物医学方面对音乐的贡献，谈到了古人在音乐方面对世界文明的伟大贡献，谈到了“五度相生律”和“十二平均律”，谈到了《管子》和《吕氏春秋》中记载过的用“三分损益法”来生乐音制箫事情，我们也给出了特定音调的（如 C 大调）一个八度音程内各个音符的频率定义，进而为后续学生测量乐器发出音响的音准和比较各音的关系埋下伏笔。

如谈及中国古代的“三分损益法”发明：“中国春秋战国时期的《管子》、《吕氏春秋》记载过古人研究过如何制备竹管乐器。他们以一根长约八寸的发音竹管为标准，记为‘黄钟’音（相当于 Do），再截取长约为其三分之二（长约五寸二）的另一竹管，可以吹出另一个高五度的音，记为‘林钟’（相当于 So），再将这五寸二的竹管接上其三分之一对应长度约七寸的竹管吹响可以得到比‘林钟’低四度‘太簇’音（相当于 Re），如此循环操作，做三分之一比例的‘损’和‘益’，便可以得到在一个八度内所有乐音（Do, Re, Mi, Fa...）”。

上课时我们给出了“三分损益法”示意图（原理见图 3），从中可让同学总结出各个音的近小整数比关系，因为学生知道管长决定乐音频率的道理。从而引起学生对多乐音组合（如和弦）和谐动听的理解或猜想。并为指导学生后续自制排箫奠定原理基础。

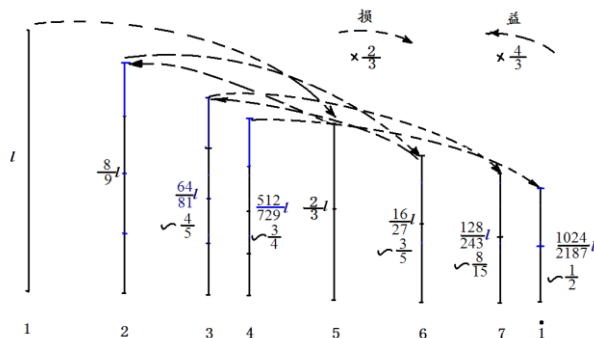


图 3 “三分损益法”生乐音原理图

## 5 教学过程控制

我们的教学过程控制如下：

先教会学生或复习示波器的使用，如通过了解一个已知频率的周期信号如何在示波器上正确显示的过程，让学生学会如何使信号稳定，并能得到如信号幅度、周期，进而得到频率等信息，并和信号源显示的信息（或已选好的频率值）对照，以期增加学生的自信心。

让学生观察一个由乐器产生的乐音信号在示波器上的形态，首先了解到了乐音的（准）周期性，让学生看到不同乐器音色在波形上体现出的差别，让学生看到乐音的长短和时间上的稳定对显示难易的差别。学生很容易分辨出管乐（如长笛）与弦乐（如小提琴）的乐音信号波形的持续稳定性，以及键盘乐器（如钢琴）的声音的脉冲特性，同时看到了各种乐器波形（偏离正弦波）的非对称性或不规则性，进而适时引出频谱成分的概念。

研究较单纯的（单一频率低的正弦波）声波（纯音）构成的一个八度音阶 Do, Re, Me, Fa, So, La, Ti, Do（如 C 调的 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 1）的频率关系，可直接利用显示波形来得到周期和频率信息，总结出其间的小整数比关系，尤其是高低不同的同一音的频率关系，进而修正音阶频率等间隔的错误印象。也可以利用合成出来的利萨如图形（Lissajous figures）将所研究乐音信号与一个已知信号源信号比较得出频率关系。

针对一个管腔发音的结构，如一个可吹响的试管或竖笛，研究一个乐音的组成，让学生看到它实际是由一套纯音（单一频率正弦波）按比例组合而成的，一般被称之为主音（principal

tone)与泛音(overtone)的组合,又被称为与倍频音(multiplied tones)或谐音(harmonic tones)的组合,了解主音和泛音之间的频率关系,进而理解为何越“纯净”的音越好听的道理原因。也引申出傅里叶频谱分析与合成的原理,以及了解亥姆霍兹是怎样通过研究乐音的成分与相互作用开创性地研究乐音对人类生理与心理施加影响的。

可让学生先用注水的方式得到有不同空气柱高度的试管,然后吹出八度音阶,分别比较其(主音)间的频率关系。

我们适时引出自行设计的适宜频域分析的 LabView 界面,对发出的声音观察频域上的频谱特征。可故意制造一个噪音,观察其频谱形态,然后可用试管发声比较前后信号的频谱变化,进而佐证为何纯音好听的说法。再观察单弦拉动和吹试管所发声音的频谱特点,进而总结出倍频关系,从而联想到固定长度的腔或弦共振时可支持多种可能频率波的驻波的物理解释。

可让学生由塑料吸管制作发音簧片,研究其前端预留长度与可吹出音的高低关系。

可研究笛子或萧的孔的排布位置,以及放开和按住哪些个孔组合对发出声音高与低的影响。

可研究和弦和谐原理,如 Do, Me, So 构成的大三和弦的和谐道理,让学生发现其单独各个音倍频之间周期性重叠的关系。

由 Do, Me 和 Re, Ti 四个音弹奏乐段,让学生感受贝多芬《命运交响曲》引起的从快乐到压抑的情绪产生的原理。……

## 6 教学效果与学生反馈

事实证明,我们的教改是非常成功的,学生热情高涨,争抢着选择来上《乐音研究》实验,甚至不顾有否成绩也要旁听。教学效果极好,学生感到受益颇多。从抽取的部分学生反馈意见中也能看到这些。

有同学在报告后写到:“我以前听音乐,只是出于音乐那种动人的感觉,并未意识到其背后与频率的关系,虽然小的时候,也会用药瓶子加些水吹出一些简单的音,但并未深入的了解过背后所蕴藏的科学原理...。和谐之音其实就是在人耳可听到的范围内,几个单音的公共频率越多,那声音就更加和谐。而噪音则是由太多频率不同的音,尤其是相位无规律的音合起来(的)音,这样无规律的组合使声音变得噪。音阶也是如此,音调的高度与频率跨度的关系,仿佛是种巧合却又是种必须(然),让人越发地感到科学的神秘力量的(和)魅力...。我们可以利用频率不同,制造出更美妙的和弦,这一艺术与科学的结合是如此神奇,而又如此美妙.....。”

另一位同学写到:“今天我‘看见了’乐音!我一直很喜欢音乐,初中的时候也了解了乐音的本质是机械波,可(它)是书本上的知识,没有亲手实践过,(这次)对我的冲击很大。第一次使用示波器,以前只见过插图,对新的仪器十分好奇,在老师的指导下我看到了一列列的正弦波,它们就是能陶冶情操的音乐呀!和信号源的组合(我)看到了一个个的利萨如图形在显示屏上变化,十分有趣。老师还以《命运交响曲》为例讲了和弦半(伴)音的秘密,我听得入神。不仅老师讲,我还亲自实践自己造琴,在同学的帮助下我完成了对琴的测量,很有成就感。发现实验原来也可以这样做,好奇什么就做什么,不懂什么就自己探索,十分开放、引人探索,只是一节课时间太短,关于乐音也只是了解了初步,但这节实验却激发了我的兴趣,音乐不仅是音乐,还是物理,还是数学,音乐的美使我看到了数学的美.....。”

## 7 结束语

一个新开设实验的成功是与教学目的把握、教学理念的正确建立,具体实验内容的精心再设计,实验教学过程的精确把控,教学各种技巧的灵活使用等各环节密不可分。其中学生

兴趣的提升与保持是一个教学成败的至关重要的因素之一。在兴趣中教会学生去探索，去拓展自己的知识这非常重要。这对设计者和任课教师提出了很高的要求，要求他既要扎实的专业功底，还要有对事物的敏锐洞察力，宽泛的知识面，兼有融会贯通的能力，他的言传身教无疑对学生素质的培养，创造力和创新意识的培养是十分重要的。本实验可供相关高校文科类物理实验教学参考。

#### 参考文献：

- [1] 方兴安，胡建华。文科大学物理实验开设的实践与思考[J]。物理实验，2004，24（7）：21-23。
- [2] 马世红，童培雄，赵在忠。文科物理实验[M]。北京：高等教育出版社，2007。
- [3] 耿完楨，赵海发，金恩培，等。大学物理实验[M]。哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2008。
- [4] 蔡天方，余守宪。简单与和谐-谈谈乐音、音程与和弦，现代物理知识[J]。2001，13（6）：1-7。
- [5] Barry Parker. Good Vibrations - the Physics of Music [M]. Johns Hopkins University Press, 2009.
- [6] John Fauvel, Raymond Flood, Robin Wilson. Music and Mathematics - From Pythagoras to Fractals [M]. Oxford University Press, 2006.

## **Let the Students Felt the Beauty of Musical Sounds in Physics and Mathematics**

### **——on Design Philosophy and Implementation of Physics Experiment for Liberal Arts Students via ‘Study on Musical Sounds’**

LI Jun-qing, LIUI Jian-long, FANG Guang-yu, LI Shan, ZHAO Hai-fa  
(Harbin Institute of technology, Department of physics, Harbin 150001, China)

**Abstract:** This article focuses on the practice of a newly-opened course ‘study on the musical sounds’ in university physics experiments for the liberal arts students by emphasizing the design philosophy, goals and design method. Through such an interesting course, we aim at letting the students differentiate the noise and musical sounds, be familiar to the characteristics of musical sound as a special mechanical vibration in time and frequency domain, understand the principle of harmony and consonance of its sounding pleasing to the ear, master the usage of oscilloscope and the analysis interface of LabView to indicate and determin the frequency relation among the musical notes therefore to summarize and deduce the ‘twelve tone equal temperament’, and finally construct an panpipes by using ‘the loss and gain method by one third’ to experience the scientific principle in physics and mathematics inside the musical sounds, to feel the greatness of ancient Chinese in music and highly praise the their contribution to world civilization, therefore to increase the sense of national pride and self-confidence.

**Key words:** Arts physics experiments; Noise and musical sounds; Consonance; Frequency ration; Twelve tone equal temperament; The loss and gain method by one third

# 大学文科物理实验探索与实践

## ——电光源特性研究

林 珊, 李俊庆, 赵海发

(哈尔滨工业大学 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 针对“光环境污染”和“学习光源的合理选择”等问题新开设了大学文科物理实验“电光源的光谱与频闪特性研究”。具体介绍了实验的设计理念、主要研究内容及实验结果。结合教学经验, 指出“贴近生活的研究对象、简单的实验操作、更具趣味性和直观性的实验结果、以及高科技手段辅助”可以在文科物理实验教学中达到满意的教学效果。

**关键词:** 文科物理实验; 电光源; 光谱; 频闪; 波动深度

### 1 引言

大学物理实验是高校通识教育的重要课程之一, 目前很多高校都为文科学生开设了物理及物理实验课, 这是培养文科学生兼具一定科学素质的积极尝试<sup>[1-5]</sup>。

针对文科学生对社会人文关注度高而对物理理论知识掌握得相对较弱的特点, 我校物理实验中心不断地对文科物理实验内容进行改进、调整、和完善, 从而达到更好的教学效果。

环境污染(包括光环境污染)是我国近年来随着经济高速发展而出现的亟待解决的新问题<sup>[6-7]</sup>。比如: 节能灯、LED 等已经取代常规白炽灯, 那么与前者相比, 这些光源对人眼就一定是健康的吗? 如何合理选择照明光源是无法回避的现实问题, 而文科学生对此普遍有更多的关注。针对这一特点, 我们开设了“电光源的光谱与频闪特性研究”实验, 旨在引导学生学会评价及选择不同光源, 避免光污染, 同时纠正学生长期以来的一些错误认识。在实验设计中, 我们遵循“趣味直观、操作简单、深入浅出、结合生活与高科技”的设计理念, 力求实验内容贴近生活, 使实验内容生动、有趣, 吸引人, 所得到的实验结果能启发学生对生活中的常见现象进行思考。本文则以具体实验内容为主线, 并结合教学经验, 阐述如何实现这一设计理念, 从而达到满意的教学效果。

### 2 研究对象要贴近生活

文科生通常对实验中科学研究客体感觉是陌生的、深奥而又神秘的, 甚至有距离感的, 实验课上其心里有抵触和畏惧情绪实属正常。本实验则提供了市面上几类常见的可发“白光”的电光源作为研究对象, 包括白炽灯、护眼灯(日光灯)、家用节能灯(紧凑型荧光灯)、手

---

**基金项目:** 黑龙江省高等教育教学改革项目(JG2012010151); “985 工程”本科生教学建设项目(HITJG2014008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(HIT.NSRIT.2013084)

**作者简介:** 林珊(1978-), 女, 吉林省吉林市人, 哈尔滨工业大学物理系, 博士, 工程师, 从事凝聚态物理及物理实验教学与研究。

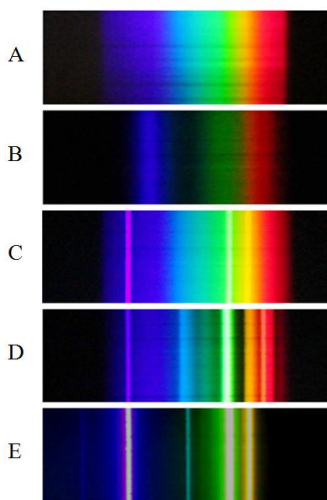
**通信作者:** 李俊庆(1963-), 男, 哈尔滨人, 哈尔滨工业大学物理系, 博士, 教授/博导, 从事物理光学及物理实验教学与研究。

电筒（LED 灯）和低压汞灯，这样使得学生在实验时会对这些贴近生活的研究对象不再陌生，会感到很亲切，自然也就不再有畏难甚至抵触情绪了。

### 3 实验内容要设计得更具趣味性而实验结果要更具直观性

#### 3.1 光谱展示与研究方面

科技发展日新月异，我们身边的电光源从传统的白炽灯、日光灯，发展到目前带着高科技光环的 LED 灯、节能灯（紧凑型荧光灯）、护眼灯等等。那么，这些高新科技产品的特点是什么？如何选择学习用的照明光源？我们所接触到的光源是否环保？是否有利于身体健康？通过本实验学生就可以回答这些与生活息息相关的问题，这既能引起文科学生的学习兴趣，又能使学生学以致用，应用这些常识使其在生活中受益。



(A) 白炽灯 (B) 手电筒 (LED 灯) (C) 日光灯 (D) 节能灯 (E) 低压汞灯

图 1 用三棱镜分光后拍摄的各种白光光谱

仅凭肉眼，学生们只能感觉到光源的亮度和色调的不同，而利用三棱镜和分光计，通过折射对复光分解，学生们可观测到不同光源呈现的不同彩色谱线——光谱。图 1 给出了实验中观测到的几种常见发白光的光源光谱。实验中看到的奇幻的、色彩斑斓的、犹如“彩虹”的实验现象，不仅引起了文科学生的浓厚学习兴趣，轻而易举地揭开了这些高科技光源的神秘面纱，也形象生动地印证了虽然几种光源都是发白光的，但所谓的白光其实是复合光，是由多种颜色的可见光按一定的强度和比例混合成的结论，由于发光机制不同，光谱线（或谱带）的颜色和条数也不尽相同，学生看到：

1) 白炽灯（图 1A）光谱在可见光的范围内是连续谱，颜色是七色，属于热致发光，此类光谱还有太阳光、烛光。

2) 白光 LED（图 1B）谱为分立窄谱带，谱带只有红、绿和蓝三基色，属于固体发光。

3) 日光灯、节能灯和低压汞灯属于气体放电发光，由于内部封装了汞蒸气，光谱含有分立谱线。日光灯（图 1C）和节能灯（图 1D）分别采用卤磷酸钙荧光粉发光和稀土三基色荧光粉发光，后者的发光效率更高，因此也更节能。而由低压汞灯（图 1E）的光谱可以明显看到 5 条分立谱线，分别为黄、绿、青、蓝和紫色，对应的是汞原子的特征谱线。

通过光谱比较，学生们可从中体会到各种光源的异同点，了解其发光机制。

#### 3.2 频闪展示与研究方面

提到光源“频闪”同学们可能觉得抽象、陌生，但如果让他们利用手机里的照相或摄像模式对准电脑显示器、台灯或电视屏幕观察，同学们会惊讶的发现这些点亮的光源是闪烁的。

接下来同学们就会提出一系列问题：为什么光源会闪烁？为什么我们肉眼察觉不到？频闪现象对我们的生活有什么影响？如何利用或者避免频闪现象？

为了深刻体会频闪的含义，我们专门设计了实验用黑匣子，用以观测临界闪烁频率。用信号发生器驱动黑匣子里一盏 LED 灯发光，当频率很低时，同学可轻易地分辨出光源一亮一暗明显闪烁；当频率增加时，光源由粗闪变为细闪，当频率继续增大到某一数值，由于人眼的视觉暂留特性，学生感受到的不再是闪烁光，而是连续的光，这时对应的频率即为临界闪烁频率。如果提高背景光（点亮黑匣子里另一盏 LED 灯），会发现临界闪烁频率减小。这是因为临界闪烁频率也与一些因素，如光源照射强度、背景光颜色强度、观察者身体因素等等有关，其理论参考值为 45.8Hz。

通过上面的简单实验，同学们就会明白普通日光灯是以频率 50Hz（一秒钟变化 50 次）、电压 220V 的正弦交流电为电源，其闪烁频率是 100Hz 的道理；也知道了正因为视觉暂留的效应，电影（24 帧/秒和 24 次/秒遮挡，传送频率为 48Hz）和电视（25 帧/秒，采用隔行扫描，传送频率为 50Hz）这些闪烁播放的图像，看起来是连续的原因<sup>[8]</sup>。

### 3.3 波动深度的研究方面

文科学生书籍阅读量较大，特别关心眼睛疲劳的问题和对电光源的选择标准。同学们常有这样的体会：在宽敞明亮的自习室通常比寝室内台灯下看书学习眼睛要舒服不易疲劳。面对市面上林林总总的打着高科技旗号的台灯产品，同学们如何判断选择这些产品呢？

其实，最理想的光线是变化极其缓慢的自然光。对于稳定的照明光线，眼睛的瞳孔调节相对固定，调节量很小，不容易引起眼部光学系统损伤和视觉疲劳；对于不稳定的光线，学习时眼睛的瞳孔需要频繁调节，调节量大，容易引起眼部光学系统损伤和视觉疲劳<sup>[9]</sup>。

我们想让学生知道光源的好坏不光是由平均的发光强度来判断的，更严格来讲，应由波动深度来判断，波动深度可表示光源闪烁的程度，那么何谓波动深度呢？我们需要学生理解其定义及内涵，要学生知道其形式可表示为： $H=(I_{\max}-I_{\min})/I_{\max}$ ，其中  $I_{\max}$  为最亮时候的光强， $I_{\min}$  为最暗时的光强<sup>[10]</sup>，其物理含义是：明暗光强的变化占最大光强的百分比数，如图 2 所示。波动深度的测量可利用示波器实现<sup>[11]</sup>，如图 3 所示。我们希望学生知道频闪的波动深度小于 5% 的光源才被认为是理想的照明光源<sup>[12]</sup>。

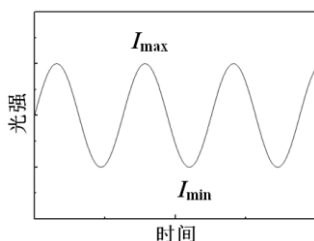


图 2 波动深度示意图

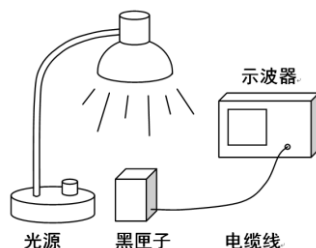


图 3 波动深度测量装置图

为了更好的体会波动深度的意义及影响其变化的因素。我们专门设计了用 LED 灯模拟波动深度测量的实验内容，图 4 展示了部分学生实验观测到的结果。模拟黑匣子利用直流和交流信号源驱动两盏 LED 灯发光，可通过调节直流和交流信号幅值，模拟波动深度  $H$  为 0%、50% 和 100%。可以看到，屏幕上方的直线（或曲线）为测量曲线，下方的直线为地线（即对应  $V=0$  mV）。同学只需调节直流电压大小和交流信号的幅值（ $V_{P-P}$ ），即可体会到<sup>[13]</sup>：

1) 光信号全部为直流成分则  $H=0\%$ ，光源强度无波动变化；当光信号全部为交流成分则  $H=100\%$ ，光源强度波动变化最大；

2) 适当调节直流和交流电压可达到  $H=50\%$ 。

可见所谓“不闪”即波动深度为零，指的是采用直流电压供电；如果电压中有交流成分，

尽量减小交流信号的幅值，也可达到降低波动深度的目的。

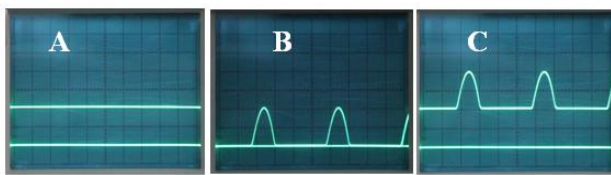


图 4 观测波动深度 (A)  $H=0\%$ , (B)  $H=100\%$ , (C)  $H=50\%$

利用图 3 的实验装置，可以让学生实际测量一下不同光源的波动深度。图 5 为白炽灯波动深度的测量结果。计算可知白炽灯的波动深度约为 30%。

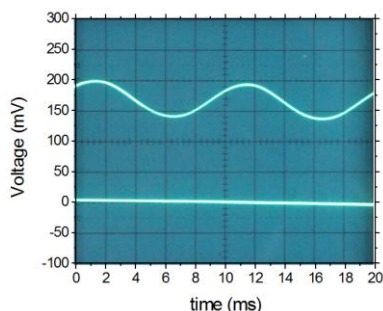


图 5 观测白炽灯的波动深度

需要注意的是，光源摆放位置、高度以及室内背景光源都可能影响波动深度的测量结果。通过示波器图像，学生们可直观看到肉眼看似稳定的光源其实是周期性明暗变化的。实际生活中，可以通过提高背景光的亮度，来达到降低波动深度的目的。

#### 4 实验仪器要操作简单

本实验涉及到的基本实验仪器是分光计和示波器。以前针对分光计我们开设了“分光计的调节和三棱镜顶角测定实验”，但同学们普遍反应实验仪器调节枯燥、繁琐、难度大，调节部分占去了大半时间，冲淡了仪器使用部分的内容，喧宾夺主，导致实验内容枯燥乏味，而实验结束后学生很难对仪器使用留下深刻印象。而针对这种情况，本实验对分光计只做简单的调节要求，上课前由教师大致调好，课上同学只需调节转台和望远镜位置即可观察到彩色谱线。



图 6 黑匣子外观及内部结构图

为了使频闪和波动深度的观测简单，我们自制了黑匣子，其顶盖可抽拉模拟暗室避免室内光源干扰，侧面留有视窗，以便学生直接体验波动的影响。黑匣子如图 6 所示，其内部主要包括两个 LED 光源和光信号探测元件硅光电池。两盏 LED 灯，分别由外部直流电源和交流电源驱动，装置可用来模拟频闪和波动深度。涉及学生调节的只有几个旋钮。

这些简化后的实验操作，使文科学生更容易上手，增加了学生的成就感及实验热情，使学生的注意力集中在实验的观察和结果的分析上。

## 5 要展示高科技手段辅助的实验结果

为了使学生了解科学前沿,进一步增强实验的科学性,我们演示了科研上利用便携式微型光纤光谱仪测量出的上述光源频谱<sup>[14]</sup>,如图7所示。由于光谱仪采用分光元件为光栅,波长也经过线性校准,谱线测量范围宽,能更准确地反映光谱特性,因此,学生可以进一步在图7中看到紫外和红外区域的谱图,而图1只显示了可见光的光谱。例如:图7中日光灯和汞灯的紫外区域谱线可准确辨识,而在图1中却不可分辨;图7中白炽灯的红外区域仍有光谱。

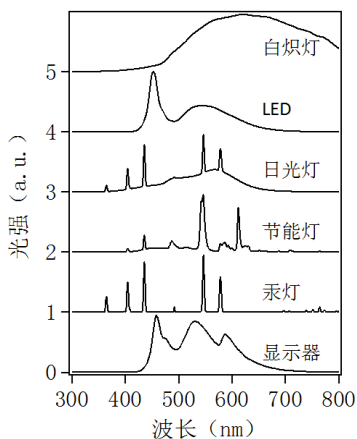


图7 用便携式光纤光谱仪直接测量的各种白光光谱

## 6 要深入浅出地分析、理解与引申实验结果

通过光谱实验,增强了学生环保意识,生活中注意避免含汞灯泡的随意丢弃;提高了学生自身防护的科学意识,尽量多晒太阳,避免长期在谱线缺失的光源下学习,远离紫外辐射这类“光污染”<sup>[5,15]</sup>;拉近学生与高科技产品的距离,了解了生活中的一些科技词汇,如“红外理疗”、“紫外灭菌”等等。

启发同学思考一些贴近生活的小实验,例如:没有三棱镜,同学可用电脑光盘分光得到光源光谱;水滴滴在电脑显示器上(或手机屏幕,或电视屏幕),可以看到红、绿、蓝三基色,从而体会白光是复合光的道理。

通过频闪实验,启发同学思考为什么高速行驶的车轮有时看起来不转或倒转;如果晃动铅笔,在太阳光和日光灯下,看到的“虚影”有什么不同?

通过波动深度的研究,使学生了解人眼疲劳的来源,培养其个人用眼卫生,保护视力。

## 7 结束语

本实验内容丰富有趣,实验仪器简单易操作,实验结果具体直观,已在文科本科生中进行了一学期教学试点,达到了令人满意的效果,使文科学生理解了所谓光源发白光的原理,及各种光源的发光特点;在学习生活中学会判断及利用不同光源,避免光污染;纠正了学生长期以来的一些错误认识:诸如认为光源发光越白越亮越是好光源,白光源和太阳光一样是连续谱,光源缺谱线对身体无害等;并且在实验中掌握了分光计和示波器等基本实验仪器的使用,提高了动手能力。当学生们看到紫外区域光谱后经常说的一句感叹的话是“以后可得注意了!”,有学生对自己新买的带一闪一闪发光的彩色LED的漂亮台灯有了新的认识,决定等到实验室观测确认之后才启用。从不同的高科技产品光源的判断、选择,到个人用眼卫生的培养;从增强环保意识到远离光环境污染,这些知识的学习对同学都是大有益处的。本



实验可供相关高校文科类物理实验教学参考。

### 参考文献:

- [1] 方兴安, 胡建华. 文科大学物理实验开设的实践与思考[J]. 物理实验, 2004, 24(7): 21-23.
- [2] 汪兰, 夏娴, 殷实. 在物理实验教学中培养文科类人才的理性思维[J]. 物理与工程, 2007, 17(1): 49-50.
- [3] 王勇, 卢佃清, 王莉. 开设文科物理的实践与探索[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(12): 142-144.
- [4] 章羽, 钱锋, 戴玉蓉. 文科物理实验教学实践探索[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(3): 144-146.
- [5] 牟海维, 金少先, 王世英. 改革物理实验教学提高学生综合素质[J]. 实验室研究与探索, 2000(4): 14-16.
- [6] 梁红山. 光污染对人体的危害及预防[J]. 劳动医学, 2001, 18(4): 243.
- [7] 王亚军. 光污染及其防治[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(1): 56-58.
- [8] 郭保军, 杨凤梅, 赵娜. 对动画原理的修正[J]. 影视制作, 2009(11): 16-17.
- [9] 余希湖, 蒋涌潮. 光源闪烁对视觉影响的研究[J]. 照明工程学报, 1996, 7(2): 22-26.
- [10] 曾丽梅, 苏昌林. 电光源频闪测试技术研究[J]. 中国测试, 2012, 38(3): 34-38.
- [11] 马世红, 童培雄, 赵在忠. 文科物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [12] 杨光. 学习照明的频闪及其影响因素探讨[J]. 中国照明电器, 2011(3): 17-22.
- [13] 杨光. 基于不同驱动条件下白光 LED 照明频闪问题的研究[J]. 照明工程学报, 2011, 22(6): 8-13.
- [14] 李加, 张存洲, 朱箭. 光纤光谱仪简介[J]. 现代科学仪器, 1998(4): 15.
- [15] 刘毅, 彭涛, 沈杰. 商用节能灯的光谱特性及对人体的危害[J]. 浙江科技学院学报, 2010, 22(2): 94-101.

## Exploration and Practice of Physics Experiments for Liberal Arts Undergraduates- Study on Electrical Light Sources

Lin Shan, Li Jun-qing, Zhao Hai-fa

(Harbin Institute of technology, Department of physics, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The physics experiment, "study on the spectrum and strobe features of electrical light sources", for university arts undergraduates was recently opened, aiming at the solution to the problems "visual pollution" and "quality assurance of light sources". The design ideas, experiments and results are introduced in detail. The exploration and practice of teaching for one year show that the positive effects on physics experiment for arts undergraduates originate from "objects in daily life, simple experiments, fun and intuitive results and supplementary high-tech".

**Key words:** Arts physics experiments; Electrical light sources; Spectrum; Strobe feature; Fluctuation depth

# 在大学物理实验课程中开设 “DIY 研究型课题实验”的探索和实践

赵海发, 刘世刚, 刘建龙, 张立彬, 耿完桢  
(哈尔滨工业大学 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 教学内容的更新落后于当代科技的发展; 实验教学模式过于单一; 在实验教学过程中, 学生始终处于一种被动接受、难以主动参与到实验整个过程等弊端, 一直是困扰大学物理实验课程教学改革的难题。我们的探索和实践表明, 加入一个“DIY 研究型课题实验”的新实验类型, 可以十分有效地调动学生的学习热情和创新精神, 取得良好的教学效果。

**关键词:** 大学物理实验; DIY; 电磁悬浮

## 1 引言

近年来, 国内各高校在大学物理实验课程中进行的课程教学改革取得了很大进展, 以分层次、全面开放模式为代表的各种教学改革新成果不断涌现, 在实验内容更新、新实验仪器研制、教学和科研相结合的教学方法以及鼓励学生开展科技创新项目研究等方面都做出了很多努力, 也取得了大量的成果。但据我们的调研和自身教学的体会, 在实验课程的教学, 还比较普遍地存在着教学内容的更新落后于当代科技的发展; 实验教学模式单一; 学生的主动性和能动性难以得到充分发挥, 处于一种被动接受、无法参与到实验设计的整个过程等弊端。学生对于实验课程比较普遍缺乏兴趣和热情, 学习积极性不高。

针对这些问题, 我们经过仔细分析、反复讨论和研究, 在大学物理实验课程中, 开设了一类完全新型的物理实验项目——“DIY 研究型课题实验”; 在教学实践过程中受到了学生们的普遍欢迎, 取得了良好的教学效果。

所谓的“DIY 研究型课题实验”, 从选题上应该是一些具有一定挑战性、新颖性; 与当代科技发展紧密相连; 能够引起学生强烈兴趣同时在难度和深度上又比较适于本科学生进行研究、设计的课题; 在实践的过程中又应该是充分体现 DIY 的精神, 尽量放手, 让学生最大限度地参与到实验方案的考虑、实验设备的选配、部分组件的制作和全部实验的调试中去。

“DIY 制作电磁混合磁悬浮实验系统”就是我们一年来按照上述选题和实践原则, 研究、设计的一次我们认为是十分成功的试点实验项目。

电磁悬浮技术是集电磁学、电子学、力学和控制工程于一体的现代高新技术, 利用此技术可实现无摩擦、无接触、无噪声和无污染等状态, 因而倍受世人关注。如果让学生自己来设计、研究一个方案, DIY 动手实现一次, 我们相信, 学生的反应一定会是十分强烈的。

在一些发达国家, 不管是家庭教育还是学校教育, 让学生 DIY 自己动手的理念从小就习以为常了。可是在中国由于受到传统观念的影响和高考指挥棒的牵引, 家长和孩子从小就养成了只注重考试分数和书本知识学习的观念。到了大学, 很难改变学生的传统思维习惯, 一方面实验教学不得不从最基础的实验内容开始, 另一方面在实验过程中, 学生往往注重实验结果而不注重实验过程和实验规律的探索。在教学安排上, 传统的物理实验内容虽然已经

---

**基金项目:** 黑龙江省高等教育教学改革项目(JG2012010151), “985 工程”本科生教学建设项目(HITJG2014008)

**作者简介:** 赵海发(1962-), 男, 黑龙江人, 哈尔滨工业大学物理系教授, 主要从事大学物理实验教学工作。

经过长期实验教学的积累、磨砺，并且经过实验室的精心设置和安排，实验内涵比较丰富，但是给学生的印象却往往是实验是不会失败的、永远会成功的。因此学生认为预期的实验的结果是自然会出现的，当它出现了，学生们的反应当然是习以为常、味同嚼蜡。而如果实验不顺利、没有出现预期的结果，往往学生不去分析实验过程中出现了什么问题、怎么样去解决这些问题，而是抱怨实验仪器不好。这时候有些老师也出于对教学负责的好心，往往还会亲自出马，帮助学生“过关”以避免出现一次“失败的实验”。这种实验教学过程和真实的科学探索过程相差甚远，和学生自主的实验要求和能力培养的目标也大相径庭。我们知道，任何科学实验的过程都会出现失败，很多的科学发现都是在大量的探索—失败—探索过程中完成的。因此在实验教学过程中，尽可能地营造一个科学研究的氛围，让学生们真正是在 DIY 自主的氛围中进行实验研究，是实验教学改革的一个重要理念。我们新开的这个实验项目，实际上是一个完整的小课题，其中有不少“关卡”需要学生去克服，不经过认真分析、反复的调试过程，“悬浮”一般是不可能出现的。学生做完这个实验之前，心里一直揣着一个兔子：“能否成功？如何获得成功？”这就使学生的心理处在完全不同的状态。成功了，是他的成就，能不兴奋吗！

## 2 开设此类实验的准备

为了开好这类实验，我们首先作了充分的开课准备，为学生提供了有关实现电磁混合磁悬浮的物理模型和机理的资料以及实现磁悬浮的相应实验技术，学生通过网上预约的方式，提前预订上课时间。在做好充分预习的情况下，在规定的上课时间，由项目指导教师在实验室指导学生 DIY 制作。实验室为学生提供必要的电子元器件、面包板，电烙铁、电压表、示波器等元器件、材料和专用工具。

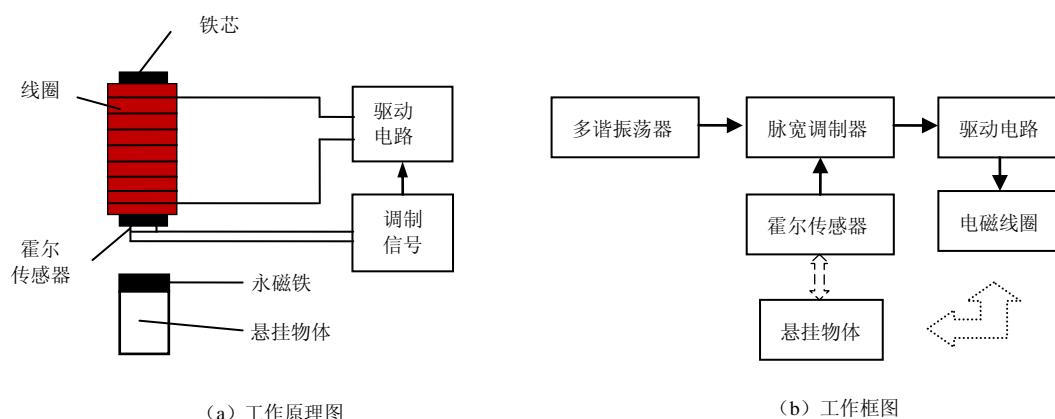


图 1 电磁混合磁悬浮实验的工作原理图和工作框图

整个实验的工作任务流程是：首先弄清楚系统的工作原理，在教师的指导下辨认各种电子元器件和集成元件；根据实验室提供的三块电路板分别焊接组成多谐振荡器、脉宽调制器和线圈驱动控制器；利用测量仪器分别测量分系统的工作状态，保证各电路系统正常工作，记录相应测试现象；利用实验室提供的大面包板，将各分电路系统总装在一起；整机调试，观察实验现象，分析实验过程，如果不成功，要分析原因，适当改变参数，重新调整线路状态，最终实现系统目标；总结本次实验心得体会，提供实验报告，附实验系统正常运行照片。

图 2 和图 3 是是学生上课时和指导教师在讨论问题的场景和最终所完成的作品。

### 3 实验教学效果

一年的教学实践显示，教学效果是令人满意的。全学期选修这项实验的四、五百同学们对所开设的 DIY 实验给出了非常积极的评价。其中我校电子科学与技术系潘越同学做完物理实验“DIY 自制电磁混合磁悬浮实验系统”后，她在自己的实验报告中充满感情地总结了实验后的感触，其中写到“。。我可以毫不夸张的说，这是我所做过的最有意思、最有意义、最有成就感的一次实验，能自己做成一个实用的东西，这是最让人感到喜悦的了。同时这次实验如同一座桥梁，拉近了我与电子制作的距离，让我感到电子世界不再那么晦涩难懂，只要你肯下功夫投入地去做就一定有成果。对于这门新开设的实验，我想给老师们九分的肯定，剩下的一分，请作为开设更多诸如此类有意义的实验的动力吧！”，另一位同学黎斌也写到“经过了一下午的实验，虽然要比其他实验累，但却在实验中得到了更多的东西，同时实验过程也非常享受，锻炼了自己的动手能力。当实验没有按照预期的结果，返回去调试的过程也考验一个人的细心和毅力。总的来说，对这门实验课十分满意。我相信过不了多久，这门课肯定很热门”。

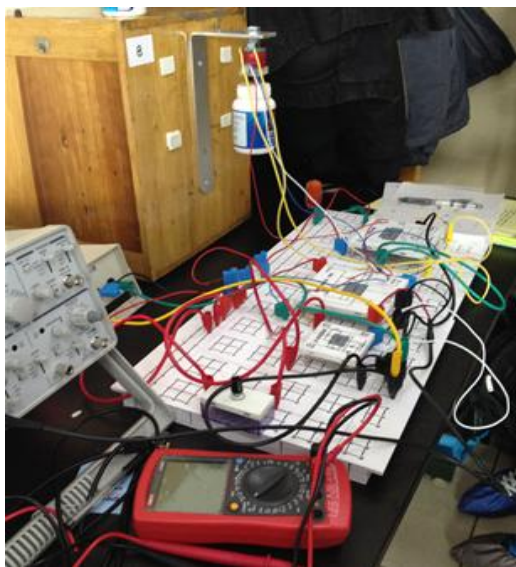


图 2 电磁悬浮实验电路实物图

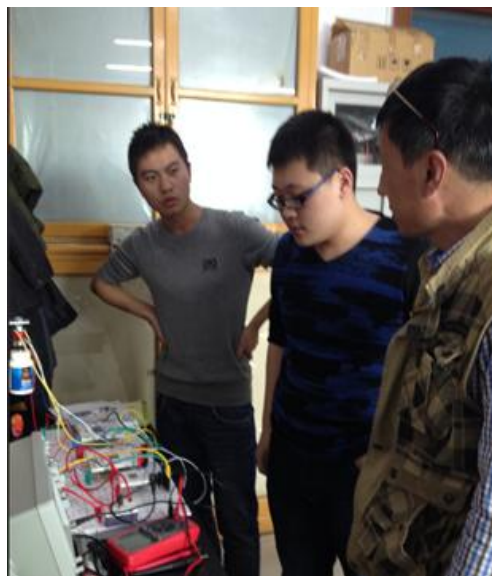


图 3 电磁悬浮实验上课情景图

### 4 结束语

新层次的实验虽然得到了学生的广泛好评，初步达到了开设的目的，但是我们知道其中还有不少需要完善的细节。我们认识到开设这类实验项目对学生和教师来讲都是一种激励，有的同学说做完这个实验对基础实验项目的意义才有了更深入的认识；而对我们教师来讲，不断学习和更新知识、强化对课程教学改革方向的认识，才可能更好的胜任这类实验的教学和课程建设、教学改革工作。我们在 12 周的开课时间里，随时分析学生反馈回的意见和建议，然后及时在之后的教学过程中做出改进和完善。目前我们正在研发另外几个涉及现代实验技术的 DIY 课题实验项目，这些实验的设计思想同样是内容新颖、物理内涵丰富、和实际应用联系紧密、学生可以全面地参与到仪器制作、调试的全过程。相信开出一批这样的新颖 DIY 课题实验以后，一定可以大大提高学生学习的热情和积极性。并进一步强化大学物理实验课程在素质培养和创新能力的培养方面的作用。

## Exploration and practice of “DIY research experiment” in college physics experiment course

ZHAO Hai-fa, LIU Shi-gang, LIU Jian-long, ZHANG Li-bin, GENG Wan-zhen  
(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The updating of teaching content has fell behind the development of modern science and technology; the experiment teaching method is too simple; students are always in a state of passive acceptance and it is difficult for them to actively participate in the whole process of the experiment. These are confusing problems in the teaching reform of college physics experiment course. Our exploration and practice show that adding a new type of experiment which is called the "DIY research experiment" can effectively mobilize the enthusiasm and innovative spirit of students and achieve good teaching results.

**Key words:** College physics experiment; DIY; electromagnetic suspension

# 构建“创新班”大学物理实验课程体系的探索与实践

王爱军, 吴冲, 唐军杰, 吕志清, 冯金波, 赵嵩清  
(中国石油大学理学院, 北京 102249)

**摘要:** 大学物理实验课程是高校理工专业都要开设的公共基础实验课, 是大学生科学素质教育和实践能力培养的一个极重要环节, 是培养大学生的创新意识, 创新思维和创新能力的极重要平台。本文介绍了我校针对创新班学生的特点及人才培养要求构建由基础性、综合性实验、扩展性实验、设计性、应用性物理实验和研究性物理实验构成的创新班大学物理实验课程体系的作法。这一新课程体系实践收到了很好教学效果, 创新班学生的创新意识, 创新思维和创新能力得到了培养, 实践能力得到进一步提高。

**关键词:** 创新班; 大学物理实验; 课程体系

## 1 引言

从上世纪末起, 我国高等教育步入了快速发展轨道, 高等教育毛入学率由 2002 年的 15% 上升到了到 2012 年 30%, 进入了大众化阶段。在推进高等教育大众化进程的同时, 我们也不得不面对这样的现实: 发展不仅需要民族素质的整体提高, 更需要培养各行各业的精英人才, 如何搞好高等教育大众化背景下精英化教育问题, 是我国高等教育界研究的一大课题<sup>[1-2]</sup>。在这一背景下, 各高校针对不同专业开设了“创新实验班”。“创新实验班”体现精英教育理念, 以培养崇尚科学、追求创新、富有社会责任感的、社会急需的研究型创新人才为目标。自 2007 年起, 我校每年在本科生中组建 2—3 个“创新实验班”, 是由入学后通过数学物理选拔考试后筛选出来的、基础比较好的优秀学生。针对优秀本科生的学习能力和特点, 通过单独制定培养计划、单独组班、单独配备教师授课等方式, 因材施教, 体现我校人才培养的精品战略, 为培养高端创新人才打下基础。

大学物理实验课程是高校理工专业都要开设的公共基础实验课, 是大学生科学素质教育和实践能力培养的一个极重要环节, 是培养大学生的创新意识, 创新思维和创新能力的极重要平台<sup>[3-7]</sup>。到 2006 年我校大学物理课程形成了由基础实验、综合性实验和设计性实验构成的层次化课程体系。这一课程体系是面向普通班学生的, 但是针对创新班学生的特点及人才培养要求存在明显不足, 主要体现在以下几个方面。

首先原有课程体系是针对所有学生的, 所以教学内容要求是一样的。而创新实验班学生基础好、动手能力强, 一些实验内容显得简单了, 出现学生“吃不饱”情况, 即在普通班正常 3 个学时完成的实验, 在创新实验班可能只需 2 个学时。其次, 尽管我校大学物理实验课开设有设计性实验, 但是由于实验条件限制, 学生要在 3 个课时内首次接触实验仪器并要进行实验方案的设计、实施及测量过程, 3 个学时远远不够, 学生往往会对设计性实验感到困惑, 不知如何下手, 因此课堂上教师不得不按照传统的教学方法把实验目的、原理、仪器、方法、步骤一一讲解, 这样的教学行为并不能使学生获得充分的独立进行设计的机会, 对学生的实验设计能力培养客观上讲意义不大; 另外由于同一节实验课上的学生所进行的是同一个设计性实验, 学生彼此之间可以互相参考实验方案, 甚至完全照搬, 学生自主实验体现不充分, 设计性实验的意义就无法得到充分体现。再则, 原有大学物理课程教学内容体现物理实验技术与方法在专业领域应用不足、缺乏应用性物理实验内容, 学生常常有一种上物理实验课不知其所用的疑惑。最后, 近年来各高校都在积极探索和实践研究性实验教学。在研究性实验教学中, 学生不是单纯的实验操作者, 而是实验构思和设计的主导者以及实验过程的控制者,

对培养学生的创新实践能力有积极意义,因此在创新班开设研究性物理实验势在必行。

总之,针对原有大学物理实验课程体存在不足,结合创新班学生的特点及人才培养,我们提出构建“创新班”大学物理实验课程教学体系。

## 2 “创新班”大学物理实验课程教学体系构建与实践

### 2.1 基础性、综合性实验

我们从40个大学物理实验项目中精选了12个项目作为创新实验班大学物理实验课程的基础性、综合性实验实验内容。

### 2.2 扩展性实验

大学物理实验课程的扩展性实验包括三部分内容:课堂选做实验、网络虚拟仿真物理实验和学术参观活动。

课堂选做实验是根据基础性、综合性物理实验项目设计的一些实验题目供学生在完成基础性、综合性物理实验项目后选做。要求学生在课堂内完成,并且单独写一个报告。例如在“气轨上的实验---动量守恒定律的验证”实验中设计了“滑块的初始速度对动量守恒定律的验证实验的影响”和“滑块的初始外力的方向对动量守恒定律的验证实验的影响”选做实验题目;在“用拉伸法测量钢丝的弹性模量”实验中设计了“分析改变光杠杆的放大倍数对测量结果的影响”和“实验中当放置望远镜的桌面受到一定外力作用时,实验结果有何不同?”选做实验题目;在“刚体转动惯量的测定”实验中设计了“转盘和绕线的水平对实验精度有影响吗”和“遮光棒位置(或刚体初始角速度)对实验结果又影响吗?”选做实验题目等等。选做实验主要由学生独立完成,如果课堂不能完成且学生有兴趣,可以课后继续做实验。选做实验完成后,要求学生写一份单独实验报告,报告要求相对简单,写出实验原理,列出实验数据,分析实验数据及误差,给出实验结论。在教学过程中尽管学生能顺利甚至圆满完成基础性、综合性实验的实验内容,但在实验过程中存在的一些问题,学生并没有意识到或没有去主动思考。通过课堂选做实验这一环节,不仅使学生对所做的基础性、综合性实验有了深入了解,更重要的是培养学生学会思考问题。

依托近现代物理发展起来的新技术、新方法日新月异、层出不穷,并切在工程领域得到了广泛应用,产生了明显经济效益。通过物理实验课程使学生了解和掌握与新技术、新方法相关的现代物理原理是十分必要的。受学时、实验房间和仪器设备的限制,学生可做的物理实验项目数是有限的,特别是工科学生很少接触近现代物理实验,网络虚拟仿真技术为解决这一问题提供了思路<sup>[8-9]</sup>。为了扩展学生的知识面我们开设了网络虚拟仿真物理实验,虚拟仿真物理实验内容贴近近代物理如迈克尔孙干涉仪、光电效应和普朗克常量的测定、GM计数管的研究、 $\gamma$ 能谱实验、喇曼光谱实验、透射电子显微镜、法布里-泊罗标准具实验、动态测量磁滞回线等。学生从这些实验选做其中的任意两个实验项目。同时开发了网络虚拟仿真物理实验管理系统。学生完成网络虚拟仿真物理实验过程如下:学生在做虚拟仿真实验前,必须查阅相关资料,熟悉该实验的目的、原理、及操作内容,书写相关实验的预习报告;通过事先预设,在虚拟仿真系统内设定每个学生完成实验的时间段,在学生做实验过程中系统自动记录学生实验操作过程和所用时间,同时记录下实验相关数据。学生在电脑上完成实验操作后须提交其操作过程记录,存于服务器以备查;在实验课结束后,学生撰写实验报告并上交;通过查看学生提交的实验操作过程内容及上交的实验报告,给出虚拟仿真实验的最终成绩。

### 2.3 设计性物理实验

设计性物理实验与基础性、综合性实验不同,是在学生掌握了部分基础性实验、具备了一定的实验基础知识和实验能力之后进行的一种教学实践活动,重点在于培养学生的实验设计能力、实践探索精神。针对现有设计性物理实验存在问题,我们建设了专门的设计性物理

实验室,提出一种全新设计性实验教学模式,面向创新班开设设计性物理实验课。设计性物理实验教学内容由8个不同设计性物理实验组成。设计性物理实验室为每个实验提供设计性物理实验任务书,设计性物理实验任务书包括实验名称、任务、仪器和必要文献,学生根据任务书进行文献阅读,撰写实验方案(包括实验原理、实验内容和实验步骤),实验方案通过教师审核后方可实验,实验完成后要对实验方案进行修订,两次实验方案作为考核的重点。同一课堂每组学生的设计性实验题目不重复,每次课学生随机抽取实验题目。学生在课堂未能完成实验,可在课后其它时间补做。

#### 2.4 应用性物理实验

通过将工程光学实验内容引入创新班大学物理实验教学,建成由16个实验项目构成的应用性物理实验内容,每名学生选作为其中2个实验,共计6个学时。这些实验体现光学技术在工程中的应用,例如激光位移计—CCD的工作原理与应用、激光散斑测量横向微小位移、温度场测量、光纤传感器测容器压强、用光纤位移传感器测定材料的杨氏模量等。我们将工程光学实验作为应用性物理实验内容引入大学物理实验教学为解决目前在物理实验教学过程中存在的体现物理原理、技术和方法在实际中应用弱的问题提供了一条思路。

#### 2.5 研究性物理实验

研究性实验是指:组织若干个围绕基础物理实验的课题,由学生以个体或团队的形式,以科研方式进行的实验。研究性实验的目的是使学生了解科学实验的全过程、逐步掌握科学思想和科学方法,培养学生独立实验的能力和运用所学知识解决给定问题的能力(摘自2004年教育部高等学校非物理类物理基础课程教学指导分委员会颁发了《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》)。

当前,面向工科学生开设研究性物理实验需要研究和探索以下问题<sup>[10-12]</sup>。研究性物理实验教学是一种教学活动又是一种科学研究模拟活动,研究性物理实验教学的教学管理体制和运行模式如何,即实施研究性教学如何才能做到既要体现创新教育所倡导的探究性原则、开放性原则和独立性原则,也要有规范的教学管理制度来保证质量。现有大学物理实验课程的物理实验条件能否满足研究性物理实验教学要求;如果不满足,如何建设适合工科学生进行研究性物理实验教学的实验条件。如何解决工科学生物理基础弱的问题,工科学生只是通过大学物理课程和大学物理实验课程系统学习物理理论知识和实验技术,对于那些偏重物理问题的研究性实验项目,由于基础弱完成有难度,学生兴趣不高。大学物理实验课是工科院校本科生公共基础课,它的定位在于为专业学习打基础,研究性物理实验教学内容如何结合学生专业背景、体现物理学原理和方法在解决专业问题上应用。针对上述一系列问题,我们提出了以专题物理技术学习和应用为核心、结合学生专业背景、体现物理学原理和方法在解决专业问题上应用来开展研究性教学的思路,提出了建设研究性物理实验教学仪器平台的解决方案。研究性物理实验教学仪器平台由仪器系统和通用工具类仪器组成。仪器系统能开出涉及某一物理技术的多项研究性实验,研究性物理实验教学仪器平台具备二次开发条件,即通过适当改换样品、增减附件就可以开发出新的研究性实验项目;通用工具类仪器的精度和技术水平达到和接近科研要求。开设的研究性实验,包括物理技术基本物理学习、物理技术常用仪器工作原理及性能的研究性和物理技术结合专业应用的研究性实验。实验项目既要使学生能系统学习物理技术,又要能与专业相联系,体现物理技术在解决专业问题上的应用;实验内容要能充分锻炼学生的动手能力(如调节光路、加工样品、制作电路等),要为学生独立地进行实验设计留出足够空间,研究性实验不能只是调节仪器、记录数据、写实验报告这样一个过程。从2007年用近两年时间建设完成了由若干个研究性物理实验教学仪器平台构成的物理创新实验室。2010年编写出版了《研究性物理实验》,该教材被列入石油高等教育“十一五”规划教材,是我校第一部面向研究性教学的教材;并向10、11级创新班开出《研究性物理实验》课程。同时,通过制订了详细可行的《研究性物理实验》课程教学组织和管理



制度来保证教学质量,如下:

《研究性物理实验》课程教学组织制度:物理创新实验室对学生全天开放,学生自己选择实验时间,以学生独立完成实验为主,教师指导为辅;学生首先通过阅读讲义独立完成基础型研究性实验,写出实验报告;教师提供应用型研究性实验题目或学生自拟题目;调研写出开题报告;开题报告约2000字,内容包括文献综述、研究意义、实施方案和参考文献。教师审阅开题报告提出修改建议,开题报告通过后,学生开始实验;学生完成项目后要写出研究报告或撰写科技论文;最后指导教师对学生的科研能力进行综合评价、同时要求学生写出课程小结。

《研究性物理实验》课程教学管理制度:管理制度应涉及以下几个方面。规定完成课程时间6—8周,对学生完成《研究性物理实验》课程阶段内容有时间上和质量上的要求,达不到要求的教师可终止学生该课程学习;学生定期向指导教师汇报课程进展;学生要写工作日志,特别要求学生要记录在实验过程中遇到问题以及如何解决问题的;规定课程考核方式,教师根据文献调研和外文应用能力、方案设计与实验技能、分析和解决问题能力、科研报告或论文质量、工作态度、团队精神和成果七个方面对学生的科研能力进行综合评价,给出评分,写出评语。

这种以专题物理技术学习和应用为核心、结合学生专业背景、体现物理学原理和方法在解决专业问题上应用来开展研究性教学的思路具有创新性,其理论研究和实践工作为工科院开展研究性物理实验教学开辟一条新路。研究性物理实验也是我校面向本科生正式开设的第一门研究性课程;研究性物理实验课程规划和管理制度设计充分体现了实施创新教育要遵循的主体性原则、个性化原则、探究性原则、民主性原则和实践性原则,为科学化、制度化开展研究性教学,建立创新教育模式提供了可以借鉴的思路。

### 3 结语

大学物理实验课程是高校理工专业都要开设的公共基础实验课、是大学生科学素质教育和实践能力培养的一个极重要环节,在培养创新人才的发挥着重要作用。本文介绍了我校针对创新班学生的特点及人才培养要求构建创新班大学物理实验课程教学体系的一些做法。这些做法收到了很好教学效果,创新班学生的创新意识,创新思维和创新能力得到了培养,实践能力得到进一步提高。2013年12月我校物理教学示范中心以优异成绩通过北京市高等学校实验教学示范中心验收,评审专家对我校构建创新班大学物理实验课程教学体系的探索与实践工作给予高度评价。2014年3月我校大学物理实验教学团队被中国石油大学(北京)批准为首批“校级优秀教学团队”建设单位。

### 参考文献:

- [1] 覃焕昌,周秀苗。高等教育大众化背景下精英教育课程改革的思考[J]。高教论坛,2009,11(1): 67-69。
- [2] 潘懋元。大众化阶段的精英教育[J]。高等教育研究,2003,24(6): 1-5。
- [3] 张锐波。新世纪大学物理实验培养综合性人才途径的探讨[J]。实验技术与管理,2011,29(5): 168-171。
- [4] 孙腊珍,张增明。以培养学生能力为核心,建立多层次实验课程体系和多元化教学模式[J]。实验技术与管理,2012,29(4): 1-2。
- [5] 胡成华,史玲娜。大学物理实验教学创新模式的探索与实践[J]。物理与工程,2012,22(1): 44-46。
- [6] 赵艳艳。大学物理实验教学现状及改进措施研究[J]。高校实验室工作研究,2011,109(3): 34-36。

- [7] 高英俊, 邓文, 吴伟明. 大学物理实验新体系的构建与实践 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2007, 32(增刊): 370-372.
- [8] 荣振宇, 邵明辉, 童艳荣, 等. 基于网络的大学物理实验自主学习与评价平台的建设 [J]. 高校实验室工作研究, 2012, 111 (1): 56-57.
- [9] 邢红宏, 梁承红, 柳叶. 网络课程在大学物理实验教学中的应用探索 [J]. 实验技术与管理, 2011, 28 (10): 127-129.
- [10] 孙维民, 赵丽军, 赵褰, 等. 开设研究性与创新性实验提高学生创新能力 [J]. 实验室研究与探索, 2012, 31 (7): 124-126.
- [11] 董有尔, 郜江瑞, 王彦华, 等. 四种教学模式连动, 全过程开展研究性物理实验教学 [J]. 实验技术与管理, 2012, 29 (5): 6-9.
- [12] 陈水桥, 李海洋, 陈洪山, 等. 多元化物理课题实验课程的建设和探讨 [J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(12): 118-121.

## 加强制度建设、保障实验教学质量

冯金波, 王爱军, 张国林, 唐军杰, 刘淑霞, 刘卫红, 杨振清, 赵 卉  
(中国石油大学(北京)理学院 物理系, 北京 102249)

**摘 要:**本文介绍了我校物理实验教学中心建设和实践一种常态化实验教学动态质量监控体制的情况。

**关键词:**实验教学; 制度建设; 动态质量监控

### 1 引言

众所周知,公共实验课的教学工作涉及部门多、人员杂、教学环节多、上课教师人数多、上课时间灵活、有些还实行开放教学,因此加强教学与实验室的管理是保证实验教学质量根本<sup>[1-5]</sup>。但是,长期以来我国高校在实验教学工作方面普遍存在的一个问题,就是虽然有各级部门的教学评估,由于评估周期过长(5年左右),对于实验教学工作的及时了解和评估事实上是滞后的。因此,我们提出通过制度建设和制度创新,针对实验教学的各个环节,创建一个常态化的实验教学动态质量监控体制。

### 2 常态化的实验教学动态质量监控体制

#### 2.1 实行按实验教学的环节进行监控的模式

传统的实验教学管理制度大都是针对人、财、物(设备)、信息(课程)来制定的,这是一个比较全面、宏观、静态的管理模式。可是实验教学过程是一个由多个环节构成的动态过程,因此需要从实验教学的各个环节入手建立一种实时的、动态的管理和监控体制。

#### 2.2 通过《档案管理制度》规范和记录各个环节的教学行为

教学活动有两个主体:教师和学生。下面分两条线,从实验教学所涉及的各个环节展开介绍。

第一,针对教师“教”

##### 1) 实验仪器设备的购置和开发

制订了《新增实验项目审批制度》,规定新增任何一个实验项目都必须经过申请、审批、执行和验收这几个过程。制订了《物理实验教学中心经费申请和使用制度》,为积极开发新实验项目或新实验内容的教师提供资助。

##### 2) 实验技术人员准备实验项目

制订了《实验技术人员日常工作基本要求》,要求实验技术人员在开课前准备好实验器材,并填写《〈大学物理实验〉课前实验项目准备情况统计和物品购买申请表》。

##### 3) 教师预做、集体备课

制订了《〈大学物理实验〉课程任课教师的教学基本要求》,把教师分成若干教学小组进行预做和集体备课,并填写《集体备课记录表》;此外,还要求教师的教案、实验报告等教学文件存档。

##### 4) 教师展开实验教学

要求教师按集体备课的成果展开实验教学,在课堂上使用《实验操作评分标准表》,并

**作者简介:**冯金波(1976—),男,新疆石河子人,中国石油大学(北京)理学院物理系讲师,硕士,从事大学物理实验及大学物理的教学工作。

填写《课堂教学记录表》（该表供实验技术人员查看）。

下面以“用分光计测单色光波长”的实验项目为例（表 1），介绍一下《实验操作评分标准表》的使用。

表 1 实验操作评分标准

实验项目		评分指标
用 分 光 计 测 单 色 光 波 长	基本要求	预习（预习报告、课堂提问等）
		仪器使用（规范、熟练等）
		数据测量（读取、有效位数、单位等）
		仪器归位（开关、旋钮、位置等）
	特定检查点	望远镜调节（目镜、光轴方向）
		平行光管调节（狭缝，光轴方向）
		光栅平面垂直于平行光管光轴
		衍射角的测量
	其它	实验中“意外”情况的处理能力
		创造性的意见、建议

表 1 中的“基本要求”是适用于所有实验项目的通用指标，用以引导学生养成一个良好的实验习惯。表中的“特定检查点”，是学生完成后必须主动请老师检查的实验内容，实际上是完成整个实验操作所必须经历的一个个阶段性目标。表中的“其它”是对学生解决问题能力和创新能力的鼓励。

#### 5) 实验仪器设备的日常维护

制订了《实验用品管理制度》，把仪器设备、保管品和耗材分类放置，统一管理，并实行领用登记制度（即实验技术人员按需要向管理人员领用并登记），实现了对每一个实验用品从购入到报废整个过程的监管。此外，还要求实验技术人员每天与任课教师沟通，了解学生使用仪器的情况，查看任课教师填写的《课堂教学记录表》，并填写《实验技术人员工作日志》。

#### 第二，针对学生“学”

##### 1) 预习

制订了《<大学物理实验>课程的教学程序及基本要求》，要求学生在上实验课之前，必须先预习，并完成由实验教学中心编制的预习报告，上课时由教师检查。

##### 2) 考勤和使用实验室

实验教学中心执行严格的考勤制度，明确告知学生迟到和旷课的后果。制订了《学生使用大学物理实验室的管理规定》，规范学生使用实验室和实验仪器的行为。

##### 3) 进行实验操作

学生按《实验操作评分标准表》的要求，独立完成每一个实验内容，并接受教师的检查。该表只设定了实验操作的阶段性目标，而并没有规定实现这些目标的手段，从而给了学生较

大的自主权,贯彻了由教师组织和引导的“学生自主学习的教学模式”。学生测得实验数据后,必须接受教师的检查,并由教师签字。

4) 整理仪器和清扫实验室

学生在完成实验操作后,必须整理仪器,并填写《仪器使用情况记录表》。每次最后做完实验的两个同学负责清扫实验室。

5) 书写实验报告

每次完成实验后,学生必须按《实验报告评分标准》的要求完成实验报告的书写。

6) 成绩评定

学生最终的成绩由3个部分按一定比例组成。这3个部分是:实验操作成绩(依据《实验操作评分标准表》给出),报告成绩(依据《报告评分标准》给出),绪论课考试成绩。

### 2.3 通过《实验教学督导制度》实时监控各个环节的教学行为

为此,做了两方面的工作:

第一,实行《物理实验教学中心周例会制度》,参加者有实验教学中心的正副主任、实验课程的负责人、全体实验技术人员和部分实验课教师,通过每周的例会及时反馈和纠正实验教学中出现的各类问题。

第二,成立“实验教学督导组”,小组成员包括:实验教学中心的正副主任、实验课程的负责人和两名有教授职称的任课教师。该小组每学期定期和不定期地开展教学活动,实时监控实验教学的各个环节。主要职责包括:(1)指导和监督实验仪器设备的选择、开发和更新等工作;(2)每学期抽查1~2次全部实验技术人员的仪器准备情况,给出量化评价结果;(3)指导和监督实验教学活动的开展情况,如,参加各教学小组的集体备课;每学期随机听取部分任课教师的授课,并反馈听课结果;(4)定期向学生发放问卷,调查学生的学习情况。

## 3 结论

中国石油大学(北京)的《大学物理实验》教学,自从2011年加强制度建设以来,已经取得了多方面的显著成效。首先,所有的教师都感觉到,无论学生们的实验习惯,还是自主学习能力、动手能力都比此前有较大的提高;近三年仪器损坏率也呈逐年降低趋势;2014年5月,我们随机抽取260名已学完本课程的学生进行问卷调查,有77%的学生认为学习《大学物理实验》课程有助于其形成自主学习的习惯,这为其日后进一步的学习和工作奠定了良好的基础。其次,通过制度建设提升了我校物理实验教学中心的整体管理水平,2013年12月5日,北京市高等学校实验教学示范中心验收时,评审专家对我们的制度建设工作给予了高度评价;2014年3月7日,“大学物理实验教学团队”入选我校首批校级优秀教学团队。

### 参考文献:

- [1] 熊永红. 工科物理实验教学改革的实践与探索[J]. 物理实验, 2005, 25(2): 28-30.
- [2] 周合兵. 构建实验教学质量保障体系的实践与探索[J]. 实验室研究与探索, 2006, 25(6): 713-716.
- [3] 罗梅娟. 对构建高校实践教学质量监控机制的思考[J]. 北京邮电大学学报(社会科学版), 2008, 10(4): 71-74.
- [4] 陈立君. 高校实验教学质量监控体系的探索与实践[J]. 实验室科学, 2009(3): 52-54.
- [5] 韩春田. 高等院校实验室建设与管理工作探讨[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(8): 189-191.

## Strengthen the system construction and improve the quality of Experiment Teaching

FENG Jin-bo, WANG Ai-jun, ZHANG Guo-lin, TANG Jun-jie, LIU Shu-xia,

LIU Wei-hong, YANG Zhen-qing, ZHAO Hui

(Department of Physics, College of Science, China University of Petroleum (Beijing),  
Beijing 102249, China)

**Abstract:** This paper presents a dynamic experimental teaching quality monitoring system, it is by our school physics experiment teaching center created and carried out the practice.

**Key words:** Experiment Teaching; Management system construction; Dynamic quality monitoring

## 量子信息前沿实验课程设计

陈 凯, 刘乃乐

(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027)

**摘 要:**中国科学技术大学将近年来发展成熟的量子信息技术和著名的实验方案融入研究生和高年级本科生的实验教学中,设计开展了小型纠缠源实验系统、BB84 量子密钥分发实验系统、B92 量子密钥分发实验系统、单光子干涉和双光子干涉实验系统、量子成像实验系统等一系列国内首创的新型实验课程。

**关键字:**量子信息; 高年级本科生; 纠缠源; 量子保密通信; 双光子干涉; 量子成像

当前在国际上,量子信息技术理论和实验研究是一个成果频出的前沿热点领域。近年来,中国科学技术大学微尺度物质科学国家实验室量子物理与量子信息研究部在开展量子信息科技前沿研究的同时,也重视将近年来发展成熟的量子信息技术和著名的实验方案融入研究生和高年级本科生的实验教学。本研究部研制了小型纠缠源实验系统、BB84 量子密钥分发实验系统、B92 量子密钥分发实验系统、单光子干涉和双光子干涉实验系统、量子成像实验系统等一批国内首创、独具特色的教学仪器设备,并编制了相关的实验手册。在此基础上,2013年上半年,我校投入300万元重点建设了国内高校首个量子信息教学创新示范实验室,并开设了本科5级实验课程《纠缠源的产生与应用》、《量子保密通信实验》、《光子干涉实验》和《量子成像技术》。

我们在2013年下半年主讲了本科5级实验课程《纠缠源的产生与应用》和《量子保密通信实验》。本课程得到了校教务处和物理实验教学中心的大力支持。实验学生超过130人次(由于是第一次开课,做了人数限制,以后有了很好的教学经验后可以扩大规模)。实际实验过程中,还有很多未能同时选上这两个实验的同学还要求继续做另一个未能选上的实验。我们在教学条件允许的情况下,还尽量给予了满足。学生们做完实验后反响非常好,表示学校应该继续开设相关课程。可以说我们圆满完成了实验教学任务,达到了预期目标。

两个量子信息实验的设立和运行得到了校教务处和物理实验教学中心的大力支持。我们会同物理实验教学中心完成了实验室建设、实验仪器采购、和相关教学设施的配套。按照学校实验教学要求,我们进行了理论课的教学,实验教学讲义的编写,实验内容的设计等。我们还自行设计了实验室的宣传展板,提前进行了实验室相关仪器的操作、运行和调试维护。

该课程自开课以来学生反应普遍较好。学生们踊跃参与,给予了很好的评价。以下是部分同学做完实验后的评价、感想和体会:

“通过实验真实体会到了量子通信的优越性及技术实现上的精巧”

“深刻感受到了量子力学的神奇与魅力!”

“我们的思维不能受直观经验的约束,在做物理研究的时候要更多的使用逻辑推理的力量!”

“量子纠缠很神奇,而且确实存在!”

“量子信息是完全不同于经典世界的全新领域。”

“感受到了量子力学的神奇与精确的预言。”

“觉得量子纠缠现象很神奇,对一边的影响能立即对另一纠缠光子发生影响,这种性质十分奇特!”

“量子力学的现象可以通过巧妙的实验观测证实。”

“纠缠态果然不愧为量子效应最明显，最能区别于经典的现象。”

“量子通信很有前途，希望能尽快看到它投入广泛使用的一天！”

“本实验让我认识到了量子通信的保密性和可行性，解决了心中的诸多困惑！”

“实验需要耐心、细心，操作应当规范。出现问题要先独立思考，检查光路发现错误并及时改正，而且要注意与队友合作。”

“本实验操作看似十分简单，但是却充满玄机。...实验的设计也十分巧妙，很有新意。”

“作为世界上首批应用量子加密方法加密传送图片的同学来说，感觉很不错，谢谢各位老师！”

“第一次在实验中亲手实现了量子保密通信，感受到了量子实验的神奇，看似复杂的原理实际并不复杂，物理原理很明晰。”

“该实验让我们亲身体验到在微观体系中，量子叠加性是自然存在的。”

“量子实验总可以使人深思，体会其奇妙之处。”

“第一次做量子实验，真切的感受到了量子理论用于实验，解释实验结果，更相信量子力学。”

“扩大实验室规模，让更多的人感受到这一点。”

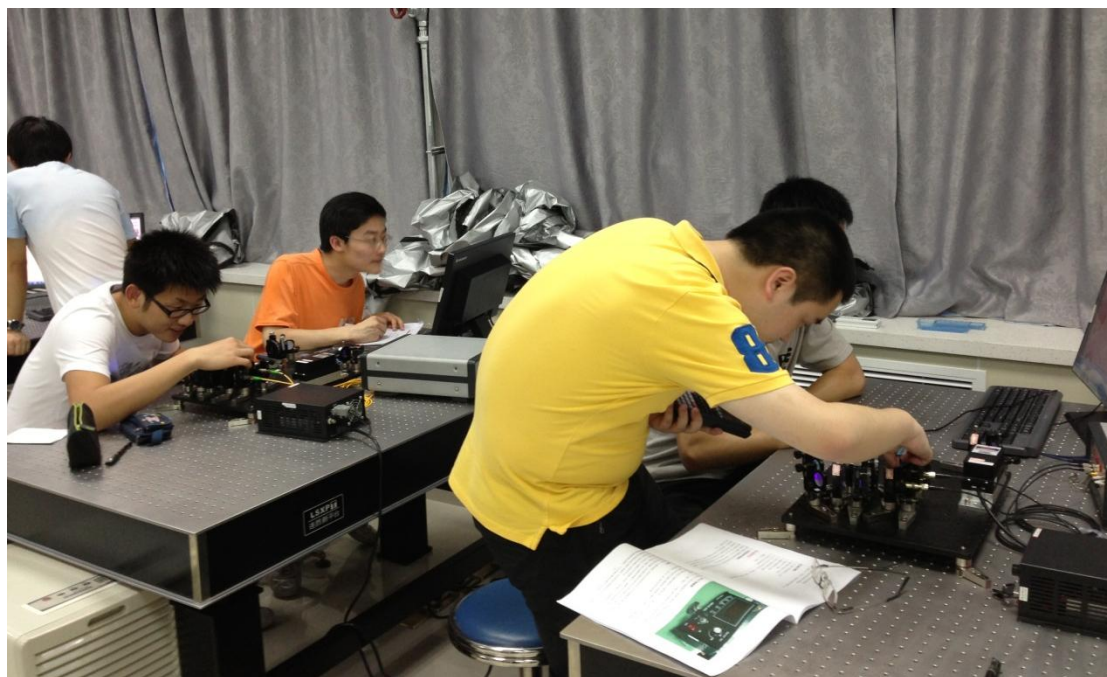
“本实验中操作简便，却充分展示了量子通信的高度保密性上的巨大优势，因而其在将来的应用前景也是不可限量的！”

今后，我们会持续地将影响重大的前沿科研实验引入到研究生和高年级本科生的实验教学中，为更好更快地培养高级科研人才做贡献。



观察结果





动手调试



理论讲解



教学示范

## Quantum information frontier experiment curriculum design

CHEN Kai, LIU Nai-le

(University of science and technology of China, 230027, China)

**Abstract:** University of science and technology of China in recent years transform famous experiment scheme of quantum information into graduate and senior undergraduate experimental teaching, and design a series of new type experimental course including small entanglement source experiment system, BB84 quantum key distribution system, B92 quantum key distribution experiment system, single photon interference and two-photon interference experiment system, quantum imaging experiment system, etc

**Key words:** quantum information; Senior undergraduate; entangled photon source; quantum secret communication; Quantum imaging; two-photon interference

# 军校大学物理实验教学改革探索

林上金, 胡 澄

(解放军理工大学 理学院, 江苏 南京 211101)

**摘 要:** 针对军校当前大学物理实验教学的突出矛盾, 探索与“三性”实验的特点相应的实验教学模式, 采用多种模式连动的差异化教学模式, 发挥各种模式的优势, 体现综合效能。以实验学案的“问题”牵引学员进行实验全过程, 引导学员学习实验的“三基”, 培养动手能力, 提高教学效果, 提高适应第一任职的实践能力。

**关键词:** 大学物理实验; 多模式联动; 动手能力; 教学效果

大学物理实验课程是军队综合大学学员接受系统实验方法和实验技能训练的一门重要课程。大学物理实验的教学过程中, 学员可以直接观察和分析物理现象, 学习和掌握基本的物理实验方法, 并将物理知识与实践有机结合起来, 从而培养他们观察事物、分析事物、提出问题、探究问题、解决问题的能力。大学物理实验课程教学模式研究是当前高等教育中的一个热点<sup>[1-3]</sup>。它对于提高和培养学员的科学素养、实践能力和创新精神, 对于军事指挥人才知识构成、文化修养、综合素质和创新能力的培养与未来的发展将发挥基础性的长效作用, 在“精英教育”中占有重要地位。

## 1 当前大学物理实验教学的突出矛盾

### 1.1 教学转型对实践能力要求提高与学员认识不足的矛盾

随着大学转型建设和信息化条件下联合作战指挥人才培养需要, 大学的培训任务由专业技术人才的学历教育为主转型为初级指挥人才的学历教育为主。总部明确要求, 初级指挥官学历教育阶段的培养目标是完成普通本科学历教育, 同时进行军政理论教育和军事基础训练, 为学员的任职培训特别是未来长远发展打牢思想政治基础、科学文化基础、军事素质基础和身体心理基础<sup>[4]</sup>。可见, 为实现初级指挥生长军官培养的目标要求, 应突出指挥职业指向, 必须强化军事技术培育和体能训练, 具备初级指挥人才的基本条件; 同时又必须完成国家规定的高等学历教育, 具备工程技术领域的专门知识和实践能力, 具备良好的综合素质。

然而, 由于我国教育长期“重理论, 轻实践”畸形发展, 学员在观念上存在着重理论轻实践, 重物理理论学习轻物理实验的倾向, 对物理实验只是停留在理论认识层面上。对物理实验的作用认识有偏差, 对人才素质的培养缺乏整体观念。有的学员认为物理实验课不重要, 是选修课或者是大学物理理论课的附属课程, 物理实验课可有可无, 上课只是觉得新鲜好玩, 摆弄一下实验仪器, 抄抄数据敷衍了事; 大学物理实验对于学员实践能力的培养效果甚微。所以, 教学转型对实践能力要求提高与学员认识不足的矛盾, 是当前大学物理实验教学的一个突出的矛盾。

### 1.2 教学模式单一与实验类型多样性的矛盾

目前, 我校大学物理实验课程已经根据《军队院校本科教学工作评价指标体系》中对“三性”实验的界定, 进行了“三性”认证(即: 基础实验、综合性和设计性实验、自主性实验)。

**基金项目:** 解放军理工大学 2013 年教育教学课题(编号: GJ1307033)

**作者简介:** 林上金, 男, 1962—, 硕士, 副教授, 研究方向: 实验流体力学与大学物理实验教学。

然而,大学物理实验课程教学模式却多采用传统的知识传授式的教学方法和封闭式的教学手段,还不适应“三性”实验的特点,缺乏针对性。实验教学从属、依附于理论教学,整个实验过程中,教员全程指导,几乎把所有的事情都做完了,学员只须“照方抓药”,按照教材的实验步骤按部就班地进行操作,根本不用去思考就能完成实验,处于被动的学习状态。学员学习的积极性和主动性被遏制,致使相当一部分学员不重视大学物理实验、敷衍了事,甚至出现相互抄袭实验报告的现象,实验报告千篇一律。它无法激发学员的学习兴趣,不利于培养学员的分析能力、创造能力和解决问题的能力,限制了学员勇于探索、创新的精神;对开发学员的创新思维、培养学员研究问题的能力的作用是有限的,不利于学员的综合素质和创新能力发展。教学效果很不理想。

针对这一现状,从提高教学质量和创新教育出发,必须对旧的教学模式进行改革。从创新能力培养的角度,让学员积极主动地做实验,激发学员的科学思维和创新意识,强化训练学员的实验实践能力,构建适应初级指挥人才培养的教学模式。

## 2 构建适应初级指挥人才培养的物理实验教学模式

大学物理实验课程教学的本质特征就是引导学员积极参与有结构的经验学习。一方面是体现以学员为中心,让学员掌握一定的操作技能,熟悉常用的科学探索方法,加强理论知识理解力,揭示各种现象的变化过程以及对这种变化过程的描绘和预测,在实验室通过仪器操作再现前人的经验;另一方面以这些经验为指导对新问题进行探索,培养学员的创新思维 and 创新能力。所以,大学物理实验课程在培养学员的创新精神、科学素质和实践能力方面具有不可替代的作用;它通过对物理规律的探究学习引导学员学会学习,掌握探究科学本质的方法,为终身学习和工作奠定基础,为军事指挥人才积累发展后劲。

教学模式是指在一定教学思想或教学理论指导下建立起来的、较为稳定的教学活动结构框架和活动程序,是构成课程和作业、选择教材、提示教员活动的一种范式或计划<sup>[5]</sup>。大学物理实验课程既是一个有机整体,各部分的教学内容又相对独立。所以,大学物理实验课程教学模式应当是以多元化教学内容为载体,系统化实验格局为平台,并且与教学内容匹配的多种模式连动的差异化教学模式。依据大学物理实验课程“三性”界定,以当下流行的三种学习理论为指导,构建了系列教学模式,从基础操作入手,培养学员的动手能力及操作技能;到综合性、设计性实验,培养学员理论知识的应用能力及实践能力;再到自主性实验,培养学员的科研能力和探索精神;立足于“以学员为主体、教员为主导”,从人才培养体系的整体出发,激发学习兴趣,培养学员的应用能力和创新能力,发展学员的创造性思维。

### 2.1 以行为主义学习理论为指导,构建基础性实验的导学式教学模式

行为主义理论认为学习是“刺激—反应(S-R)”系统,学习过程是接受外界刺激的过程,教员提供外部刺激,即向学员传授知识,学员则是接受外界刺激,即理解和吸收教员传授的知识。教学的目的就是一种最有效的方式向学习者传授和迁移知识;教学设计上就是强调外部的刺激,使所有个体在相同的教学活动中,达到同一个教学目标。教员要设计良好的环境和活动通过教学促进“刺激—反应”联结,来促进学员获取刺激信号的能力。基础性、验证性实验是学员接触大学物理实验课程后,起步阶段的教学内容,教员要在教学过程中充分发挥自身的主导地位,利用导学案进行具体而有效的“刺激”,运用各种引导方法,通过细致有效的引导,培养学员实验操作的规范性,促进学员对所学理论知识的巩固和以及相关物理规律的理解,并能够掌握基本的实验技能和方法,以及物理实验中常用的数据处理方法和实验结果分析方法,同时养成良好的实验习惯。

### 2.2 以认知主义学习理论为指导,构建综合性、设计性实验的问题牵引式教学模式

认知主义理论认为学习是外界刺激和认知主体内部心理过程相互作用的结果。学习过程是每个人根据自己的态度、需要和兴趣爱好并利用过去的知识经验对当前的外界刺激(如教

学内容)主动作出的有选择的信息加工过程。教学就是要通过安排适当的外部条件来影响和促进学习者的内部心理过程。综合性和设计性实验是学员已初步具备了实验的基本理论、基本方法和基本技能后展开的教学内容,其目标是培养学员解决实际问题的能力。教员通过巧妙创设问题、设置情境,强化外部刺激,引导学员如何发现问题,如何动手解决问题,在解决问题过程中如何发现新的问题,以问题为中心来展开教学活动,使教学活动自始至终围绕着问题的探索 and 解决展开,最后解决问题并进行总结,达到引导学员由浅入深探究问题,逐步内化知识的目的,在给学员留出足够的思维与操作空间同时,着重培养学员独立思考、独立操作、独立运用所学知识分析问题和解决问题的能力。美国教育家杜威(John Dewey)提出了“五步教学法”,即“困难—问题—假设—验证—结论”,从而把问题式教学法程序化、模式化<sup>[6]</sup>。学员的学习活动与问题相结合,以探索问题来引导和维持学员的学习兴趣和动机,让学员带着问题思考、带着问题探究,使学员拥有学习的主动权。教员创设特定的问题情境,引导学员在解决所面临的问题中主动获得和运用一定的知识技能,发展其学习主动性和解决问题的能力。

### 2.3 以建构主义学习理论为指导,构建自主性实验的自主探究式教学模式

建构主义认为学习的实质是学习者积极主动地进行意义建构的过程,即学习不是由教员把知识简单地传递给学员,而是由学员自己建构知识的过程。学习不是被动接受信息刺激,而是主动建构意义,是根据自己的经验背景,对外部信息主动地选择、加工和处理,从而获得自己的意义。自主性实验是大学物理实验课程的提高阶段教学内容,为少数学有遗力且有自主探究兴趣的学员开设,引导学员运用科学探究的方法(即学员用以获取知识、领悟科学的思想观念、领悟科学家研究自然界所用的方法而进行的各种活动,包括观察、测量、制作、提出假设、进行实验、提出模型和交流)进行学习,主动获取知识、发展能力。学员以实验导学案为基础进行实验原理和实验方案的分析和设计,教员采取提问和讨论的方式对学员进行指引,找出各个控制要素间的关系和实验难点,并可对实验探究方案进行适当调整或重新设计,得到最优化的实验方案。在此基础上,学员独立地探索,自行解决问题。根据收集的各种证据,及时进行分析和处理,得出结果和结论。然后,评价实验是否验证了物理概念与规律,是否发现奇异点,是否达到实验目标。最后,总结和检验实验对理论验证的可信度,分析实验中出现的异常现象,写出实验报告或小论文。在整个探究活动中,学员充分发挥主体能动作用,相对独立地建构知识并不断调控自己的学习进程和学习状态的一种学习方式,它具有主动性、相对独立性、反思性、建构性和创新性。通过自主探究学会学习和掌握探究科学本质的方法,发展学员的创造性思维,培养创新能力,为终身学习和工作奠定基础,有利于学员科学思维方式形成和可持续发展。

大学物理实验课程的教学模式必须与教学对象相适应,应当有军队综合大学的特色,适合初级指挥学员课程组训的特点;有些模式在地方高校行之有效,在军校就不一定适用。所以,要建立起这样一种适合教学相长的大学物理实验课程教学模式,把学员、教员、教法、学法、教学管理法和教学保障法看成一个教学的生态系统,并以此建立一种整体的、和谐的、可持续发展的以及符合人类的认知规律和大学物理实验教学规律的教学形态。

## 3 提升教学效果的措施

为了解决当前大学物理实验教学的矛盾,提升大学物理实验教学效果,采取了一些比较有效的措施。

### 3.1 紧盯“三基”,编写实验导学案

大学物理实验课程作为军队综合大学学员接受系统实验方法和实验技能训练的一门重要的基础课程。必须立足于夯实基础,使学员在掌握实验课程“基本理论、基本技能、基本方法”的基础上,提升科学素质和综合能力,适应“精英教育”要求。

为了有效引导学员进行预习和实验，教员要准备好较详细的实验导学案及参考资料。实验导学案必须由教员根据仪器设备情况及学员特点亲自设计和书写，其内容要充分体现科学探究的思想，要站在学员的角度思考和分析问题，而不要把实验导学案变成以前照本宣科的灌输式教材。具体要注意已下几点：

1) 通过以填空题或简答题的形式来引导学员阅读教材，掌握实验的基本原理、测量依据的理论、实际的实验测量关系式、由理论公式到实验测量式转换的依据或条件等，使学员掌握实验的基本理论。

2) 以填空题或简答题的形式来引导学员，通过自习掌握实验的基本测量方法名称、内容、解决的问题、如何实现等，使学员掌握实验的基本方法。

3) 以填空题或简答题的形式来引导学员，通过自习掌握实验仪器设备的正确连接方法、正确的调试方法、正确的测量方法、禁止的操作动作等操作注意事项，使学员掌握实验的基本技能。

4) 通过以填空题或简答题的形式来引导学员，弄清实验数据处理的基本算式、误差计算的依据及计算式、测量结果计算及误差的分析讨论等，掌握实验结果的表达方法。

5) 要重视实验与社会、生活和军事应用的联系，以简答题或论述题的形式来引导学员，通过查阅资料，分析实验过程中的收获，探讨采取其他实验方法进行测量的理论依据、实验方法、实验步骤的设计，对比各种测量的优、缺点等。了解与实验相关的实际应用，在部分可行性强的实验中提出一些有意义的研究课题，引导学员学会向社会、向生活寻找探究课题，进行创意性设计，通过实验进行科学探究，结合实验开展科技创新活动。

### 3.2 多模式连动，提高教学效果

根据“三性”实验的特点，采用多模式连动的差异化教学模式，发挥各种模式的优势，多模式共振，体现综合效能，提高教学效果。大学物理实验“多模式连动”教学模式，依托《军队院校本科教学工作评价指标体系》中对“三性”实验的界定，进行大学物理实验课程的内容“三性”认证，它涵盖了基础性实验(预备性实验和验证性实验)、综合性和设计性实验、自主性实验，对大学物理实验课程实施“多模式连动”教学模式，具体构成如图 1。

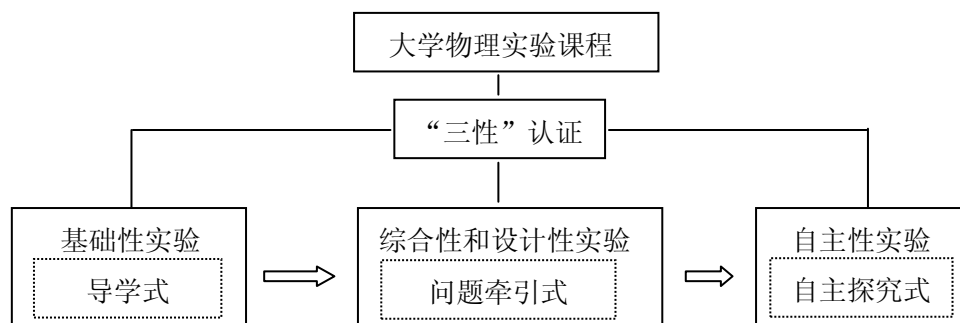


图 1 大学物理实验“多模式连动”教学模式

对基础性、验证性实验，采用“导学式”，通过教员直接而有效的引导，使学员尽快掌握实验的“三基”，养成良好的科学实验习惯。对“综合性”和“设计性”实验，采用“问题牵引式”即“问题—实验事实—结论—应用”，以具体实验的关键问题引导学员做实验，通过“做中学”培养学员解决实际问题的实践能力。对“自主性”实验，采用“自主探究式”，学员可根据探究的兴趣，选择探究问题，制定实验方案，让学员成为学习的主人，使学员在自主探究的过程中学习，获得具体的经历和感受；让学员在合作中促进潜能的发挥，促进学员有特色地发展、可持续地发展。

比如，学员在完成“空气热机”这一综合性实验以后，进行深入思考，从不同角度提出了

自主探究的课题。

有的学员发现,大学物理实验教材在考察热机输出匹配的实验中,对热机的加热电压和转速的初值有比较严格的要求,就质疑这些条件的必要性,并通过查阅资料,调查相关文献,制定研究方案,进行自主探究;通过实验获得数据信息,经分析探究,得出结论。通过对热机在不同加热电压下的输出功率变化的探究,表明教材的条件不是必须的;并用实验证明了相关文献<sup>[7-8]</sup>的结论。该作品获得全军首届大学员物理竞赛三等奖。

有的学员则从能量转换的角度,提出了利用绿色能源的课题。通过查阅资料,调查相关文献,确定可行的研制方案,进行自主探究。把空气热机实验装置进行必要的改造,将位移汽缸换成太阳能管,再利用太阳灶汇集太阳能驱动热机,实现太阳能与机械能的转换,再由机械能驱动电机发电,最终实现太阳能与电能的转换。该作品获得全军首届大学员物理竞赛二等奖。

物理实验方案是多样的,物理研究要从不同的角度观察、分析和解释物理现象。教员要鼓励学员对研究对象进行深入地分析与思考,发现并提出问题;针对问题提出假设,鼓励并辅导学员自主设计实验探究方案,到实验中去检验自己设计的实验方案,使学员逐步走上自主探究式实验之路,培养学员的自主研究学习能力。

#### 4 结语

多种模式连动的差异化教学模式,体现了以学员为中心、主体和教员为主导的教学关系,克服了传统的实验教学依附于理论教学,理论与实践相脱节等缺点,可以提高学员对大学物理实验的学习兴趣,使教学过程变成学员发现信息、捕捉信息、加工信息、研究问题、增长知识的过程,是提高大学物理实验课教学效果及效率的有效手段;也是培养学员的应用能力、创新意识、科学探究能力的有效途径。

#### 参考文献:

- [1] 冯清. 问题引导下的探究式实验教学模式研究[J]. 实验技术与管理, 2012 (5).
- [2] 董有尔, 郜江瑞, 王彦华, 解光亮. 四种教学模式连动, 全过程开展研究性物理实验教学[J]. 实验技术与管理, 2012 (5).
- [3] 林上金, 刘立龙, 胡澄, 白忠. 大学物理实验的探究式教学浅议[J]. 解放军理工大学学报(综合版), 2012, 13 (6).
- [4] 张亚非. 伴随我军现代化建设发展的指挥军官学历教育[J]. 中国军事教育, 2007(4):42-45.
- [5] 赞科夫. 教学与发展[M]. 北京: 人民教育出版社, 1995.
- [6] 约翰·杜威. 民主主义与教育[M]. 王承绪, 译. 北京: 人民教育出版社, 1990.
- [7] 丁泽民, 陈林根, 孙丰瑞. 线性唯象传热定律下斯特林热机性能极限分析[J]. 工程热物理学报, 2009, 30 (4).
- [8] 訾琨, 杨秀奇, 江屏. 考虑机械损失时发动机功率效率特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41 (6).

## 浅议军校物理实验教材建设

胡 澄, 林上金, 白 忠

(解放军理工大学 理学院, 江苏 南京 211101)

**摘 要:** 军校物理实验教材还不适应初级指挥人才培养的需要, 文章指出当前实验教材存在的弊端, 并提出改革与评价的多项措施。

**关键词:** 物理实验; 实验教学; 教材建设

大学物理实验课程作为军校的基础必修课, 是以提高和培养学员的科学素养、实践能力和创新精神为目的综合基础性应用课程。大学物理实验覆盖面广, 具有丰富的实验思想、方法和手段。它在培养学员严谨治学态度、科学实验能力、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。因此, 大学物理实验课的教学质量与人才培养息息相关, 对于军事指挥人才知识构成、文化修养、综合素质和创新能力的培养与未来的发展必将发挥基础性的长效作用, 在“精英教育”中占有重要地位。而大学物理实验教材, 是物理实验教学的重要载体, 优秀教材应当是学员学习和参考的工具<sup>[1]</sup>。教材建设作为重要教学资源, 是指导思想、培养目标、培养标准以及重点任务的集中体现和实践载体, 是培养和造就高素质人才的基本保证, 对于推进人才培养模式改革, 提高学员的实践能力、创新能力和综合素质等均具有重要作用<sup>[2]</sup>。通过教材建设带动实验课程教学水平及培养人才水平的提升, 提高实验课程教学质量, 促进教学水平整体提高, 培养合格的人才<sup>[3]</sup>。实验教学是提高学员素质、培养创新思维的重要途径, 是科学创造的基础。知识和能力来源于实践, 素质只能在实践中养成。

实验教材是实验教学内容的知识载体。高质量的实验教材是提高军校教学效果、保证实验教学质量、实现人才培养目标、有效地完成实验教学计划的重要保证, 贯穿在实验教材中的学术思想和思维方式, 对学员起着潜移默化的作用<sup>[4]</sup>。然而, 军校教材建设也存在一些问题, 教材评价选用机制有待进一步完善。

### 1 军校实验教材存在的问题

实验教材建设是军校实验教学中的一项非常重要的基本建设, 对提高实验教学质量、优化实验教学体系、实现人才培养目标具有重大的意义。由于受到各种条件限制, 实验教材的建设落后于其它教学环节改革的步伐<sup>[5]</sup>。目前, 军校实验教材建设过程中主要存在以下几个问题:

#### 1.1 指向不明确, 科学性不强

目前实验教学所使用的教材相当部分是各军校的自编教材, 部分自编教材由实验设备附带的可开设的实验说明书演化而来, 实验教材所起的作用相对于仪器说明书, 虽然它们有明确的实验条件和操作流程, 但是操作步骤文字叙述太繁琐, 篇幅过长, 重点不够突出, 学员在看完实验教材后, 很难在头脑中真正领会实验的设计思路和实验方法, 从而也不能举一反三, 不利于实验能力的培养。不一定满足实验教学大纲和教学目标的要求, 对学员科学精神和科学品德的培养关注不够, 对学员的职业取向也没有涉及。

**基金项目:** 解放军理工大学理学院 20134 年教育教学重点课题

**作者简介:** 胡澄(1965—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 大学物理实验教学。



### 1.2 内容陈旧, 缺乏系统性

长期以来, 实验课依附于理论课, 实验教学内容以验证理论教材中所描述的现象和定理为主, 极少吸收现代最新实验设备、技术和科研成果到实验项目中, 也较少从教育理念、人才培养目标角度考虑重组、优化实验项目, 综合性、设计性、研究性实验项目偏少。忽视对实验的基本理论、基本方法、基本技能的规范性训练, 实验内容层次不清。同时, 实验强调本课程的教学, 忽视了学科专业的实验课程之间存在内在的必然联系, 没有形成有机的、系统的实验课程体系。

### 1.3 模式单一、体系平面化

实验教材模式雷同, 每一个实验项目由实验目的、实验原理、实验仪器、实验步骤、数据处理、思考题等几部分组成, 有些内容在论述实验原理和实验方法时虽然采用循序渐进清晰讲解的方法, 但往往是一种知识的灌输, 每一个实验涉及到的目的、原理、方法、步骤等都有长篇大论的表述, 过多、过细。学员在预习实验时只是被动地接受知识, 难以边思考边学习, 容易产生畏难情绪, 看完即忘, 达不到预习的目的。然而, 不同的实验项目有不同的特点和目的。有些实验项目要求学员掌握基本实验技能, 有些实验项目则重在要求学员掌握实验思想, 还有些实验要求学员自主选择内容、设计实验方案。如何把不同教学目的贯穿在各项实验中, 应当是军校实验教材建设的关键。此外, 实验教材建设仍然停留在单一的纸质教材上, 不适应信息技术、计算机网络的快速发展。

## 2 军校实验教材建设的措施

教材建设是一项系统、复杂的教学改革工程, 设计和编写教材应基于教员的教和学员的学, 在教学中发挥应有的教学张力, 对教材进行批判性的使用, 构建新的大学课堂组织, 培养学员的自主精神和创新能力, 提高教学效果<sup>[6]</sup>。优秀教材应有自身科学体系, 能反映本学科的发展规律, 教材内容能与学科的发展相适应, 甚至有一定的超前性, 同时又能反映学员的认识规律<sup>[7]</sup>。为此, 我们提出军校实验教材建设的以下几个方面具体措施。

### 2.1 调查实验教材现状, 分析教材改革的动力

长期以来, 实验教员针对原工程技术类院校培养工程师的课程标准, 已撰写相当数量的教材, 随着军校教学转型, 学员的结构、培养模式及目标都发生了根本的变化, 人才培养的目标已经转变为适应信息化条件下联合作战需要的具有工程师素质的初级指挥人才, 现行的教材还不适应这种变化。通过问卷调查法、访谈法, 对实验室使用实验教材情况进行摸底调查, 访谈实验教材使用教员和教材编写教员, 实验教员还在如何提高教材质量上下功夫, 全国统编的实验教材数量和品种都不多, 并且缺少可参照分析的材料, 许多教员对编写实验教材感到非常棘手, 数量不足、质量不高的实验教材和讲义必然影响实验教学, 军校的实验教材亟待加强建设。

### 2.2 准确定位, 制订实验教材建设规划

实验教学应按人才培养目标、教学规律, 坚持传授基础知识、培养能力、提高综合素质协调发展, 实验教材还应体现培养学员探索精神、科学思维、实践能力和创新能力。实验教材建设应该根据实验教学内容的要求和军校实际实验教学条件, 制定出适合实际情况的实验教材建设规划, 防止使用实验教材的随意性。教材定位是教材编写的重要前提和基础, 在明确军校培养目标的基础上, 教材编写要定位于既体现军校的培养目标, 又突出军校的特色上。一方面在编写之前主编和参编要对教材定位以及当前军校教育的教学现状和特征进行认真分析, 确定编写方案和编写大纲, 保证教材编写的准确定位和编写质量; 另一方面要对教材编写内容准确定位, 在满足教学需要的基础上, 在内容取舍和难易程度方面, 既高于军校教育, 又要有别于普通高等教育, 并突出军校教育特色。

### 2.3 改革实验教材模式, 增设实验教学内容

实验教学研究结果表明, 分层次、模块化设计实验项目, 减少验证性实验项目, 增加综合性、设计性和研究性实验项目, 是实验教学改革的主流。但是也不能搞一刀切, 基础性的验证实验是训练学员基本实验技能的重要手段, 针对低年级开设的实验必须强化验证性实验, 针对高年级学员应多开设综合性实验和设计性实验, 因此, 不能简单地要求每门实验课程增加综合性实验或者设计性实验, 或者简单地规定每门实验课程必须有多少综合性或设计性实验课时。从教学实际层面入手, 按照基础实验服务于初级指挥第一任职的要求, 注重在基础实验教学中渗透军事思维和军事技术要素; 把传统的教学内容与现代科学技术的新成果相结合, 注重把实验教学与工程和社会应用实践相结合, 把新技术、新材料、新方法引入基础实验课堂, 给学员打开一个个新知识的“天窗”; 提炼出有广泛意义的实验教材框架体系, 不断地改进教学、提高课堂教学的效率。通过在实验内容的编排上做一些探索, 以循序渐进提出问题、引导学员找出解决问题的根本方法为大框架, 再在步步思考中体会解决问题的具体技术问题, 从而让学员领会每个实验的主要思路, 同时学员只有经过深入的思考才能完成实验。

### 2.4 应用信息技术手段, 构建多维度实验教材体系

随着信息技术、计算机网络的快速发展, 许多理论教材已形成“立体化”, 理论教材有多种表现形式, 除了传统的纸质教材以外, 还有网络教材、电子教材、音像教材等多种形式, 开发了辅助课件或仿真工具, 已经构成了一个比较成熟的教材体系。然而, 实验教材建设严重滞后于理论教材建设, 必须运用信息技术、多媒体技术和计算机网络开发系列实验教学的电子教材、网络化实验辅助和指导教学多媒体课件, 创建实验教学网络平台, 形成多维度的实验教材体系。实验原理、实验设备、实验步骤等实验教学环节可用多媒体技术开发仿真系统, 把验证性实验尽量用计算机仿真出来, 由学员课前预习, 既加强学员自学能力, 又减少了验证性实验学时数, 进而增加综合性实验和设计性实验的教学内容。形成利于学员能力生长的教学体系模块, 在总体设计上, 力求贯彻以学员为本的理念, 注重基础性、实践性、探索性、开放性的有机统一。

### 2.5 构建实验教材评价机制, 确保实验教学质量

针对实验教学的规律, 构建实验教材评价机制和指标体系, 加强对实验教材的评价。通过跟踪调查与信息反馈制度, 不断完善实验教材评价体系。根据《军队院校本科教学工作评价指标体系》中对“三性”实验的界定, 深入研究基于“三性”实验的特点, 体现学员的主体地位, 开发适用于自主开放式教学并具有指导学员自主完成实验的具备工具书价值的教材。实验教材改革是实验教学改革的重要组成部分, 它与实验教学的各环节紧密联系, 必须有一支优秀的实验教学队伍才可能编好的实验教材, 实验教学内容受制于仪器设备, 先进的仪器设备、高效的资源共享、透明的开放服务等良好的实验教学环境, 促进和保障实验教材改革。

## 3 结语

军校物理实验教材建设的指导思想是: 针对大学物理实验课程教学的现状, 探索“三性”实验教学一般流程的自主开放式教材开发, 立足于夯实基础, 使学员在掌握实验课程“基本理论、基本技能、基本方法”的基础上, 提升科学素质和综合能力, 适应“精英教育”要求; 形成利于学员能力生长的教学体系模块, 在总体设计上, 力求贯彻以学员为本的理念, 注重基础性、实践性、探索性、开放性的有机统一。形成具有较宽的覆盖面和足够的实验项目, 反映物理实验教学改革和研究的成果, 既体现科学的内涵、实验内容的更新, 又要反映新技术、新方法、新设备等现代实验技术和手段, 以基础性实验、综合性和设计性实验、自主研究性实验模块, 从低到高、从基本到前沿、从接受知识型到培养综合能力型逐级提高的大学物理实验课程新体系; 改变分工过细, 内容重复, 综合性实验、设计性实验、自主研究性实

验不足的缺点;充分体现现代信息技术在物理实验中的应用,充分体现军校教学的特色。

**参考文献:**

- [1] 李辉。基于卓越工程师教育培养计划的教材建设[J]。中国高等教育, 2012, 19。
- [2] 华驰。基于工学结合的“ASP. NET 软件设计”实验教材研究与开发[J]。实验室研究与探索, 2012, 31(10)。
- [3] 贺峰涛。国外大学理工科优秀教材的特点及其借鉴意义[J]。中国校外教育, 2012, 11。
- [4] 卢航。提高实验教学质量应从实验教材改革做起[J]。实验技术与管理, 2002, 19(3)。
- [5] 刘湘晨, 窦艳涛。精品实验课程需要精品实验教材册[J]。实验室研究与探索, 2011, 30(8)。
- [6] 肖全民。关于大学教材的几点认识[J]。中国大学教学, 2011, 4。
- [7] 朱伟利, 张颖。关于实验教材编写模式的思考与实践[J]。大学物理, 2011, 30(8)。

# 大物实验、大创项目、物理竞赛三位一体的 实验教学改革实践

韩立立

(中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 本文阐述了大学物理实验、大学生创新项目、物理竞赛三位一体的实验教学模式, 结合实验教学改革实践, 给出适合创新实验学生组织的学习型组织结构和基于 MOOC 的实验教学改革手段, 并总结了目前实验教学改革实践中存在的问题和取得的成绩。

**关键词:** 三位一体的实验教学改革; 学习型组织; MOOC

## 1 引言

中国石油大学理学院物理实验中心是山东省高等学校实验教学示范中心, 主要开设省级精品课程“大学物理实验”、“大学物理综合实验”、“智能检测技术实验”、“创新研究性物理实验”等“重组基础、综合交叉、反映现代、注重创新”的系列课程。基于人才培养和实验教学中存在的问题, 提出以问题和研究课题为核心的本科生创新实验与物理竞赛相结合的实验教学改革模式。侧重发现学生中的精英, 激发其创新意识, 开拓其创新思维, 培养其创新能力。

## 2 大物实验、大创项目、物理竞赛三位一体的实验教学模式

大学物理实验教学体系——第一级为基础性实验; 第二级为近代、综合与设计性实验; 第三级为综合物理实验; 第四级为创新研究性物理实验。工科学生实验教学培养目标为观察、测量、数据处理等基本实验技能。

物理创新实验专题训练体系——理科(含实验班)学生以系统项目训练的形式开展, 体现综合交叉多学科知识、反映现代技术发展、结合石油特色, 实现知识转移。在基本实验技能基础之上总结归纳实验过程, 发现问题, 解决问题, 通过问题的研究提升学生的综合能力。

大学生创新实验计划项目体系——物理创新实验专题训练中诞生出的创新灵感, 经过凝练、提升, 在教师指导下申请大学生创新创业训练计划项目, 获得专项资助, 以期孵化论文、专利等学生成果。

大学生课外科技竞赛体系——高水平教师指导下的拔尖大学生创新计划或科技竞赛, 是应用型人才培养的重要途径, 也是实验教学改革的重要抓手。给竞赛或大创项目等同于课程的质量观, 以竞赛促进学生课程兴趣, 促进课程的建设, 促进创新人才培养模式的变革。

三种教学体系的针对不同层次、不同能力学生给予差异化、个性化有针对性的培养。大学物理实验课程注重的是原理和实验方法以及实验技能的培养, 物理创新训练专题以研究性教学理念为指导, 开展基于问题的研究和基于项目的训练。教学过程从实验技能, 创新思维, 研究能力三个维度培养学生的创新能力。实现实验知识传承, 理性思维提升, 实验方法优化, 创新智慧生成。三位一体的实验教学改革切实提高了实验教学的质量。

---

**作者简介:** 韩立立(1974-), 女, 山东博兴人, 硕士, 实验师, 主要研究方向为物理实验技术, 实验室研究与管理。

### 3 实验教学改革视域下的大学生创新组织结构和师生关系

目前 211 学校本科生在学习大学物理实验课程时一人一套实验仪器进行一个实验项目,独立给出实验报告。实验过程无法体现学生间的合作。物理创新专题训练的学生一般是 2-3 人一组围绕一个课题进行研究和实验,给出一份研究论文,专题训练可以初步锻炼学生的团队合作交流能力。大学生创新计划或参加竞赛的学生由于有 2000-10000 的资金支持,学生可以自主的做一些研究。

大创项目学生组织的结构在实验教学改革视域下采用的是学习型组织结构<sup>[1]</sup>。学生创新组织先天就有学习型组织的特点:天然浓厚的学习氛围,扁平化的结构,共同的愿景等。改革中突破学校对创新项目人数的限制,在项目立项之初最大范围的吸收有意愿的学生参与,在项目过程中竞争、分流和淘汰,研究成果的分享、署名、排序等由学生自主决定,教师只给出建议。

项目进行由负总责任的学生协调所有事项,而非教师;其他学生根据自身专业和特长分工,电路设计制作,原理、方法的确定,计算机程序的编制,耗材购买的账目等等所有事项都由项目学生专人负责。教师协助项目负责人控制大创项目的进度、成本、风险、人事等事项,锻炼的是学生的团队能力,解决实际问题的能力,创新能力、风险管理能力、资金成本控制等综合能力。大学生创新计划形式上是实验教学改革,但本质上是人才培养模式改革,限于经费和师资的缺乏目前只有学生中的精英才能获得。

### 4 慕课在实验教学改革中的应用

“慕课”(MOOC),“M”代表 Massive(大规模),字母“O”分别代表 Open(开放)和 Online(在线),“C”代表 Course(课程)。慕课突破传统课程的人数限制,以兴趣导向,不分国籍,不受时空限制,只需邮箱注册;就可以在网上完成学习的课程。MOOC 是 2008 年在加拿大首次由热衷计算机网络传播创新和教育技术应用变革的专家提出的,倡导将计算机技术作为一种改革“破碎的教育系统”的手段和增进智慧的协作工具应用于学习过程之中,极力推进教育过程的开放,将个人计算机与“互联的计算机网络”结合起来,从而形成一种大规模的、世界性的课程信息分享<sup>[2]</sup>。

在本科生创新实验教学改革过程中,教师个人学科领域和专业特长是有限,在实际教学中引入 MOOC 这一先进教育技术手段,可以摆脱物化或窄化的技术导向,指导学生突破自我局限,最快的、最直接的接收到某一领域最好的教师传授,获取专业或学科以外的国际化的思路、知识或技能。

慕课的应用使得学生真正成为学习的主体,学习方法互联网化、个性化。教师的教学改革思路转变为自教、他教、共教<sup>[3]</sup>,师生关系转变成相学相长。

### 5 叶圣陶教育思想:“不教的学”在实验教学改革中的应用

在大学物理实验课程阶段,我们还会采用传统的实验授课方式,讲原理、讲方法,讲注意事项,在创新训练专题训练中,教师更多采取引导式的研究型教学,教师个体与学生群体双向构建。教师的身份是“权威、顾问、同伴”三位一体。在对大学生创新计划和学科竞赛的学生教学时更多采用的是叶圣陶的教育思想:不教的学。教是为了不教,学是为了会学<sup>[4]</sup>。

大学生创新计划的教学目标不是教给学生多少知识,而是激发学生的学习兴趣 and 热情,先培养出问题意识,“于无疑处有疑,方是进矣。”乐学而后会学。不断改变教学模式,培养学生的自主学习能力。更多地让学生自己动手实验、动口交流、动脑解决创新计划过程中遇到的实际问题。相学相长的教学为学生创新实践能力的培养营造良好的氛围,在大师教育思想和当代高等教育教学论指导下,结合专业和学科,让学生自信自主地、创造性地实验。

## 6 实验教学改革视域中存在的现实问题

教学实验教学改革在教师层面目前主要存在的问题是缺乏方法论的指导,和对教学论缺乏研究和实践,教师间没有形成共同的关注的研究课题,也就不能形成共同的智慧,缺乏新理论、新方法、新范式产生的平台<sup>[5]</sup>。

实验教学改革的管理和评价主要来自上级教务管理部门,一刀切现象严重,个性不足,不宽容失败,过分注重论文、专利、奖项等可量化成果<sup>[6]</sup>。

由于传统课程注重考试成绩的思维定式和经费的缺乏造成创新实验只能面向少数精英学生的困境,学生参与创新实验教学改革实践的意识 and 机会欠缺。

## 7 结论

大物实验、大创项目、物理竞赛三位一体的实验教学模式在本科人才培养工作中取得了突出的成绩。近三年来,物理实验中心教师指导学生在中文核心期刊发表研究论文 10 篇;指导学生在山东省大学生物理科技创新大赛获特等奖 2 项、一等奖 2 项、二等奖 3 项、三等奖 2 项;指导学生完成 5 项国家级和校级大学生创新训练计划项目;指导学生完成 2 项自主创新项目;指导学生参加“挑战杯”竞赛获山东省特等奖、全国三等奖各 1 项。

### 参考文献:

- [1] 彼得 圣吉。第五项修炼:学习型组织的艺术与实践[M]。北京: 中信出版社, 2009: 10。
- [2] 百度百科。慕课. <http://baike.baidu.com/view/10629886.htm>。
- [3] 徐晓飞。抓住 MOOC 之机遇 促进计算机如软件工程专业教学改革[J]。中国大学教学,2014: 1。
- [4] 任苏民。叶圣陶教育思想的文化底蕴和当代价值[J]。教育研究, 2012: 3。
- [5] 裴娣娜。中国教学论学科的当代形态及发展路径[J]。教育研究, 2009: 3。
- [6] 郑益慧, 江志斌, 吴益锋。实施大学生创新计划 引领和推动人才培养模式改革[J]。中国高等教育, 2012: 18。

## Three- in-one experimental teaching reform practice for college physics experiment university student innovative project physics contests

HAN Li-li

(College of Science, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

**Abstract:** the experimental teaching model of Three- in-one of college physics experiment university student innovative project physics contests is introduced. The organization structure for study suitable for student organization of innovative experiment and the experimental teaching reform methods MOOC are suggested by combining experimental teaching reform practice. Then the problems and achievements currently existing in experimental teaching reform practice are concluded.

**Key words:** Three-in-one experimental teaching reform practice; organization structure for study; MOOC

# 最近发展区及相关理论在大学物理实验教学中的应用

韩璐, 孙敬姝, 杨名超

(吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 本文介绍了在大学物理实验课程中以最近发展区及其相关理论为指导进行教学的应用实例。

**关键词:** 最近发展区; 大学物理实验

## 1 引言

物理实验是物理学的基础,也是物理研究的基本手段。物理实验体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法上是很多学科的基础。因此,物理实验也是所有理工科专业的学生的必修课。通过物理实验课程,能够引导学生思考物理现象,认识和掌握理论知识,同时也能激发学生的学习兴趣,提高学生的观察能力,锻炼学生的逻辑思维,是培养学生的创新思维和创新能力的重要方法和手段。

在传统的教学模式下,一般是教师在上课时先讲授实验原理、实验仪器和实验内容等,交代实验注意事项后,学生开始自己动手做实验。这样的“老师先讲,学生照做”的模式往往会导致学生不能真正理解实验的原理,只是按照要求完成了实验步骤而已,缺少了主动思考的过程,课后对实验的印象不深,使物理实验课的作用大打折扣,达不到应有的教学效果。产生这种现象的原因主要在于:1 教师一次性把实验相关知识都讲完,学生紧接着就要动手实验,中间很少有消化和思考的时间,使学生来不及掌握。2 由于实验项目安排的顺序不同,使实验内容和理论课不能完全相结合,导致学生缺乏理论知识的准备,尤其是非物理专业学生,课前没有理论基础使他们在实验时变得盲目,更容易遇到困难。

## 2 最近发展区及其相关理论

### 2.1 最近发展区

“最近发展区”的概念是前苏联著名心理学家维果茨基在论述教学与发展的关系时提出的,他将其定义为“实际的发展水平与潜在的发展水平之间的差距。前者由独立解决问题的能力而定;后者则是指在成人的指导下或是更有能力的同伴合作时,能够解决问题的能力”。他强调教学不能仅依据于学生过去已完成的发展过程,而应依据于现在仍处于形成状态,刚刚在发展的过程,主张教育要在发展之前引导发展。最近发展区在一定程度上决定着发展的方向和进程,只有适当难度的任务才能促进个体的学习和进步。

### 2.2 支架式教学

支架的原意是建筑行业使用的脚手架,研究者在维果茨基的基础上提出了支架式教学。这里的支架是指用来帮助学生解决问题的指导性语言或者工具。这种教学方式的关键是要保证教师所提供的支架处于学生的最近发展区内,只有这样的支架才有意义,学生才能够接受。运用支架法教学的要点在于:学生要在教师的指导下发现问题或解决问题,其次教师要逐步减少或撤离支架,使学生最后能达到独立思考的水平。

---

**作者简介:** 韩璐(1989—),吉林省洮南市人,吉林大学物理学院2013级研究生。

**通讯作者:** 孙敬姝(1960—),吉林省长春市人,吉林大学物理学院教授,博士,主要研究方向为凝聚态物理和课程论。

### 2.3 情境教学

维果茨基的思想体系是建构主义学习理论的重要基础之一,深深地影响着建构主义者对发展和教育的研究。其中情境认知理论和情境教学模式的思想在一定程度上源于维果茨基的理论。情境认知理论主张任何学习都是处在一定的社会或实际背景下的,这些背景对学习有一定的影响。学习者不应该只是被动地接受知识,而应该是主动的“学徒式学习者”。情境教学模式的重点在于在教学过程中,教师要引导学生从观察者转化为参与者,在课堂的情境互动中学习知识或技能。

## 3 最近发展区理论在大学物理实验教学中的应用

最近发展区理论对教学的影响主要体现在内容设计上。教学内容设计也是教学设计的主体部分。用最近发展区理论进行教学设计的关键是要在教学过程中保证课堂的教学内容处于学生的最近发展区内。如何进行教学内容的选择与顺序安排,都要依据这一原则。首先要了解学生的现有水平,进而与教学目标中学生应达到的水平作比较,根据两者差距选择合适的支架,创设情境,引导学生逐步掌握,最后达到预期的教学效果。本文以《普通物理实验》中“透镜组基点的测定”为例,探讨将最近发展区及其相关理论运用到大学物理实验教学中的过程。

### 3.1 分析学生已有的学习状态

透镜组的基点是普通物理光学部分的内容,对于物理专业的学生来说,已经在之前的光学课上学习过,对实验的理论部分有基本的了解,只需要稍加复习便能回忆起来。非物理专业的学生没有学过光学课程,而大学物理中的光学部分并未涉及透镜组基点的相关内容,因此本实验的原理对他们来说是新知识。

### 3.2 将学习内容具体化

“透镜组基点的测定”的内容可以分为两部分,分别用焦距仪和节点调节器两种工具来测定透镜组的基点。其中需要学生掌握的是透镜组基点的概念以及用焦距仪和节点调节器来测定透镜组基点的方法。

### 3.3 选择支架

透镜组的基点是用来描述透镜组的物象关系的,这与用来描述薄透镜成像规律的焦点、光心等概念类似,可将两者对比,向学生展示两者的相似关系与不同之处,由前者向后者延伸,使学生的思维能够由浅入深,理解基点的概念。

### 3.4 情境创设

课堂开始时,先展示薄透镜成像的几何光路图,带领学生复习几何光学中薄透镜成像的有关规律和重要的基本概念,如焦点、焦距、光心等。对于两个薄透镜组成的透镜组,如果要分析它的成像规律,需要用两次薄透镜成像来得出结果,能不能用一种属于透镜组整体的参数来表征它的性质?这便是本次实验要测定的透镜组的基点。

### 3.5 学生独立探索

经过教师在所创设的情境中一系列的引导,学生已基本掌握实验的原理和过程。学生自己动手实验,结合教材并与其他同学的协作学习为辅助,加之教师针对个别问题的解答,完成实验内容。在实验后总结和反思实验过程,完成思考题。

## 4 总结

通过教学实践我们发现,合理地安排课程内容,提供合适的支架和创设情境能够有效地帮助学生理解实验中的概念和原理,并使其参与到教学活动中来,增强学生的学习兴趣。在大学物理实验课中应用最近发展区及其相关理论为指导进行教学,使以往学生轻视理论部分,急于完成实验内容和由于对原理解的不充分导致实验过程中盲目操作的现象得到了很



大改善。

**参考文献:**

- [1] 陈琦, 刘儒德. 当代教育心理学 (第 2 版) [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007: 39-42.
- [2] 唐卫海, 刘希萍. 教育心理学[M]. 天津: 南开大学出版社, 2005: 46-47.
- [3] 全国十二所重点师范大学联合编写. 教育学基础[M]. 北京: 教育科学出版社, 2002: 207-217.

## **Application of the Zone of Proximal Development Theory in the Teaching of College Physical Experiment**

HAN Lu, SUN Jing-shu, YANG Ming-chao  
(College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** In this paper, an example of instructional design based on the zone of proximal development theory in college physical experiment is introduced.

**Keywords:** the zone of proximal development; college physical experiment

# 大学物理课程与学生制作实践融合的培养模式探索

黄彦, 朱泉水, 龚勇清, 陈凤英

(南昌航空大学 大学物理实验中心, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 在一般工科院校大学物理基础课程的教学平台上, 建立了大学物理课程与学生制作实践(演示仪器制作、科技创新制作等)融合的培养模式。培养模式将大学物理理论、实验课程教与学中多方面相互融合, 形成具有各方面相互协调、相互促进的教学局面, 增强了学生对物理学习的兴趣, 实质性地培养了理论联系实际的综合应用能力和创新能力。通过小规模实践, 取得了预期的效果。

**关键词:** 大学物理; 制作实践; 培养模式

## 1 介绍

大学物理课程广义地包括理论和实验课程, 是工科高等学校重要的公共基础课程。单独的理论教学更为理论化, 而单独的实验教学更趋技术性<sup>[1]</sup>。在大学物理理论课上进行随堂演示实验对学生的能力和素质培养优越性不言而喻。国内, 在物理类探索与演示实验建设较早的一些著名高校如中国科技大学、北京交通大学、吉林大学等随堂演示实验已经常态化。丰富的演示仪器是开展课堂演示教学、探索与演示实验教学的物质基础<sup>[2]</sup>。依靠购买演示仪器设备并不是演示实验发展的最佳途径。不少院校已经开展了大学物理演示实验仪器和教具的自制, 特别是让学生进行制作<sup>[2,3]</sup>, 为学生提供了一个自主探索学习的环节。

学生进行演示仪器制作和物理类科技创新制作实践在物理基础课程教学指导委员会制定的教学基本要求中并没有硬性规定。但从历届全国高等学校物理演示实验教学研讨会上, 特别是刚过去的第十一届<sup>[4]</sup>, 学生制作的演示仪器已经占有较大比重。学生制作实践与大学物理课程教学的天然结合点在演示仪器的自制项目上。在教师的指导下, 让学生进行演示仪器的自制和相关科技创新制作, 成为培养学生实践能力的有效手段, 弥补课程教学的不足, 同时又让大学物理实验形成了良性循环发展。让大学物理课程教学与学生制作实践相融合, 以学生制作实践为支点, 在不改变现有大学物理教学体系和管理体制的基础上, 形成一种大学物理课程与学生制作实践融合的培养模式, 激发大学物理这门公共基础课程的内在活力, 充分发挥培养学生理论联系实际综合应用能力和活跃的创新意识的作用。

## 2 需要解决的问题

### 2.1 教师的创新动力

一般工科院校在大学物理理论课程教材更新上可以达到与重点大学一致步伐, 但是实验设备的更新却极其被动。一些设计性实验和研究性实验很难新陈代谢和发展, 特别是在没有物理专业或与物理专业分开的大学物理基础教学部, 其主要原因是这些院校大学物理基础教学部教师整体上的原创性动力不足。

---

**资助项目:** 江西省教学改革项目“大学物理课程与学生制作实践融合的培养模式研究”(JXJG-12-7-11); 江西省教学改革项目“基于课堂演示实验的案例式大学物理视频教学的设计、研究与实践”(JXJG-12-7-9)

**作者简介:** 黄彦(1980-), 男, 湖北荆州人, 南昌航空大学大学物理实验中心讲师, 从事大学物理理论及实验教学。

## 2.2 学生的兴趣和热情

大学物理课程重要性和实用性没有得到体现,一般工科院校的学生对大学物理学习的热情不高。在应用中获得学科的价值,是目前学生的普遍的学科价值观。大学物理课程只设置了实验实践环节,没有设置创新制作实践环节,因此学生在课程学习过程中没有自主的情感注入,完成任务和做一个热闹的看着客成为一种普遍的心态。

## 3 培养模式的构建

针对以上问题,构建了大学物理课程与学生制作实践融合的培养模式。这个模式以教师指导学生制作实践为支持点,将制作实践以知识应用的形式融合于大学物理理论与实验课程,提高大学物理课程教学水平和对学生能力素养培养水平。

### 3.1 模式的基本描述

以大学物理课程平台为依托,以大学物理课程教师为引导者,在平台提供场地、条件和适当的启动经费支持下,要求学生经过选题、立项、方案设计、经费预算、材料选择和购买、动手制作等过程完成制作实践。在物理基本知识点演化出来的制作项目,以物理演示仪器制作为主。制作出的仪器将用于理论课程教学(随堂演示),存放在开放实验室,为学生提供自由的自主实验。以最新和趣味物理技术知识为选题的立项制作出开放性演示与探索实验仪器,增加演示与探索实验项目。以物理知识和思想方法应用为选题立项的制作,因为具备一定的创新性,在指导教师的指导下孵化成为“三小”(小发明,小创造、小制作)、“创新创业”等项目,同时获得相当的经费支持。

制做实践对学生培养具有一个过程:在初级阶段,以课程基本知识和趣味物理技术立项,仪器制作项目具有重复性和验证性质,这一阶段积累学生制作实践经验;在高级阶段,学生参加实验仪器的维护改进、进行“三小”、“创新创业”等实践活动,甚至成为“科研小助手”直接参与教师科研中的实践活动和形成研究性实验,这时具有创新性。在这个过程中,实现在不同方面对学生培养:对随堂演示实验仪器的制作,课程理论教学中的理论解释和公式推导有了一个形象载体,学生对理论课教学知识点的有了较为深入理解;对演示与探索实验仪器的制作,基本的物理知识和思维方法有了应用载体,学生对理论课教学知识点的理解变得鲜活,理解上产生了新的视角,在眼界和思维上达到更高的层次;在高级阶段中,“三小”等实践活动,学生将现有物理知识拓展到实际应用中,这个过程需要学生不断地思考、阅读、分析、比较、设计,在物理知识和思考方法得到强化的同时,在与课题相关的领域知识大量拓展和积累,获取知识的能力增强,思考方法、思维层次进一步提高,积累大量的实践技巧,学生的综合应用能力和创新意识得到一定程度地培养。

由于大学物理课程平台上制作实践的学生来自不同的专业,对各学科思想和知识的交融,对交叉创新是十分有利的。教师在指导学生制作实践中,对自身的素质也起到促进作用,有利于科研上原创性想法的产生。在制作实践的团队中,高级阶段的学生和初级阶段的学生组成团队梯队,培养团队精神和交流能力的同时,形成学生自行培养的良好态势。大学物理课程平台的建设与学生制作实践形成良性稳定发展的关系,见模式直观框架图 1,过程 A:根据理论课程的知识点制作随堂演示实验;大量随堂实验增进物理知识的理解。过程 B:收集最新或者趣味的物理技术信息制作演示与探索实验、制定设计性实验和对基础实验的仪器进行改进和维护;参加自主开放性实验提扩展知识面,增强物理知识的联系。过程 C:参与教师的科研项目,为项目提供特定方面的制作等;感受科学研究和科学探索过程。过程 D:参加学生的科技制作项目,如大学生“三小”、创新创业项目等;增强物理理论联系应用的能力和创新意识。

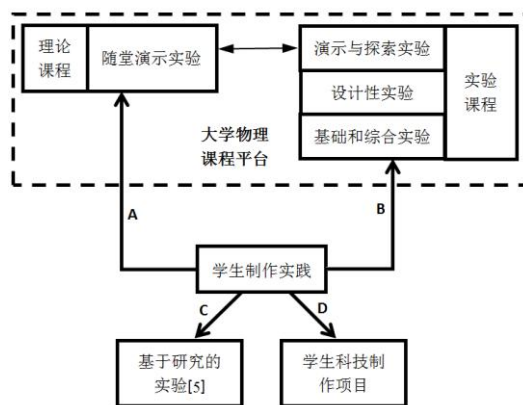


图1 模式的示意图

### 3.2 培养模式的关键点

在大学物理课程与学生制作实践的融合培养模式中，体现在5个重要的融合：

1) 学生制作实践与大学物理理论课程融合。大学物理理论课程中需要提出归纳有意义的随堂演示实验的知识点，从而确定学生制作随堂演示仪器的具体项目。首先是必要性：具体的随堂演示实验项目必须对学生学习大学物理课程中建立正确的物理模型和思想、培养学生科学观察和思维能力、创新意识和科学审美起到有益的作用；其次是合理性：随堂演示实验的演示必须简洁明了，便于操作、观察。基于这两个问题必须专门地研究随堂演示实验的演示方案和技术。

2) 学生制作实践与大学物理实验课程融合。大学物理实验被分为三个层次，其中所占学时最多的为基础性实验和综合性实验，学生的制作实践主要表现为对这类实验的改进。演示与探索实验以课堂实物演示、开放演示实验室、演示实验走廊等形式出现，学生的制作实践主要表现为对这类实验的开发、改进和仪器维护。设计性实验多是一些题目稳定、设计上灵活多变的项目，被作为科技制作项目的基础和参考，比如我实验中心开设的光机电一体化小车实验。形式上制作实践与实验相结合，在教学上这样的结合使学生能深入领会物理实验的设计技巧和思想实质。

3) 大学物理课程平台内理论和实验课程融合。学生在大学物理理论课的学习不断提出观察和体会物理现象的要求，教师的随堂演示实验为学生的理论学习提供了形象和客观的理解模型。学生制作实践活动产生的大量的随堂演示实验仪器和学生科技创新制作产生的演示仪器则可以作为自主开放性实验的物质基础，在理论课课余参加自主开放性实验，反复研习和讨论，达到对某些物理理论知识的深入理解。

4) 学生制作实践与科技创新项目的融合。参加制作实践的学生，可以在设计性实验的基础上，或在制作实践作品的基础上，或者根据个人专业特点和爱好，确立指导教师，通过组团申请获得科技创新项目，比如大学生“三小”科技制作，大学生创新创业项目等。大学物理课程平台上进行的制作实践活动，将有一部分转孵化为科技创新制作。学生将接受具有一定难度项目的挑战，能更好地将物理知识结合上自己的专业将它拓展到应用领域，这样更能产生创新点和激发学生的创新热情，达到学以致用目的。学生的科技创新制作是制作实践的高级阶段，要求学生尽可能地进行这个方面的训练。

5) 大学物理平台内教师与学生制作实践的融合。大学物理课程与学生制作实践的融合培养模式化体现在具有固定形式并且可持续地良性发展。教师的积极性是模式良性稳定运行的关键之一。教师具有选拔和考察制作实践团队的学生负责人、培养指导学生（包括情感培养）、项目执行方面的责任。教师需要调查掌握不同专业学生的兴趣和专业特长，掌握和优化学生制作实践的节拍，根据大学物理实验中心的需求和资源状况确定学生制作实践项目的

规模，制定切实可行的实践项目分配、组员、时间、师资配备方案，制定学生制作实践项目的资助、执行、自制仪器维护、资料存档、成果管理、考评奖励等规章制度，制定学生制作实践项目的科技创新项目的孵化计划，和与各专业进行联合培养孵化计划。在制作实践活动持续发展后，一部分学生对自然科学探索的兴趣增加，愿意以教师的科研小助手的形式加入与自己专业相近的研究领域进行研究性实验。

### 4 培养模式的实践

在南昌航空大学国家级大学物理实验教学示范中心（建设期）的平台上，中心的几位教师进行了两年多的实践。

首先，先期在大学物理课程中进行两个学期的随堂演示实验的实践。调查显示：95.6%的同学认可理论课上进行随堂演示实验；对物理理论课的学习、对科技制作、对自然科学探索分别有63.7%、48.7%和52.2%的同学兴趣有了非常强的增加。这一调查结果，为模式的实践奠定可行性基础。

其次，在全校各工科专业中招募志愿在平台上进行制作实践的学生40人，在教师的指导下确立了20个制作实践项目，其中第一批直接获得的学生科技创新项目7个，第二批孵化学生科技创新项目13个（详见南昌航空大学公示的第七届、第八届大学生科技创新制作项目立项表）。制作实践项目的内容主要是学生在大学物理理论和实验课程的学习中产生的，大部分来自于探索与演示实验，其中一部分与某些工科专业相结合，比如半导体温差发电、半导体制冷、主控体磁悬浮、特斯拉放电、PVDF膜联合发电、新型振动发电机、Crookes辐射计光热机械能转化效率、记忆合金节能发电、光学DNA、离子动力推进装置、跳跃式滑翔的极限运动器械、天文望远镜装备智能CCD系统、太阳能LED植物生长灯、自动关窗装置、无弦吉它等。学生来自电子科学与技术、光电信息工程、电子信息工程、测试技术与仪器、应用化学、环境工程、材料成型及控制、机械设计制造及其自动化、飞行器动力工程、飞行器设计与工程、经济学等专业。第一批7项制作实践的作品参加了全国高等学校第11届物理演示仪器评比并获得了二、三等奖。这些作品的产生，丰富了大学实验中心的演示实验仪器，同时制作实践的同学们的能力得到了很大的提高。截止到目前，这40个学生中，2人获得全国大学生物理实验竞赛二、三等，6人获得江西省大学生物理创新竞赛一、二、三等奖，1人兼获国家奖学金，1人获得985高校的研究生报送资格；公开发表项目相关的论文4篇，受理发明专利1项，实用新型专利4项；调研中国科技大学学生社团格物致知社后，成立了我校物理爱好者的学生社团，形成了能在各专业学生中普及和宣传物理思想方法的学生团体。

第三，在制作实践过程中，放开了让学生拆卸现有实验仪器。学生们维修和改进演示仪器4台；改进了3类基础实验仪器，如杨氏模量测量实验、迈克尔逊干涉实验和分光计的使用实验仪器；和教师共同设计和制作了两次校物理实验竞赛的仪器。

第四，经过制作实践，完成制作实践的学生中，有两组已经参加了实验中心教师的科研项目。其中有一组促成了中心教师和他们的专业老师科研合作，并接受联合指导他们的毕业设计。

因为实践中学生群体规模不大，实践时间也仅两年多，尽管有一些成效，但是演示实验仪器的丰富程度还不够，不足以对目前理论和实验教学产生较大的影响。虽然立项内容与大学物理理论课知识点直接融合有一定差距，但技术性的演示更能反衬出物理原理的奇妙<sup>[6,7]</sup>。在实践中，过分依赖教师的主观能动性，培养模式良性持久运行需要中长期的效果支持。

### 5 总结

依托大学物理实验国家级实验教学示范中心平台，以教师指导学生制作实践项目为主要

支撑形式,将学生制作实践融合到《大学物理》和《物理实验》课程中,让学生通过自制仪器来理解物理的思想、方法,提高其科学素养,强化培养了学生科学世界观、增强分析和解决问题的能力、培养探索精神和创新意识。通过制作实践,丰富了大学物理课堂教学中的演示仪器,巧妙的仪器设计和有趣的实验现象体现了物理的美感,激发学生学习物理、探知自然科学的兴趣。通过制作实践,丰富了演示与探索实验的仪器,形成了实验仪器的维护、改进和新陈代谢。大学物理课程与学生制作实践融合的培养模式,促成理论和实验课程在一定程度上贯通融合,弥补了大学物理课程学生创新制作实践的空白。这种弹性灵活的培养模式将理论、实验课教师的教学和学生的学习各方面有机的贯穿,使大学物理基础课教学从被动变为主动。模式的实践也是一般工科院校大学物理基础教学主动向各专业学科相适应的有益尝试。

#### 参考文献:

- [1] 郭奕玲。大学物理中的著名实验[M]。北京:科学出版社,1994。
- [2] 王玉凤,成正维,杨甦,薛菊梅,赵雁。开拓创新建设一流的物理演示与探索实验室[J]。中国大学教学,2005(10):7-8。
- [3] 郭力,石少波。演示实验制作促进动手动脑的大学物理探索式学习的改革尝试[J]。大学物理,2010(3):50-52。
- [4] “全国高等学校第11届物理演示实验教学研讨会”纪要(全文)[J]。物理实验,2013,33(9):48。
- [5] 张睿,王祖源,王治国。从案例出发在工科物理教学中对研究性教学开展探索[J]。中国大学教学,2013(9):63-64。
- [6] 赵在忠,杨莉敏,沈元华。复旦大学的物理演示实验在创新中前进[J]。物理实验,2001(3):26-27。
- [7] 李登,陈涛,万勇平,黄彦。自启动太阳能温差发电系统[J]。物理实验,2013(10):44-48。

## Explorations of the training mode integrated college physics courses with practical fabrication

Huang Yan, Zhu Quanshui, Gong Yongqing, Chen Fengying  
(The Centre of College Experimental Physics, Nanchang Hangkong University,  
Nanchang 330063, China)

**Abstract:** A training mode, college physics courses integrated with practical fabrication such as demo instruments and technical innovation, is proposed based on the teaching platform of college physics of educational institutions for engineering. By integrating the teaching and learning in the processes of the theory teaching and experiments teaching, the teaching situation with mutual coordination and promotion is formed, students' interests to the college physics is intensified, and their comprehensive ability and innovation capability of relating the theory to the practice are raised substantially. Expected effects have been achieved through teaching activities with a certain scale.

**Key words:** College Physics; Fabrication Practice; Training Mode

# 物理实验网上选课系统常见的问题及解决方法

徐如凤, 李向亭

(上海交通大学 物理系, 上海 200240)

**摘要:** 我们总结了我校物理实验网上选课系统常见的问题和相应的解决办法, 希望通过这篇文章和同行交流, 使我们的网上选课系统和相应的制度更完善, 更好地为老师和同学服务。

**关键词:** 网上选课系统, 教学管理, 物理实验

## 1 引言

我校物理实验教学中心从 2001 年使用网上选课系统至今已有 14 年, 因为学生可以根据自己的专业需要, 兴趣和时间进行选课, 受到学生的广泛欢迎。第一学期我们开设 16 个实验, 学生要从中选 7 个实验, 第二学期开设 18 个实验, 学生从中选 6 个实验。网上选课有很多好处, 但也存在一些问题, 我们在这 14 年中, 从无到有, 从不熟悉到现在的顺利使用, 有一些教训也相应地积累了一些经验, 在这里我们总结一下网络选课系统的常见问题和我们的解决办法, 以抛砖引玉, 期望能有兄弟院校的经验可以借鉴。

## 2 常见问题和解决方法

### 2.1 选课问题

开始时选课的方法是实验开始一周所有选修大学物理实验的同学同时开始在网上抢选, 由于选课人数很多, 近 3000 个同学同时抢选, 造成两个问题: 一个问题是, 有的同学选的时间段比较好, 有的同学选的时间段比较差。另一个问题是, 如果有同学同时选某个实验的最后一个位置, 由于网络反应慢, 几个同学会同时选上。这样实际选上的人数超过实验容纳的人数, 如每个实验的容纳人数一般为 16 人, 而实际选了 17 人, 第 17 个选进的是无效的, 这时教务老师要从网上查出谁是第 17 个选进的, 进一步查出该同学的联系方式, 然后电话通知该同学所选的某个实验是无效的, 并在网上给予注销, 这样给同学和教务老师都带来了很大麻烦。2011 年以后, 我们改进选课方法, 将 3000 个同学分成两批, 前 9 周同学一批, 后 9 周同学一批, 学期开始时先让前 9 周的同学选课, 到期中时再让后 9 周同学选, 这样同时抢选的同学人数变成原来的一半, 不到 1500 人, 上述两个问题也就迎刃而解了。

### 2.2 退课问题

2011 年以前学生网上退课的时间必须是提前 3 天才能在网上自己退课, 而一般同学都是在前一天才关心第二天所选的课, 由于不少同学临时有事, 造成第二天实验无法完成, 而这时已经过了网上自己退课的时间, 他们必须要到物理实验教学中心来找教务老师退课, 这样给学生带来了不少的麻烦, 也给教务老师增加了不少工作量, 为了解决这个问题, 我们将学生退课时间从以前的提前 3 天改为提前 1 天, 这样大多数同学不用到实验中心来退课, 自己在网上就能退了, 以前每天来教务老师这里退课的同学平均在 15~20 人, 现在到中心教务老师这里退课的同学人数大大减少, 既方便了同学, 也减少了教务老师的工作量。

### 2.3 实验报告交接问题

由于我们是网上选课, 并且中心老师大部分是兼职教师和研究生助教, 同学上完课后,

---

**作者简介:** 徐如凤 (1961—), 江苏滨海县人, 实验师。

交报告不方便，为了实验报告准确、方便交接，我们设置了班级信箱和教师信箱，给每个上课的老师和助教进行编号，每个老师都有自己的编号、对应的信箱和对应的图章，老师上课时在同学的原始数据上盖章，同学交报告时就根据老师盖的章交到对应的信箱，老师从自己的信箱中取出学生报告进行批改，批好后将报告再反还到学生对应的班级信箱，这样形成有序、稳定的教学次序。

#### 2.4 成绩评定问题

由于每个实验有几个不同的老师在上，评分标准不一致，为了解决这个问题，我们在期末处理成绩时，对每个老师打的平均分数进行加权，这样得出来的学生成绩更趋于合理性。

我们通过改进选课、退课的方法，设置信箱，成绩加权，从而使我们网上选课系统更科学，更完善。

### 3 总结

我们总结了我校物理实验网上选课系统常见的问题和相应的解决办法，希望通过这篇文章和同行交流，使我们的网上选课系统和相应的制度更完善，更好地为老师和同学服务。

## The problems and Solved Method in Internet Experiments Selected System

Xu Ru-feng, Li Xiang-ting

(Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The usual problems of Internet Experiments Selected System in Shanghai Jiaotong University was summarized. We hope exchange our experience with the same occupations to achieve the excellent serve to our professors and students.

**Key words:** Internet Experiments Selected System; Teaching Administer; physical experiment



## 清华大学与基辅大学实验教学对比

董占民, 梁昌林, 陈墨轩, 陈宜保  
(清华大学 实验物理教学中心)

根据《中乌政府间科技合作计划 2011-2012 年度合作项目》2012 年 9 月笔者对乌克兰基辅大学等进行了交流访问。顺访了基辅大学物理系教学实验室。

乌克兰国立基辅大学座落在基辅市东南部第聂伯河畔,始建于 1834 年 7 月 15 日,迄今已有 180 年的历史。基辅大学是乌克兰最著名的高等学府,欧洲十大名校之一,联合国教科文组织办学实力综合排名十六位,是乌克兰的教育、科学和文化中心,已与世界上 32 个国家的 52 所大学建立了友好校际关系,包括中国的北京大学、武汉大学等。

清华大学是中国著名高校,是中国高层次人才培养和科学技术研究的重要基地。

9 月 6 日参观基辅大学物理系教学实验室:笔者是清华大学实验物理教学中心的四位教师,都是从事实验教学工作,对基辅大学的实验教学很感兴趣,参观了基辅大学物理系的各个层次的实验教学实验室。

### 1 基辅大学理科系实验课设置

基辅大学是以文理为主的综合性大学,物理系设有实验物理教研室,负责普通物理和实验课程。该教研室有 5 名教授,8 名副教授,8 名以上研究人员和 10 名实验员。在著名院士 I.S.Horban 带领下,1972 年开始进行《新型功能材料和光电系统控制光学表面质量》等多项科学研究。与世界许多著名高校、研究所都有合作研究。

物理系教学实验室给物理、化学、地理、力学等理科系开设实验课,针对不同系所开设的实验内容和要求不相同,给物理系开设的实验更为全面,其他系的课程内容则相对简单,每年的学生人数大概在 700 人左右。整个理科实验课程分 6 个学期,其内容安排为第 1 学期:化学;第 2 学期:力学、热学;第 3 学期:电工、电子;第 4 学期:光学;第 5 学期:原子物理;第 6 学期:核物理,其中第 2,3,4 学期相当于我们的普物实验,后两个学期则相当于近物实验。

### 2 基辅大学实验课上课形式

基辅大学实验课分为大课、实验操作和讨论课三个环节,大课是所有学生一起上,由教师讲解实验历史、原理、方法等内容。实验课每次 10 人,每套仪器 1-2 人操作,学生上课前登记,登记记录在实验室长期保留,我们看到一个实验登记本是从 1989 年开始直到现在还在使用,实验室只有实验员值班,没有专职教师,时间比较自由。讨论课每次 20 人,由教师讲解实验报告,同学们讨论实验中遇到的问题。每个学生上 3 个课时的大课、做 3 个课时实验和参加 2 个课时的讨论。物理系的专业实验和教研室结合的更为紧密一些,我们主要参观了金属材料教研室的部分专业实验,其主要特点是这些专业实验内容都和教师的科研相关,即实验室科研和教学并用。另外还有一个专供天体研究的实验室,大约可容纳 10 人,供本科生、研究生和访问学者做天文研究分析实验,和荷、德、意等许多国家有学生交换,相互合作。

每学期开设实验课的内容:公共课部分由系定,专业实验内容则由教研室定,然后向学生公开,供学生选修,实验讲义会放在图书馆,每学期开学时学生可以去借阅,上完课再还

作者简介:董占民,副教授,博士,清华大学实验物理教学中心教师。

回。参与实验课教学的教师大约有 10 人，参与毕业设计指导的教师 25 人，普通物理实验有实验员 15 人，专业实验室有实验员 5 人，教师负责上课、带实验、带研究生，实验员协助教师，不上课。新实验建设由教师提出建设项目，帮助并指导实验员完成，教师负责写讲义。

### 3 清华大学实验物理教学中心

清华大学实验物理教学中心的普物、近物实验室位于校园东区 2003 年新落成的第六教学楼内。其中普物实验室已经能够开出基础物理实验和部分综合近代物理实验约 60 个，多数实验除包含基本内容外，还包含若干灵活性、设计性内容作选做和提高层次，在实验内容上有较强的综合性。实验室专职教师 2 人和实验工作人员 12 人。

### 4 清华大学普物实验上课形式

普物实验分为理科和工科，工科普物实验面对全校工科系，每年组织新上课的同学由专职教师讲 2 个课时的绪论，实验课，每班学生 20 人左右，每人一套仪器独立操作。由一名教师（或助教博士生）负责，实验前简单讲解实验要求等 20 分钟左右，学生提前预习，写出实验预习报告。实验结束后教师检查合格签字可以离开。时间 3-4 小时。实验后一周内交实验报告，由上课教师批改。

### 5 对比

基辅大学物理系教学实验室的主要特点是：普物实验内容以经典实验为主，实验前有大课，实验后有讨论课，不同系和专业开设内容有所不同，专业实验和各教研室的科研结合比较紧密。仪器设备相对比较陈旧，但这样的教学设备也给了学生更多的动手和了解实验内容的机会。

### 6 值得我们学习与借鉴的地方

基辅大学每个实验开始前先上大课，由专职教师进行讲解，我们的实验特别是工科普物实验，因学生多，教师少，每名教师与 2-4 名助教负责一个实验，学生循环上实验，分为必做与选做实验，助教经过集体备课、培训，合格后开始上课，上课环节助教博士生与专职教师没有区别，由于经验和时间问题，助教博士上课与专职教师还是有区别的，难保教学质量的一致。

上课环节，我们是每人一套仪器，由上课教师全程陪同，仪器比较新，好于基辅大学，基辅大学仪器比较少，比较陈旧，特别是基础实验，甚至每个实验只有一套仪器，实验时没有教师，1-2 名同学一组自己独立完成。

课后，我们由上课教师批改实验报告，与同学没有交流，报告中的问题仅能部分指出。基辅大学值得我们学习与借鉴的是有课后讨论，由专职教师讲解，对实验中的问题，同学的提问，可以获得直接反馈。这加深了同学对实验的理解。

部分基辅大学实验照片





# 基于学生应用能力构建地方院校大学物理实验项目的模式研究

盖双旗

(梧州学院 数理系, 广西 梧州 543002)

**摘要:** 针对地方性本科院校向应用技术和职业教育的转型, 基于提高学生的应用能力, 提出了依托学生实验中发现问题设置设计性实验课题、引入近现代物理拓展实验体系、应用实际工程技术手段提升实验品质、加入计算机技术辅助提高学习价值等构建大学物理实验项目的模式。教学实践结果表明, 随着实验内涵的拓展和增强, 实验品质 and 价值的提升, 学生的学习热情增加, 尤其是一些应用型强的实验受到学生欢迎, 师生双方的自主创新能力都有了明显的提高。

**关键词:** 地方院校; 学生应用能力; 大学物理实验; 构建模式

近年来, 在借鉴国外成功经验的基础上, 国内许多高校对大学物理实验课程进行了不断的改革和创新, 其中一些做法得到了普遍的认同, 如建立逐级提高的多层次实验教学体系, 增加“综合性”和“设计性”实验, 以网络为平台建立开放实验教学模式等<sup>[1]</sup>。但对于地方性本科院校而言, 由于经费、人员、场地等诸多方面的限制, 很多学校对大学物理实验项目基本没做太大的调整和改进, 开设的“综合性”和“设计性”实验也未达到预期的效果, 学生的兴趣和自主能力并未得到有效提高<sup>[2]</sup>。

## 1 几个认识前提

### 1.1 地方性本科院校学生的学习目标认知

地方性本科院校今后作为应用技术型、职业教育型的前缘阵地, 首先要适应当前社会发展的需要, 所以其培养学生的目标应该是能适用于当前社会的复合型、技能型和应用型人才。这不单单是社会的现实需求, 更是绝大部分学生对学习目标的认识和学习意图的体现。因此他们会对大学物理实验产生诸如理论陈旧、手段落后、应用价值低、与科技发展脱节等等片面看法就不难理解了。

### 1.2 基础验证性实验是大学物理实验的主体

基础验证性实验是大学物理实验的主体部分, 其中的一些经典实验是应该坚持开设的<sup>[3]</sup>。我们不能过分贬低这些基础验证性实验的作用, 这些实验有助于学生理解物理学的基本概念和基本理论。特别是大学物理实验主要针对低年级学生开设, 从认知规律出发, 也不能过分强调进行综合性实验和设计性实验<sup>[4]</sup>。

### 1.3 充分利用现有的实验室资源

对于任何一个国家的基础物理实验室来说, 筹集建设资金都是一大难题。我们不必过于强调实验仪器的更新换代, 实验项目的改头换面, 充分利用好学校现有物理实验室的资源, 提高认识, 克服困难, 也可以达到改革大学物理实验的目的。

**基金项目:** 广西高等教育教改工程 A 类项目(2012JGA214); 梧州学院教改项目(Wyjg2013A009)

**作者简介:** 盖双旗(1973—), 男, 河北石家庄人, 讲师, 从事基础物理实验的教学和研究。

## 2 实验项目构建的设计思想

### 2.1 增强大学物理实验的内涵

现行大学物理实验基本上是验证某个物理学理论、某个物理学定律的正确与否。而学生总在潜意识中已经认定这些理论、定律是“一定正确和毫无疑问”的,学生单纯为验证而实验是提不起兴趣,发挥不了的主动性和创造性的。我们要通过实验指明物理学理论大厦是怎样建立在实验基础之上的,让学生真正懂得什么是真实的物理世界,让学生认识到物理世界不是理论课中说的那么简单,事物也不是理论描述的那么纯粹。

### 2.2 大学物理实验要更多体现科技发展和科技进步

考虑到有很多非物理专业的学生要做大学物理实验,我们不能总拿一些十九世纪内容的物理实验来满足他们,可以把一些具有近现代内容的物理实验引入到大学物理实验中<sup>[5]</sup>。可针对不同专业学生的专业特点选择相应的近现代物理实验项目予以引入,并根据这些学生的知识水平和专业特点修订实验内容。

在传统的大学物理实验中,可以精选保留一部分经典的实验项目,更新一些实验内容或测量方法与现代科技发展严重脱节的实验项目。可以把相关的新技术、新工艺渗透到大学物理实验项目中,增加新的实验内容,提升其实验档次<sup>[6]</sup>。这样大学物理实验与现实生活、科学技术结合得更加紧密,能够激发学生对物理实验的兴趣,并感到能学以致用。

现代科技的发展离不开计算机技术的作用,计算机应用能力已成为当代大学生的一种必备能力。计算机的投入是构建大学物理实验项目的一个重要组成部分,其作用一方面可以用来进行繁琐的数据运算,提高实验效率;更可以考虑将传感器、单片机、计算机组合起来,组成实验数据的采集、传送、计算、分析、打印的一体化系统<sup>[7]</sup>。

### 2.3 增强大学物理实验的趣味性

兴趣是最好的老师,在原有的大学物理实验项目基础上,可保留基本的实验原理不变,从学生感兴趣的生活现象和自身发现入手,通过改变实验器材、实验结构、实验内容、实验要求等来重新设计实验项目。这样实验就带有了一定的研究性质,方式比较新颖,学生可发挥的自由度较大,能动性较高。

## 3 实验项目的构建模式

在高效利用学校现有实验室资源的基础上,通过师生交流、合作、创新,我们总结出一些行之有效的构建大学物理实验项目的模式。

### 3.1 依托学生实验中发现的问题设置设计性实验课题

该模式基本操作流程为:“学生实验发现并提出问题”→“教师分析问题价值”→“教师设置新实验要求”→“学生进行实验设计”→“学生实验解决问题”。

学生在进行大学物理实验的过程中会发现各种各样的问题,教师可注意收集学生发现的具有普遍性和研究价值的问题,以此为基础设置设计性实验课题让学生开展研究、探索。这种开展设计性实验的方式是在原有验证性实验的基础上进行,即可以拓展学生对实验原理的认识和提高了实验仪器的利用率;又可以保证学生有充足的兴趣进行科学探究,达到设计性实验的目的,可谓一举两得。具体实验案例可见文献[8]:关于“气垫导轨实验中光电计时系统误差研究”实验的探索。

根据我们的实践经验,只要鼓励学生在实验中去发现和提出问题,每个验证性实验都可以开设出相应的设计性实验课题。如对于力学基础实验,可开出气垫导轨实验的“用平均速度代替瞬时速度所引发的系统误差的研究”;杨氏模量实验的“微小伸长量测量方式的研究”;转动惯量实验的“不规则物体转动惯量的测量研究”等等<sup>[9]</sup>。

### 3.2 引入近现代物理实验拓展实验体系

该模式基本操作流程为：“学生专业特点分析”→“教师选择实验项目”→“教师修订实验内容”→“学生进行实验”→“收集学生反馈信息”。

随着科学技术的飞速发展和科技产品对人们生活品质的不断提升,一些原属于近现代物理实验的内容现在已成为大学物理实验范畴,如光电技术、传感器技术、现代通信技术等<sup>[9]</sup>。特别是对于不能进行近代物理实验的非物理专业的学生而言,将近现代物理实验项目引入大学物理实验中,促使原有的大学物理实验与近现代物理实验间的重组与融合,拓展实验体系尤为必要。

以电子信息工程专业的学生为例,根据其专业特点和学生诉求,可将光电效应实验、霍尔传感器实验、光纤通信实验、磁悬浮实验、硅光电池实验等有较强应用价值的近现代物理实验项目引入到他们的大学物理实验课程中。值得指出的是,虽然这些实验中的实验仪器没有改变,但其实验内容和实验目的却根据电子信息工程专业学生的专业特点和知识能力水平加以了修订。如光电效应实验用的还是原来的光电效应实验仪,但在实验中去掉了测量普朗克常数这部分实验内容,强调的是以实验中观测的现象来理解光电子发射的原理,并注重测量光电管的伏安特性曲线。

教学实践表明,这些引入的近现代物理实验由于和学生专业较吻合,现代气息浓厚,又具有较强的应用性,修订后的实验内容适合未学习过近代物理的非物理专业学生,因此比较受到学生的欢迎。

### 3.3 应用实际工程技术手段提升实验品质

该模式基本操作流程为：“工程仪器收集”→“教师选择实验项目”→“教师编写实验内容”→“学生进行实验”→“收集学生反馈信息”。

学生对现行的大学物理实验一个很大的诟病就是没有实用价值,虽然这个看法有些片面,但我们却不能不重视。其实很多常规的大学物理实验项目都和实际工程技术应用有着千丝万缕的联系,我们要做的只是把其发掘出来,添加到实验中去,提升实验品质。

如把 MW8-JTRO1 便携式单点热流计引入到应用物理学专业的“稳态法测量不良导体的导热系数”实验中,并相应增加了“使用热流计测量墙体表面热流”的实验内容,主要是让学生练习使用热流计对建筑物的墙体进行热流密度的测量,对比了解其保温性能。实验加深了学生对热传导傅立叶定律的理解,让学生了解了实际工程测量的手段,并直观地认识到各种材料的保温性能差异。这个实验的效果非常好,学生参与积极性很高,学习态度得到改善,纷纷反映没想到大学物理实验可以和现代工程技术联系的这样紧密。

该模式可充分依托学校的专业实验室和校外的教科研基地,逐步把适合的工程测量仪器引入到相应的大学物理实验中,让学生实验接近于真实环境,得到有价值的锻炼。

### 3.4 加入计算机技术辅助提高学习价值

该模式基本操作流程为：“教师分配任务”→“学生编写实验数值处理程序软件”→“实验程序软件安装使用”→“收集反馈信息”→“修改完善实验程序软件”。

在基础物理实验教学上,计算机的广泛使用正是我国和发达国家的最大差距,美国大学的大学物理实验中约 1/3 使用计算机<sup>[10]</sup>。有些实验教师有种误解,认为计算机技术投入大学物理实验会降低学生的分析、处理、解决问题的能力,他们认为越是一体化、智能化的实验系统越不能达到培养学生、提高学生素质的实验目标。我们认为,计算机只是一种辅助工具,计算机投入实验能让实验进行的更加便利,省下大量调试仪器、采集数据、计算处理的时间,而能让学生把精力放到理解原理、发现问题和解决问题等更有意义、更有价值的学习中。

为把计算机技术顺利引入到大学物理实验中,可从师生两方面入手,对学生方面,首先是对物理专业高年级学生提出了一个要求,即是让他们分组编写各个大学物理实验的数据计

算和处理程序软件, 目标是为达成实验数据的自动化处理和图表显示<sup>[11]</sup>。然后把这些程序安装到实验室计算机中, 让做大学物理实验的学生操作使用并提出反馈意见, 加以修改后重复这一过程, 以求最终获得界面明晰、操作简单、结果准确的程序软件。对教师方面, 借鉴其他高校的经验, 我们选取了几个有代表性的实验, 使用计算机辅助改进实验手段, 使实验变得简单直观。如“牛顿环干涉实验”中利用 CCD 成像系统对其进行改进; “分光计实验”中在望远镜的目镜上安装了视频摄像工具帮助理解。以计算机技术辅助构建实验一体化系统, 完成实验数据的采集、传送、计算、分析、打印, 这是我们的最终目标。

#### 4 结语

以上大学物理实验项目的构建方式实用有效, 操作性强, 经过几年的教学实践, 发现参与学生和指导教师在自主创新能力上都有了明显的改变。学生方面是充分激发了其学习的积极主动性: 以前许多学生做实验是草草测完数据后就无所事事, 现在这些重新构建后的实验项目让学生总能发现一些自己感兴趣的, 想要深入研究下去的内容, 课堂实验时间不够用, 就利用课外时间进行主动的学习和探讨。教师方面是形成了一种教学传承: 每个创新的实验设计、每个引入的实验器材、每个自编的实验项目指导书都是凝聚了参与师生心血而成, 而不断更新和改进的自编校本实验教材更可体现出这种厚重的传承资本<sup>[12]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 王慧琴, 吴庆丰, 梁晓军, 等。以应用为导向的大学物理实验改革的探讨[J]。实验技术与管理, 2012, 29 (9): 148—149。
- [2] 陈晓莉。普通物理实验教学现状调查及对策研究[J]。西南师范大学学报(自然科学版), 2005, 30 (3): 586。
- [3] 金恩培。浅谈美国、加拿大几所大学物理实验教学情况[J]。物理实验, 2002, 22 (1): 46。
- [4] 沈元华。美国大学物理实验教学考察报告[J]。实验室研究与探索, 2001, 20 (1): 89。
- [5] 沈元华。基础物理实验教学的与时俱进—复旦大学物理实验课程改革介绍[J]。大学物理, 2002, 21 (12): 43。
- [6] 龚小华。独立学院大学物理实验教学改革的探讨[EB/OL]。2001—02—01, <http://www.17net.net/Article/edulink/11281.html>。
- [7] 柳闻鹃, 李建设, 陈光伟, 等。物理实验平台的研究与探索[J]。实验技术与管理, 2008, 25 (12): 171。
- [8] 盖双旗。关于“气垫导轨实验中光电计时系统误差研究”实验的探索[J]。大学物理, 2011, 30 (6): 26。
- [9] 吕斯骅, 段家牴。全面改革物理实验教学体系与内容, 培养有坚实基础的创新人才[J]。大学物理, 2003, 22 (1): 34。
- [10] 沈元华。访美归来谈物理实验的教学改革[J]。物理实验, 2001, 21 (6): 43—45。
- [11] 盖双旗, 时伟, 陈伟华。大学物理实验的简化、深化和拓展探讨[J]。大学物理实验, 2012, 25 (4): 115。
- [12] 傅昭铭。由台湾大学普通物理及实验教学改进—兼谈台湾普通物理教学概况[J]。物理与工程, 2008, 18 (4): 8。

## The construction of the project the students ability of application on the university physics experiment

GAI Shuang-qi

(Department of Mathematics and Physics, Wuzhou College, Wuzhou 543002, China)

**Abstract:** For local colleges to transition the application technology and the occupation education, improve the ability of students based on the discovery, set design experimental project, introducing the modern physics experiment system, expand the application in practical engineering technology to enhance the quality, to join the computer aided learning value to construct the university physics experiment project model based on the students in the experiment. The practical results show that, with development and enhance the experimental content, experimental quality and enhance the value of the learning enthusiasm of students, increase, especially the application of strong experimental welcomed by the students, the ability of independent innovation of both teachers and students have been obviously improved.

**Key words:** Local colleges and universities; Application ability; University Physics Experiments; construct



# 近代物理综合性实验开发及其提高学生综合能力

云月厚, 那 日, 张常在

(内蒙古大学 物理科学与技术学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

**摘 要:**通过近代物理综合性实验课程开发, 结合《光纤光学基础及光纤通讯技术系列实验》教学体会, 对近代物理综合性实验开发及其提高学生综合能力进行了有益的探讨, 对培养和提高学生的综合能力, 造就复合型人才具有积极作用。

**关键词:** 综合性实验; 培养和提高; 综合能力

## 1 引言

随着高新技术日新月异的发展, 未来的人才不仅要求其具备扎实的专业基础知识和技能, 更在于其创新意识和创造能力的发挥。要使学生适应社会发展的需要, 综合性应用物理实验是一种有效的方法, 是通过综合训练来培养学生的研究能力和综合素质, 主要是创新能力和研发能力, 通过实验硬件建设、综合性教学方案的精心设计及组织实施, 为发挥学生自身主观能动性营造良好的环境。充分调动学生的学习主动性、积极性和创造性, 并把所学得的基础物理知识应用于实验的选题与自主综合设计。但开展综合性应用物理实验, 存在指导教师不足、仪器设备不配套及课时安排冲突等诸多问题, 而从近代物理实验课程中开发出综合性应用实验, 使学生在完成近代物理实验课程同时, 有选择的进行综合性物理实验训练, 已显出一定的优势, 利用现有仪器“微弱信号检测系列实验”、“微波系列实验”、“光纤光学基础及光纤通讯技术系列实验”等设计实验研究项目, 在一定的实验条件和范围内, 让学生完成从选题、实验设计、亲自动手操作到结果分析和论文撰写全过程。在实验过程中, 使学到的基础理论知识与实践的感性认识更好地相结合, 并以此树立其严谨的科学研究作风, 通过近代物理综合性实验的开展, 使学生接受一次较为完整的科学思维的训练, 为今后进行创造性学习和创新思维的发展积累了经验, 培养学生进行科学研究的方法。

## 2 注重综合性应用物理实验开发, 提高学生的实验技能和创新思维能力

在近代物理实验教学中, 已经对实验室现有 CSY-10C 型光纤信息及通讯实验系统进行了综合性实验开发, 紧密围绕近代科技发展中光纤光学这个前沿学科, 涉及光纤光学中信息获取及传输理论的主要方面, 在近代物理综合性实验开发出了涉及光纤光学基础实、光纤传感器及光纤通讯相结合的实验。根据不同学生的个人兴趣, 确立一个基础知识与应用技术相结合的综合题目。为了充分调动学生的学习主动性、积极性和创造性, 并把所学得的基础物理知识应用于实验的选题与自主综合实验, 在光纤光学及光纤通讯方面, 根据现有实验条件, 完成从选题、实验设计、亲自动手实验及结果分析, 写出实验报告全过程。最终达到提高学生发现问题、提出问题、分析问题和解决问题能力的目的, 丰富了实验教学内容, 拓宽了学生的知识面, 提高学生的实验技能和创新思维能力。

光纤光学是光纤实现信息获取及传输大容量信息的物理基础, 开展光纤光学基本实验开发是进一步研究光纤通讯的基础, 在开始综合实验选题前, 集中安排预习实验, 先由教师指导下, 学习实验基本原理及注意事项, 熟悉实验仪器设备, 并进行光纤光学基本知识演示及光纤光学基础实验研究, “光纤数值孔径性质及参数测量实验研究”为必选实验, 因为光纤数

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(J1103214)

值孔径是光纤能接收光辐射角度范围的参数,同时它也是表征光纤的光源、光检测器及其它光纤耦合时的耦合效率的重要参数,通过本实验逐步深入了解近代科技发展中光纤光学这个前沿学科。精心开发备选实验题目,引导学生自主选择各自感兴趣的题目,指导学生认真拟订实验方案,选择仪器配置,大胆改进实验方法,以启发式教学为主,灵活运用指导示范,及时解决实验中碰到的疑难问题,在此基础上进一步研究光纤通讯原理及器件技术,注重创新意识和创新能力的培养,为学生提供发展个性和施展才能的机会,培养学生的应用研究能力及综合素质,并为掌握光纤技术这类高新技术的原理奠定实物概念和建立应用技术基础。

本实验室光通讯系统,是用 $\lambda=1.31\mu\text{m}$ 与 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 的二种波长,实现单模光纤的波分复用(WDM)光通讯,从原理和技术上都是先进的,光通讯经单模光纤长距离传输后进入解波分复用器(本实验仪器波分复用器和解波分复用器是同一元件),解波分复用器是将多路复用的光信号按波长分开分别送入光接收器中。光接收器是将光信号变为电信号,送给信号处理单元(调制模块),完成信号的放大,滤波和线性校正,最后进入信号接收电路,完成音频、数据和图像的复原,送给用户。在教师指导下完成《光纤模拟通信实验开发—音频电话及视频光通信》实验设计,通过《光纤光学基础及光纤通讯技术实验开发》综合性实验研究,收到良好教学效果。

### 3 注重培养科研素养,形成适应现代教育观念的实验教学培养模式

在光纤通讯实验教学中发现,不仅要求学生有基础理论知识学习,同时要求学生学习知识跳跃性较大的光纤基本特性以及光纤传感器,完成这类实验的过程与解决实际科研问题具有较强的模拟性,为激发他们进行创新实践的积极性,在实践过程中提高他们的创新精神和创新力,必须研究具体的切实可行实验题目及实施方案,根据授课对象,指导选择实验题目及授课方法,对理论基础扎实的物理系数理基地专业学生,强调对实验原理、基本理论的深入了解,侧重培养科研素养;对其他专业的学生,注重开拓思维,启发创新性,加强本实验在社会生产及科研中实际应用方面的论述,采取因人施教,在教学中深入浅出,注重提高学生的实际动手能力,并紧密结合实际,提高了学生做实验的兴趣。注意用新技术和新方法改造传统实验,不断更新教学内容,保证了实验项目的先进性和与时俱进的特点。

将光纤通讯现代技术应用到近代物理综合性实验之中,让学生掌握最新的科学技术成果。学科交叉与知识融合是现代科学发展的显著特点,在实验技术上也呈现出新颖、全面、先进、实用和相互渗透的特点。改变教学内容的结构与层次,合理和有效地引入先进的科学技术、新方法和新概念,按学生能力形成的新的实验课程体系,实现由验证性实验向设计性实验、由单一性实验向综合性实验、由单纯的传授知识型向知技能型的转变,形成适应现代教育观念的实验教学的培养模式。通过近《代物理综合性实验开发及其提高学生综合能力》培养研究,设计激发学生的创新积极性的实验题目,使学生学会研究物理规律和分析实验现象的思想和方法,学会分析和评价实验结果,达到激发学生强烈的学习热情,变被动学习为目的;通过适当的教学模式,并配套科学合理的教学方法,充分体现以学生为本,培养学生探索精神、科学思维、实践能力、创新能力,造就大批具有综合性实验能力的创造性人才。

### 4 结论

在开展近代物理综合性实验研究中,开发系列性综合实验题目是前提,本校物理实验教学中心近代物理课程“微弱信号检测系列实验”、“微波系列实验”等均可以开发出适合的综合实验题目,不断拓展学生选题范围及知识面。及时改进实验教学培养模式是核心,将以前由教师排好实验、准备好仪器、学生来做实验的状态,过渡到在教师指导下,学生自己选择实验题目,由学生自己查阅资料、设计实验方案、选择仪器、独立完成实验,撰写总结报告,

从而培养和提高学生的综合思维和创造能力，为学生提供发展个性和施展才能的机会，对解决学生就业及培养 21 世纪高素质复合型人才有积极作用。

**参考文献：**

- [1] 贾英全，茹宏强，何凤鸣，等。我校的综合性实验改革实践[J]。物理实验，1999，20（5）：27-29。
- [2] 肖爱萍。综合性和设计性实验教学浅谈[J]。中山大学学报论丛，2006，26（7）：229-231。
- [3] 张朝晖，吕斯骅。综合物理实验和研究性创新物理实验的建设[J]。大学物理，2009，28（11）：48-50。
- [4] 江影，邱淑霞，庞宁。综合设计性物理实验项目开发与指导方法探讨[J]。大学物理实验，2012，25（6）：116-118。

## **Modern comprehensive experiment of physical development and improve the comprehensive ability of students**

YUN Yue-hou, NA Ri, ZHANG Chang-zai

(College of sciences and Technology, Inner Mongolian University, Huhhot 010021, China)

**Abstract:** Through a comprehensive curriculum development in modern physics experiments, combined with “fiber optics and optical fiber communication technology-based series of experiments,” teaching experience, comprehensive experiment of modern physics and improve students’ comprehensive ability to develop a useful discussion on culture and improve student comprehensive capabilities, creating complex talent has a positive effect.

**Key words:** Comprehensive experiment; develop and improve; comprehensive capabilities

# 对大学物理实验课评估方法的调查报告

刘丹

(纽黑文大学, 美国)

**摘要:** 在大学物理实验课程中, 是否以小组为单位提交实验报告将更有助学生的积极参与? 作为一名大学物理实验课的老师, 是不是会给学生期末考试呢? 如果是的话, 期末考试占课程的比重会是多少? 在美国纽黑文大学, 四个物理实验班的 64 名同学共同完成了一份关于他们物理实验课程的调查问卷。本文将展现和分析这份调查的结果。

**关键词:** 评估; 试验报告; 实践能力测试

## 1 引言

长期以来, 大学物理实验是所有大学院校对理工科本科生所设置的一门必修课程。它可以帮助学生更直观深刻的理解课堂学习中的概念和理论, 培养他们的动手能力, 并且增长了理论联系实际的解决问题的能力。因此, 在各门课程中, 物理实验课的重要性不言而喻。而如何评价学生们在大学物理实验课中的表现, 无疑显得非常重要。

就目前来看, 大学物理实验课程的评估, 最普遍的方法是基于参加实验课程的学生们的书面材料, 例如实验报告或者书面考试。另外, 课堂表现和出勤也常常会作为分数计入成绩。但是, 目前没有统一的课程评估标准为大学物理实验老师提供参考。如何制定一套准确、公平、标准的大学物理实验课程的评分方法和评估标准是值得讨论的。很多学者都作着相关的研究<sup>[1-3]</sup>。

就大学物理实验老师决定如何对学生进行评估, 本文将从调查、分析学生对此看法方面, 为大学物理实验老师和物理教育研究者, 提供一份制定这套评估系统的参考。

## 2 调查结果及讨论

这份学生对大学物理实验课的评估的问卷调查具有一定的普遍性。

2013 年秋季学期, 期末考试前, 美国纽黑文大学的四个物理实验班的 64 名本科生完成了这份调查问卷。这些学生就读于不同的院系, 从大一到大三, 每个年级都有。问卷形式是匿名制。这些学生 90% 的实验课的总成绩基于提交小组的实验报告, 实验报告要求论文格式; 10% 的总成绩来自书面的期末考试。

以下是关于这份问卷的调查分析结果。

### 2.1 小组实验报告和个人实验报告

作为一种评估依据, 小组实验报告和个人实验报告各有利弊。

大多数的大学物理实验操作是以小组为单位的。相对于提交相同数据的个人实验报告, 小组实验报告的质量一般更高。提交小组实验报告不但提高了学生写实验报告和批改实验报告的效率, 而且这种报告形式还可以促进实验小组成员间的讨论、交流和合作。小组成员之间可以通过相互学习, 取长补短。

但是, 相对于个人实验报告的评估, 小组实验报告对于参加小组的个人成绩的评估准确性不高。对于小组实验报告, 每个小组成员会得到同样的成绩。实验中分工是否平衡, 对实

---

**作者简介:** 刘丹(1982—), 女, 黑龙江省大庆市人, 讲师, 博士, 从事理论凝聚态物理和物理教育。

验的理解和掌握的程度是否相同,这是很难从小组实验报告中体现出来的。

根据问卷分析,结果是91%的学生更加倾向于提交小组实验报告。

## 2.2 期末考试

在采用小组实验报告的前提下,一定比例的个人测试会对评估的公正性和准确性有所帮助。这是很多实验课老师采用不同比重的期末考试的原因。

调查表明,只有17%的学生希望有书面的期末考试作为物理实验课程的测评手段之一。其中,14%的学生认为期末考试占总成绩的15%是一个合适比重。余下3%的学生则期望更高的比重额。

## 2.3 实验报告格式

实验报告可采用提交数据为主的简洁格式或相对内容丰富的论文格式。论文格式的实验报告中简介、理论介绍及实验过程部分都可以参考实验手册,学生的发挥空间不大。部分物理实验课老师认为这些部分可以通过其他方式来考察,因此要求学生提交以数据为主的试验报告,附加例如对实验原理部分的分析,来深层次考察学生对实验的理解<sup>[4]</sup>。

根据调查报告显示,相对只提交数据为主的简洁格式的试验报告,36%的学生认为论文格式的实验报告非常有帮助;44%的学生认为论文格式的实验报告有帮助;20%的学生认为论文格式的实验报告没有帮助。

## 2.4 小组实验中的职责分配

大学物理实验课程中,很多实验是以小组为单位合作完成的。在一个学期中,小组成员轮流担任不同的工作,比如数据测量,数据分析等,是一门物理实验课在课程规划中对学生职责分配的目标。

而数据表明,在没有特殊的监督手段下,52%的学生在一个学期中从未改变过自己的职能,比如一个学生可能因为比较擅长数据处理,因此一个学期都在作数据处理的工作,在其他方面没有得到锻炼。28%的学生在一半以上的实验中作着一一直相同的工作。

## 2.5 实验小组的大小

学校和班级的具体客观情况决定实验小组的大小。在有选择的情况下,选择合适的实验小组的规模,既可以增加同学间的互相学习和合作,又可以保证个人的实践操作的机会。

根据调查,61%的学生认为3人一组是最佳的实验小组的大小;34%的学生认为4人一组是最佳的选择;3%的学生认为2人一组是最佳的选择;只有2%的学生更倾向于单独完成实验。

以上主要是对试验报告和书面考试评估手段的调查分析结果。除了实验报告和书面考试要作为理论知识应知应会的考察点以外,在一门实验课程中,实际操作、动手能力的评估也应该占一定的比重。目前,主要有三种对学生实际操作、动手能力的评估方法:观察学生在实验课中的表现,评估学生对提问的回答,评估学生的实验结果<sup>[5]</sup>。

在考试形式方面,其他的可行性方法包括同学之间的测评,自我测评,实际操作测试和点分制的评估。实际操作测试基于类似驾照路考或者钢琴等级考试的思路,即给定一个任务、操作要求和相应的评分系统<sup>[6][7]</sup>。点分制的评估依据一个一系列任务的列表和评分系统。当学生每完成一项任务,就能得到一个相应的分数,然后整个实验结束后,累加起所有的分数就是最后的成绩。

## 3 结论

这份问卷调查反映了学生对于大学物理实验中对学生的评估的看法和倾向性;为大学物理实验老师在设置课程大纲的评估部份,为物理教育和科学教育研究学者在相关的研究工作中,提供一份参考。

参考文献:

- [1] Uri Hofstein, Avi Hofstein. Objective and continuous assessment of student performance in the physics laboratory. *Science Education*, 1982, 66: 581-591.
- [2] Grant Wiggins. A true test: Toward a more authentic and equitable assessment. *Phi Delta Kappan*, 1989, 70(9):703-713.
- [3] Richard Gott, Sandra Duggan. Problems with the Assessment of Performance in Practical Science: which way now? *Cambridge Journal of Education*, 2002, 32(2), 183-201.
- [4] Taoufik Nadji, Michael Lach, Patricia Blanton. Assessment strategies for laboratory reports. *The Physics Teacher*, 2003, 41: 56-57.
- [5] Wendy McColskey, Rita O' Sullivan. How to assess student performance in science: going beyond multiple-choice tests. USA: Serve, 2000: 9.
- [6] Timothy F. Slater, Joseph M. Ryan. Laboratory performance assessment. *The Physics Teacher*, 1993, 31(5): 306-309.
- [7] Richard J. Shavelson, Gail P. Baxter, Jerome Pine. Performance assessment in science. *Applied Measurement in Education*, 1991, 4(4): 347-362.

## **Investigation into undergraduates' preference of the evaluation of physics lab work**

Liu Dan

(University of New Haven, West Haven, CT 06511, USA)

**Abstract:** Whether group lab report assignments can more engage undergraduate students in physics lab than individual lab report assignments? As a physics lab lecturer, do you give students a final exam in your lab sessions? If so what percentage of the final test should be given? A pool of sixty-four undergraduate students in four different lab sessions at the University of New Haven, USA completed the survey of their preference on how to evaluate students' lab work. The report will present and discuss the result of this investigation.

**Key words:** Assessment; lab report; performance test

# 关于大学物理实验层次化教学的探讨

胡清, 魏云, 吴晓立  
(西南交通大学 物理实验中心)

**摘要:** 在大学物理实验教学中, 以层次化、专题式实验的教学方式来组织教学内容, 并与课外实验项目相结合, 在培养学生认真思考问题, 独立做事方面, 进行了初步的探讨。

**关键词:** 物理实验教学; 层次化、专题式; 课外实验项目

## 1 引言

随着高等教育的发展, 教学规模也随之扩大, 针对实验类基础教学或教学改革所涉及的面和量也显然加重。针对我校(工科院校)物理实验与工科专业基础实验, 专业实验相衔接的教学要求, 使得学生在了解物理实验的教学特点, 实验技术与实际应用之间的关系, 动手能力的培养等方面有所认识, 学会分析问题和解决问题的方法, 以达到综合素质培养的教学目的。

由于物理实验具有涉及的面广, 仪器的种类较多, 包含的实验技术丰富, 推广应用的范围广泛等特点; 而学生进入大学时多数实验基础较差, 对于实验课的教学目的和意义认识不足, 对于实验课的教学方法还不太适应, 对于众多实验内容之间的相互关系缺乏了解, 对于实验与应用之间的联系也不清楚, 所以我们提出了采用层次化、专题式实验的教学方式, 在部分学生中进行了实验教学的改革和探讨。层次化、专题式实验教学包括实验内容的选择, 教学方法的调整, 仪器的调整与选用, 教材、讲义的编排、还增加了课外实验项目等, 总之在实验教学改革过程中逐渐积累了一点经验, 有了一些新的认识。

## 2 教学探讨

### 2.1 层次化实验教学

层次化实验是指从基础性实验开始, 将具有相关内容的实验组合在一起, 从中提炼出具有共同特点的实验方法, 实验技术, 测量方法, 与实际应用结合起来, 建立其对应的关系, 达到学习与应用相结合的教学目的。

例如“示波器的调整和使用”, “电子束在电场中的偏转”是两个基础物理实验, 但是两个实验中共同之处是示波管。在“电子束”实验中主要研究对象是示波管的物理结构和工作原理, 实验中要测量其相关参数, 研究彼此之间的关系, 属于验证性实验。而“示波器的调整和使用”实验是学习通用示波器的使用和测量, 属于应用性实验。在讲解示波器原理时, 示波管是作为示波器的核心部件, 其它外围电路是围绕核心部件搭建起来的。如果将两个实验从内容上分开来上, 彼此之间的对应关系就不容易建立起来, 还会丢失很多实际的内容, 学生也不能很好地掌握和理解教学目的和意义, 如果将其列为层次化实验教学就可以解决这些问题。

在“电子束在电场中的偏转”实验中, 实验目的是了解示波管的结构和工作原理, 理清物理量之间的相互关系, 在电子枪部分得到电极与电位的配合关系, 辉度与聚焦的控制方法, 以及如何改变电子运动的速度等; 在偏转部分得到偏转板上偏转电压与屏幕上偏转距离的对应关系, 确定了线性偏转系数, 以上是该实验的教学内容。

如果在这台实验仪器的基础上再增加了一些单元电路和控制部分, 就可以将其改造成具有“组装示波器”功能的教学仪器, 该仪器不仅保留了“电子束在电场中的偏转”原有的实验内

容,而且还具备“组装示波器”的功能,这样就将两个实验联系在一起。从“电子束在电场中的偏转”规律的研究,到“组装示波器”经历了从基础知识向实用技术转变的过程,使得知识结构也发生了变化,也使得教学内容向着学、用结合的方向发展。

在“组装示波器”过程中,每一步的操作其目的和意义都非常明确和直观,能够达到很好的教学效果。若在水平偏转板上施加一个线性连续变化的自动信号(锯齿波信号),使得光点的运动为匀速运动;在垂直偏转板上,通过衰减器将信号的幅值所对应的电压加到偏转板上,就可以实现光点随信号幅值变化规律的跳变;根据二维平面内波形合成的原理,学生可以将正弦信号和锯齿波信号分别送到对应的偏转板上,屏幕上就显示出合成的正弦波信号波形,这就是示波器的波形合成的原理,非常直观。

但是,由于正弦波和锯齿波两个信号是相互独立的,它们之间存在着相位的漂移,使得显示出的波形不能稳定,为解决这一问题,在仪器上增加了同步控制器,由学生自己选择采样信号实施同步控制,使得合成波形达到稳定状态,由此可以根据示波器的频率关系  $f_y : f_x = n$  ( $n = 1, 2, \dots, n$ )  $n$  为整数,来理解其中的含义。在测量中波形稳定是测量的必要条件,以此来认识同步控制在示波器中的重要作用。

示波器是用来观测电信号,测量还需再建立测量参数与电信号参数的对应关系。在水平偏转板上施加锯齿波信号,可以将光点运动转变为匀速运动,匀速运动可以转化为时间的关系  $\text{Time/div}$ ,即光点在屏幕的坐标中水平方向每移动一格所用的时间,时间可以与信号的周期相对应;在垂直偏转板上,光点的运动随信号电压幅值的变化 即  $\text{Volts/div}$  表示光点在垂直方向每运动一格偏转板上所对应的电压关系。若将这些关系进行严格的标定,就可以实现示波器的定量测量。在垂直偏转板上将线性偏转系数与衰减器的衰减倍数进行综合计算就可以得到光点在屏幕坐标中垂直方向的偏转距离与偏转板上施加电压的标定结果,即  $\text{Volts/div}$ 。同理在水平方向可根据线性偏转系数标定时间的关系,即  $\text{Time/div}$ 。由于示波器需要在一定的范围内针对不同频率的电信号进行测量,所以需要一个可改变周期的锯齿波发生器,改变锯齿波信号的周期是由振荡电路中的时间常数来决定,若将波段开关和时间常数并接可组成一个频率调节开关,频率调节开关与锯齿波振荡器组合得到可改变周期的锯齿波发生器。

示波器具有测量合成信号的功能,所以在信号的输入端增加了 AC、DC、GND 输入选择开关,在“组装示波器”平台上,很容易演示三个开关的对应关系,以此来筛选直流信号,交流信号。交直流合成信号。可用标定好的仪器对三种信号进行定量测量,由此还可向学生拓展示波器的使用范围,示波器可作为电表来使用,具有直流电表和交流电表的测量功能。

观测李萨如波形是示波器使用的一个特例,需要对示波器的结构进行适当的调整,使其在示波器水平偏转板和垂直偏转板上分别输入正弦波信号,在屏幕上得到合成后李萨如波形。

在“示波器的调整和使用”实验中,将“组合示波器”中的各个功能调节旋钮与示波器面板上的调节旋钮进行对应,再结合示波管的结构图和电路原理框图讲解示波器的原理、调整与测量,使得学生更容易理解,这是学、用相结合的教学方法,也是知识与应用的良好途径。教学中一直强调学生使用仪器要有目的的操作和准确的测量,以及灵活的运用。

在此基础上还可以向学生简单介绍,模拟示波器、数字示波器、虚拟示波器(Labview),类别的区分,介绍单踪与多踪示波器结构上差别,介绍时间关系与时基的运用等等,让学生对示波器有较完整地了解。工科院校一直强调不需要学习多种型号的示波器,只需掌握通用示波器的使用,就可以达到使用多种示波器的学习目的,这就是层次化实验的教学特点。

## 2.2 专题式实验

专题式实验是将技术相关的实验组合在一起,强调的是仪器的使用和测量关系。例如用



示波器测量类实验就可以组成一个专题式实验,如“示波器测超声波的声速实验”、“示波器测量光速实验”、“RC 电路参数的测量”,“RLC 电路暂态特性的研究”等等。在不同的实验中对于示波器的使用是不同的,有些实验用示波器观测信号的波形,有些实验用示波器合成信号的波形,有些实验用示波器作为电表使用,除此之外还有一些其它使用上的差别不再叙述。总之学生若能正确使用示波器进行测量,是建立在对示波器学习扎实的基础之上,这就要求层次化、专题式实验教学上有良好配合;不是要求学生花很多的时间来参与这样的教学,而是多花一点时间来慢慢梳理知识点与应用点之间的对应关系,建立起较完整地认识,就能达到教学的目的。

### 2.3 层次化、专题式实验教学

不仅可以在示波器类实验中运用,在其他实验中也适用,如电学类实验、光学类实验,力学类实验等等,关键是在这些实验中寻找共同的特点,哪些在实验内容上有共同之处,哪些在测量技术上有共同之处,将其组合到一起,找到教学中有针对性特点,明确教学所要达到的目的,这样就组成了一个层次化、专题式实验教学项目。层次化、专题式实验完成的不是一个具体的实验教学内容,而是完成一个实验类或者测量类的教学内容,其中可能包含着多个实验内容的组合。

一般情况下,单一实验中有独立的实验原理、实验方法、测量方法,数据处理等因素,在多个实验中这些因素就会出现相互交叉和拓展延伸的关系,这也是科学与技术在发展过程中出现的必然规律,只要认真的归纳总结就能找到共同的教学特点,组成一个有针对性的实验教学项目,这样的教学模式对学生来讲非常实用,可以花较少的时间,得到系统性较强知识传授,达到事半功半的效果。

层次化、专题式实验教学只在部分学生中进行了教学改革尝试,前提是要搭建一个开放式实验室,实验内容上按照实验教学项目的要求进行编排,同时与“面上”的实验教学要相互配合。参加层次化、专题式实验教学的学生在完成“面上”实验教学的同时可以到开放式实验室来做实验。开放式实验室有专门的老师进行辅导,老师主要是按照专题实验的内容框架去引导学生来完成实验,一般只要求学生完成一个实验项目的内容。没有限定学生来的次数,也可以不来,完成实验项目只能获得有限的加分,靠的是学生自觉的学习态度和老师的引导作用,如果学生认为所学知识对自己有用,才会主动学习,这也是师生之间的默契配合。

实践证明大多数学生参加实验项目是主动,积极地,平均每个学生能来实验室 3-4 次,收获各不一样。有些学生达到了实验项目的教学效果;有些学生由于实验基础差,通过开放实验进行了自我补充;还有些学生实验课上面对仪器会紧张,在这里进行了自我锻炼。

### 2.4 课外实验项目

增加课外实验项目是对于层次化、专题式实验教学的延伸和提高。实验课结束后,为还有学习物理实验需求的学生开设课外实验项目。该项目有学校设备处专项经费的支持,其目的是提高学生的实验技能和培养动手能力。课外实验项目不是要求学生做某些实验,而是参加一个具体立项的实验题目,有些题目是以提高实验技术为目的,如全息光学器件的制作,制作出全息光学器件只是普通实验的教学内容,若要提高器件的技术指标,则是技术问题。有些题目是要求学生构思和设计一套测量装置,要求每个环节都独立完成,从设计、出图、加工、组装、调试、验证等。对学生来讲是一次很好的锻炼机会,和完整的训练过程。参加的是大二(下)的学生,还处在基础课和专业课衔接的学习过程中,若要完成这些工作需要付出很多的努力,但是学生学习的积极性还是很高的。

### 2.5 实验教材

在层次化、专题式实验教学的模式下,针对“大学物理实验教学大纲”的要求和现有的实验仪器条件,综合学生物理基础知识较广的特点,在已有教学教材基础上,尝试性地编写了层次化、专题式实验系列教材讲义,其目的是通过这样的实验教学模式,让学生对于实验课

的特点和要求有一定的认识，在仪器使用上有规范的要求。

### 3 结束语

层次化、专题式实验教学方式的探讨，是针对现在学生的学习习惯和教学中的一些实际情况进行的教学改革尝试。目前的物理实验教学还处于比较僵化的模式中，如，规定的学时，规定的课时，规定的学分，固定的实验内容等等。实验仪器的使用也有所改变，与以前相比，通用仪器的使用量在减少，各种各样的教学仪器占据着实验课堂，无形中隔断了物理实验与实际测量之间的途径（因为实际测量使用的主要是通用仪器）。学生不能理解物理实验对于将来的专业学习有什么帮助，从物理实验课上看，一种仪器只做一个实验，这样的知识可能一生中也不会再次遇到，因此，对物理实验不够重视，学习上也不认真。实际情况并非如此，物理实验是工科专业实验的基础，有着密不可分的关系，这一点又很难向学生解释清楚。推出层次化、专题式实验教学方式就是想理顺这一关系，让学生理解物理实验，了解其用途。层次化、专题式实验内容的选择上，尽可能多的使用通用测量仪器，采取传统的组合实验模式，做好物理实验众多的实验技术与实际测量的衔接。

**Abstract:** This paper discussed roughly how to teach physics experiment through the topical experiment and experiment project. The major objects have a search for training students how to smart think by themselves and work independent.

**Key words:** Physics experiment teaching method; the topical experiments; Experiment project

## “产学研”一体化实践教学模式探索

于白茹, 梁小冲, 李伟, 李紫源, 朱俊, 郝彦军  
(四川大学物理基础实验教学中心, 四川成都 610064)

**摘要:** 通过建立产学研一体化的实践教学模式, 改变以往理论为主、实践为辅的传统教育模式, 增强实践器材的利用率, 改变学生死板的思维方式、增强学生的实践动手能力、锻炼学生的创新意识、培养学生团队合作的意识。

**关键词:** “产学研”一体化; 实践教学; 创新教育

高校传统的教育方式存在诸多问题, 例如理论学习周与实践周比例严重失调; 学生没有充足的时间做实验; 大学物理实验课都是在规定的时间完成; 课程结束后实验器材闲置, 利用率低; 大部分学生都是按照实践教材和任课教师讲授的知识按部就班的完成实验, 学生很难有时间提出新的想法, 即便有想法也很难有机会得到进一步的实践论证。这种教学模式不利于培养学生的动手实践能力, 也很难培养社会真正需要的创新型人才。“产学研”一体化实践教学模式可以很好的解决以上问题。“产学研”一体化实践教学模式是由高校或研究机构通过与企业建立互利共赢的良性循环机制, 从而有效培养创新人才的教育模式。“产学研”合作教育将生产、科研中出现的新技术、新成果及社会经济发展前沿的课程纳入教学计划, 使学生更多地了解学科发展的前沿态势, 有助于学生形成有力的知识体系及创新思维[1]。此外, “产学研”一体化给予学生的更多的实践时间, 能够更好的培养其实践动手能力和创新能力, 解决了本科生实践机会少、实践成本高的问题。因此, 该模式是创新型人才培养的有效途径。

### 1 与企业建立互利共赢的良性循环体系

时代的发展离不开科技, 而科技的飞跃又依托生产的需要。高等院校或科研机构与企业的合作存在很大的优势。这种合作是由学校提供师资力量、资源共享、技术支持, 企业提供资金支持、实习支持、就业支持形成的互利共赢循环体系。高校教师在与企业联合研发仪器时, 将学生带入企业学习, 从仪器生产流程到制作工艺, 了解仪器方案的设计和工程技的各个细节, 并结合在学校学到的知识, 逐步完善课题实施方案。通过这个过程不仅能够使学生将课堂学到的知识做到学以致用, 并能够更加明确学习目标、培养其学习的自主性, 并激发其创新意识和锻炼开拓创新的能力, 培养其团队合作意识。使学生的校园生活与社会环境有一个好的衔接, 在其毕业后更容易融入工作环境, 能够从容应对工作任务。

### 2 建立开放型实践教学体系

传统的大学物理实验严格控制了学生做实验的时间, 而实际上学生需要的动手时间要比课堂上的 45 分钟还要多, 为了培养学生的创新意识和综合能力, 需要全天二十四小时开放的实验室, 学生可在任意时间进入实验室进行实验。实验室应配备一些基本的有关力学、热学、电学、光学、原子物理学等各种领域的实验仪器, 供学生使用, 学生可以根据个人兴趣选择器材进行实验。目前物理实验中心有九十多个实验项目, 经过整理和改造后还可以开设更多的实验项目。通过开放型实践教学体系的建立, 增加学生动手实践的机会, 创造一个学生独立思考的空间, 训练其自主学习的能力, 从而激发他们的创新意识。

---

**作者简介:** 于白茹(1982-), 女, 山东淄博人, 实验师, 博士, 主要从事大学物理实验技术与管理。

### 3 建立科技创新队伍

提升科技创新能力,关键是人才。所以一支技术过硬的科技创新团队起着至关重要的作用。该团队需对物理实验仪器的改进与研发具备丰富的经验。科研应服务于社会,从企业的实际利益出发,根据企业的需求设立科研项目。这样既能够得到企业的资金支持和工程技术支持,又能够使高校的知识资源与社会实际需要挂钩,使知识能够真正为经济服务,最后科研成果还可以服务于高校师生。科研项目设立后,导师根据自身的学术领域选择项目,而学生也可以根据个人的兴趣特长选择项目和导师进行科研项目训练,这样就能够实现以科研项目为中心的师生的自由双向选择。在科研训练的过程中能够使使学生将课堂知识应用到实践中,并能够改变以往教学为主,实践为辅的教育模式,增强学生的动手实践能力,为其将来步入社会,开展更高层次的科研开发与创新打下坚实基础。

### 4 结束语

在开放型实践教学方面我们已经积累了一定的经验,并且取得了良好的效果。我们将逐步建立和完善“产学研”一体化实践教学体系,设立多层次循序渐进的实验教学内容,引入物理前沿领域的探索性实验,建立教学科研团队和学生创新实验活动基地,激发学生的创新意识和培养他们的创新能力。

#### 参考文献:

- [1] 阮美飞, 郑荣跃, 张佩芬。“产学研”一体化培养创新人才的理论与实践[J]。宁波大学学报(教育科学版), 2010, 32: 61-64。

## The exploration of the production-teaching-research combination experimental teaching mode

YU Bai-ru, LIANG Xiao-chong, LI Wei, LI Zi-yuan, ZHU Jun, HAO Yan-jun

(Physical Basic Experiment and Teaching Center, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** Traditionally, theories education is priority, and practice is auxiliary. Through the establishment of production-teaching-research combination experimental teaching mode, we can change the above traditional education mode; enhance the experimental equipments' utilization; change the Rigid way of thinking; strengthen students' practical ability; exercise the students' innovation consciousness and cultivate students' consciousness of team work.

**Key words:** production-teaching-research combination; practice teaching; innovation education

# 任务导向, 问题牵引, 以探究式教学方式, 培养学生的创新思维

——我的一点教学体会, 以示波器实验教学为例

王秀庭, 杨冰

(装甲兵工程学院 基础部, 北京 100072)

**摘要:** 以培养学生的创新能力为目的, 以历史发展的脉络为导引, 给学生提出设计示波器的任务; 类比沙漏的单摆运动, 启发学生探索解决问题的方法。

**关键词:** 示波器; 探究式教学; 类比; 任务导向

示波器在现代电学测量中是一种常用仪器, 就如同游标卡尺在力学测量中的地位一样。几乎所有的大学物理实验教材都包含有示波器的内容, 几乎所有的工科院校也都开设有示波器的原理与应用的实验课程。我们知道, 示波器有模拟示波器和数字示波器。模拟示波器的原理与应用实验是一个经典物理实验, 虽然在现代测量中有数字示波器逐渐取代模拟示波器的趋势, 但是从有利于教学的角度, 用模拟示波器更好一些, 因为其原理更清晰易懂。我们认为模拟示波器的原理与应用的实验的教学目的, 不应该只是教会学生理解示波器构造及其原理, 和教会学生怎样使用模拟示波器, 还要培养学生的创新性思维, 激发学生的主动性和创造力, 因而我们采取了如下教学方式。

## 1 开门见山, 介绍仪器

首先结合实物介绍本实验需要的仪器即模拟双踪示波器和函数信号发生器, 使学生对本实验所用到的仪器仪表有一个基本了解; 然后利用幻灯片粗略介绍示波器的主要构成部分, 让学生知道示波器包括两部分: 显像管和控制显像管的工作电路。使其对示波器的构成有一个初步印象, 对仪器有一个感性认识, 激发学生对仪器的工作原理的思考兴趣。

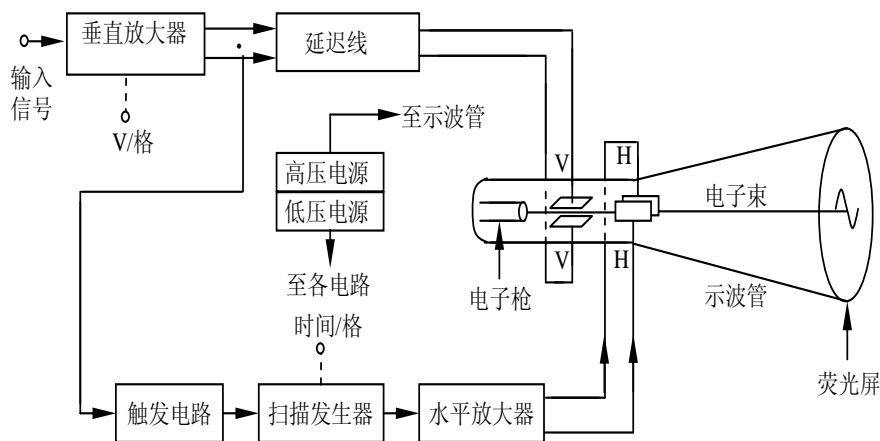


图1 示波器的构成

**作者简介:** 王秀庭(1964--), 男, 山东聊城, 装甲兵工程学院副教授, 硕士, 主要从事电磁兼容方面的研究。

## 2 提前铺垫，前后呼应

示波器原理要用到大学物理理论课中关于运动电子在匀强电场中偏转的内容，由于理论课和实验课的讲授时间不一致和其它因素，导致有些学生对相关知识的遗忘。我们在教学实践中，安排复习大学物理理论课中关于运动电子在匀强电场中偏转运动的内容，和学生一起得到如下结论：偏转位移  $Y$ （或  $X$ ）与偏转电压  $U$  成正比，偏转电场控制电子束在视屏上的落点。并进一步引申：如果偏转电压从最小线性增加到最大，则电子从下到上（从左到右）扫描。这样就很顺利的为引入扫描电压做好了准备，做到前后呼应，提前铺垫。

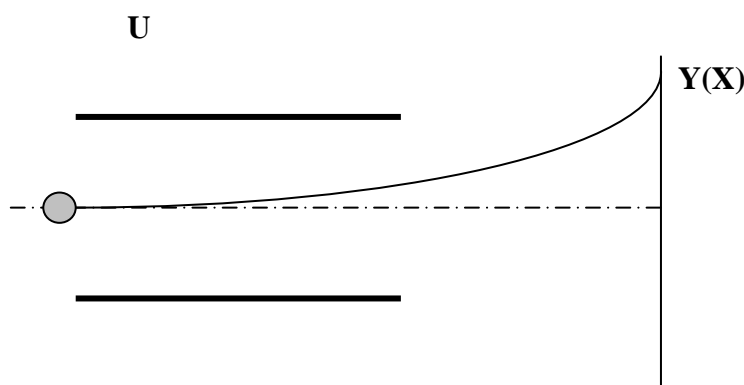


图 2 电子的偏转原理

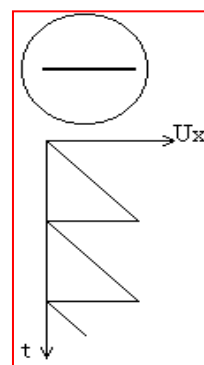


图 3 扫描电压

## 3 提出任务，逐步推进

下面的内容就是本次课的重点：示波器的原理。用什么方式去引入，怎样讲解学生比较容易理解，并有培养其创造性思维的效用？我们认为利用历史发展的逻辑，设定让学生处于发明（设计）一种测试仪器的任务状态，提出任务和问题，以问题为导向，对于调动学生的积极性主动性，促进他们积极的思考有重要意义。

### 3.1 提出问题

示波器是用来干什么的（示波器的功用）？

答案：示波器是用来解决物理量可视化的问题，或者说显示某一物理量（比如电压）随时间的变化。

### 3.2 形象类比

接着以沙漏的单摆运动作类比，引出本次实验的难点——时间的展开问题：如果一个沙漏做单摆运动，底下垫一张白纸，那么沙子的轨迹是一个有限的线段，并不能显示沙漏的位移随时间的变化，只有在同时匀速拉动白纸的情况下，才能显示出沙漏的位移随时间的变化。

进一步说明示波器的原理和它是类似的，并提出问题：怎样保证每次显示的结果都一样？答案：要保证每次实验的初始条件都一样。

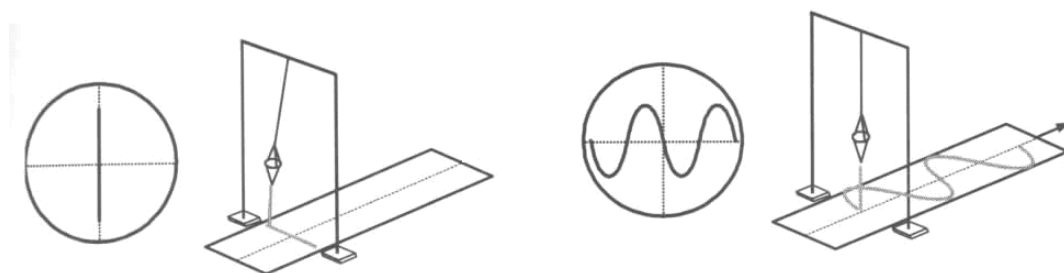


图 4 单摆和显像管显示图形的比较

### 3.3 布置任务

怎样用电子仪器把沙漏的运动显示出来?

答案:用阴极显像管。

要把沙漏的运动显示出来需解决几个问题:

1) 白纸不能无限长,即阴极显像管显示的范围是有限的。

解决的方法:截取某一段反复显示(重复)。

2) 每次演示的起点都一样,显示图像就表示为稳定地画面。

解决办法:同步。

因此要制造出这样的显示仪器要解决以下几个问题:

a.可视性-----显像管

b.重复和同步-----稳定的波形(触发、延迟)

### 3.4 解决方案

进一步启发学生思考解决以上两个问题的办法:

1) 将被测信号加到垂直偏转板时同时,在水平偏转板加一扫描电压(锯齿波),使电子束的荧光点在水平方向拉开,解决重复和展开的问题。

2) 同步电路(触发和延迟):在 X 和 Y 方向同步重复扫描,并详细分析锯齿波(X 方向)的周期是 Y 轴被测信号周期的整数倍时图形是稳定的。

### 3.5 解释显示实质

指出示波器显示波形的实质:电子的运动是沿 Y 轴方向的被测信号(通常是简谐运动)与沿 X 轴方向的匀速运动的合成。

如果沿 Y 轴方向的简谐运动与沿 X 轴方向的简谐振动合成的一种合运动就是李莎如图。

## 4 有简有繁,合理取舍

触发和延迟电路都是为同步服务的,虽然触发和延迟电路是必要的,但是由于其原理已超出学生的知识范围,处理办法是简单讲解其功能实现,而不涉及具体电路分析。

## 5 规范教学,培养科学精神

示波器的校准是教学实践中的一个重要环节,也是一个容易被忽视的环节,很多学生不理解为什么要校准示波器,有些教师对此也不够重视。因此强调示波器校准的重要性对于培养学生的科学精神有重要意义。示波器不仅是一个显示仪器,更重要的它还是一种测量仪器,利用示波器可以测量电压峰峰值和周期等物理量,但是作为一种测量仪器,本身应该是准确的,因此使用示波器的第一步就是校准。就如同用尺子测量,尺子本身首先应该是准确的。

## 6 结语

示波器的原理与应用实验课的教学涉及很多实践环节,如示波器和信号发生器的面板按钮的使用、面板上各旋钮的意义和档位设置、电压峰峰值和周期测量的操作要点和注意事项等等都要一一交代清楚并带领学生进行反复操作练习,很多老师都有很多好的处理办法,在此不再赘述。

### 参考文献:

- [1] 钱锋,潘人培.大学物理实验(第2版)[M].北京:高等教育出版社,2005.
- [2] 刘伟民,李媛.示波器的使用实验教学方法探究[J].商丘师范学院学报,2010,26(9):134-136.
- [3] 屈双惠,杨志宏,马志春.简化讲解示波器显示波形的原理[J].石家庄学院学报,2010,

12 (3): 17-20.

## **Application of inquiry teaching to the development of Innovative ability in oscilloscope experiment**

WANG Xiu-ting, YANG Bing

(Department of Fundamental Courses of Academy of Armed Force Engineering,  
Beijing 100072, China)

**Abstract:** In order to cultivate the innovation ability of them, in the context of historical development as the guidance, students are required to design the oscilloscope. The movement of single pendulum is contrasted to the graph forming principle of oscilloscope to inspire students to explore solutions to the problem.

**Key words:** oscilloscope; inquiry teaching; analogy; problem-guided



# 浅谈大学物理实验教学的“内涵驱动”建设

魏 云，吴晓立，胡 清  
(西南交通大学 物理实验中心)

**摘 要:** 在大学物理实验教学中，以层次化专题式实验的教学方式来组织教学内容、并与课外项目相结合，在培养学生善于思考独立做事方面，进行了初步的探讨。

**关键词:** 物理实验教学；层次化专题式；课外项目；教材建设

## 1 引言

在高校教学规模扩大和国家级实验教学示范中心“内涵驱动可持续发展”的客观现实下，针对实验类教学或教改的“内涵”建设，发挥“中心”示范和辐射的作用，我们就学校的物理科学与技术学院实验教学和学生（光电技术专业与应用物理技术专业）特点：物理类基础知识涉及较广但实验教育仍属首次。我们提出采用层次化专题式实验教学方式，并在教学内容和教材讲义、实验设备利用、课外项目发展等实际工作中有了一定的认识。

## 2 教学探讨

### 2.1 层次化实验教学

层次化实验教学的主要目的是探讨从单个基础实验到纵深层次化思考的培养，从原理性验证到实际应用或从一般性运用再深入到基础的原理性验证和理解，加强知识点的贯通和对仪器的系统认识。

例如对于仪器类的使用教学，就采用从一般性运用再深入到基础的原理性验证和理解的层次化思考方式：在“示波器的调整和使用”实验后，开设了对应的“电子束在电场中的偏转”和“组装示波器并校准”实验；以及再从原理性验证到进一步仪器的实际使用、比较，如安排“示波器测超声波的声速”、“示波器测量光速实验”、“示波器研究 RLC 电路特性”或“AC BRIDGE CIRCUIT”实验，这样对示波器、信号源、数字万用表、指针万用表等仪器的使用，特点的比较就有一个较系统的认识。在电学测量技术类如“平衡电桥测电阻”到“非平衡电桥测量及应用”和“十一线性电位差计”到电阻箱“自组电位差计测电动势”，采用从原理性验证到实际的应用，对基本仪器电阻、电阻箱、检流计、电源的认知，对实验参数的设置及其依据、对仪器保护等建立系统的认识，养成依据理论做到心中有“数”而不是去“猜”。在光学类实验如“光学基础实验”中自准法测焦距的方法到“分光计的调整与使用”中自准法调望远镜等，到“分光计测量棱镜折射率”的最小偏向角和最大偏向角方法，到“光栅光谱测量”，掌握平行光建立和其成像测量的基本实验光路。

总之，针对学生的特点，要求对基本仪器、实验技能、实验原理、误差分析、参数设置、仪器保护等方面进行强化。要求学生比较深入的了解并完成实验层次化总结性思考。

### 2.2 专题化教学安排

专题化实验类别主要有：光电技术基础测量实验、全息与光电信息实验、传感器与 Labview 虚拟仪器实验、现代测量与单片机应用实验、现代物理技术实验。在仪器安排上集中统管专门配备，实验室按类别每个实验两套仪器为一组，每类共计八个实验十六台套仪器。安排对应实验开放时间段，主要特点是学生预习要求较高，实验内容扩展自由度较大；要求教师（仅负责四个实验）课堂上小组方式针对性授课，加强课堂辅导、演示等；对仪器管理负荷较大，教师对仪器逐台检修的工作是必须的和及时的。

### 2.3 实验教材的思考

在“内涵驱动可持续发展”和层次化专题式实验教学方式下,依据现有实验仪器条件和教材基础,综合学生物理基础知识较广特点,尝试性地编写了层次化专题式实验教材讲义,加强实验知识和技能、仪器使用上的贯通,强化“内涵驱动”建设。

“普通物理实验(上、下)”：主要思路按中英文混合编排,七个物理单位实验(如“质量、压力传感器与非平衡电桥”,“长度、杨氏模量实验”,“时间、单摆设计性实验”,“电流、电(流)表改装设计”,“温度、不良导热体热导率测量”,“光强、硅光电池特性实验”,“摩尔、示波器声速法测量空气平均分子量”)、基础实验、基础综合实验、综合实验、设计性实验等编排六十个实验。

“光电技术基础测量实验”：电位差计法测量二极管伏安特性,半导体温度计设计制作与定标,弱电流的放大与应用,多量程三用电表设计组装,椭圆仪设计与测量应用,外差式光纤干涉测量实验,摩尔条纹振动测量,半导体光电检测器参数测量,电光效应与电光调制,法拉第效应,声光调制,远红外自动感知系统设计,CCD信号采集与处理,等实验。

“全息与光电信息处理实验”：基础类全息实验如“漫反射全息”和“相位物透射全息及拓展”或“像面全息”,二次曝光的测量应用实验“散斑法测量面内横向位移”,设计性制作实验“低频光栅的制作”并拓展到透过率函数分析、泰柏效应观察以及 laud 效应演示。光电信息处理主要有“CCD传感器阵列原理及响应灵敏度测量”,“光学信号空间滤波、编码与CCD图像记录”,“光学位相滤波与透明物位相检测”,“声光信息处理实验”,“纹影法处理光学位相图象”,等实验。

“光电传感与Labview虚拟仪器”：“半导体PN结特性及弱电流测量”分析PN结电压与温度的关系及温度传感器灵敏度测量,“光敏电阻及其变换电路”,“光源与光度辐射度参数的测量实验”,“巨磁电阻效应”：“Labview程序设计”建立温度和容积的VI,“数据分析及处理”建立频谱分析的FFT和数字滤波,“数据采集及硬件IO功能”实现数据采集与虚拟信号发生器,等实验。

“现代测量与单片机应用实验”：基于MSP430F6638实验箱,编排按键查询方式对LED灯控制实验,按键中断方式对LED灯控制实验,看门狗定时器(WDT)实验,RS232串口实验,ADC与DAC实验,TFT屏幕显示实验,温度检测与电量检测实验,步进电机控制实验,压力测量综合实验,等实验。

“现代物理技术实验(上、下)”：声波的多普勒效应,傅里叶光谱实验,F-P干涉实验,塞曼效应实验,光电效应实验,法拉第效应,声光调制,laud效应实验,椭圆仪设计与测量应用,相对论效应实验,低温测量实验,气体激光器实验,光纤测量与传输实验,微波测量实验,传感器综合实验,微弱电信号检测,CCD传感器阵列原理及驱动实验,光学相位反衬法图像处理,光信号频谱与空间滤波,全息技术,全息光学元件制作设计,光纤(光栅)传感器实验,可编程智能小车,等实验。

在与学生的座谈会中,反映出的主要观点是实验加深了对原理的体会,对仪器的认识、对动手能力的培养,对技术和应用的理解;另一观点是实验对于分数是没有大的帮助,“百度”一下就可解决。这对于想把原创和创新素质溶入学生的血液之中是一巨大的挑战。

## 3 课外项目

1) 在学校装备处的校级学生项目(个性化实验)引导下,基于层次化专题式实验教学,开放适合各年级基础的技术型应用实验。在给出题目和任务书后,学生自主报名竞争上岗,以自行解决问题为主教师辅导为助;在一学年内考勤考查、辅导并达到学时要求,以实验报告(论文)、或制作的器件以及答辩结束项目并网上公示。

2) 指导学生申请学校教务处校级(STRP)学生项目。选择以小组(五人)为单位的优

秀学生，在可控的条件下，完成基于科学研究的较系统的应用型小项目：自己制备元件，设计测试装置、完成原理性实验、定型加工、测试性能参数。项目需签订任务协议，一年期限，自学为主，教师定期参与小组讨论，考核进度和团队合作；学生以项目报告（论文）、制作的实物（器件或仪器）以及答辩和网上公示验收。

3) 实验竞赛。每年举办校级物理实验竞赛月活动俗称“红五月”，学生参与区域、全国性实验竞赛，如“西南物理实验竞赛”、“全国示范中心物理实验竞赛”、“电子设计大赛”等。

#### 4 结束语

通过层次化专题式实验教学学习和课外项目锻炼，学生最基本的收获是信心增强，体会到从书本到做事，从理论到实践的认识过程。我们也能深切体会到学生从茫然到有序，从被动听讲到能相互交流，从畏难状态到信心建立的全过程，奠定了一定的实验思维并建立起敢于做事的信心基础。在这过程中我们也对基本仪器、实验技能、误差分析、参数设置、仪器保护等进行了实践探索，探讨了层次化专题式实验教学的教材讲义“内涵”式建设。

**Abstract:** This paper discussed roughly how to teach physics experiment through the topical experiments, experiment projects and their manuals of laboratory. The major objects have a search for training students how to smart think by themselves and work independent.

**Key words:** Physics experiment teaching method; The topical experiments; Experiment project; Manuals of Laboratory

# 物理实验教学内容体系的设计与构建

梁小冲, 朱俊, 穆万军, 于白茹, 李伟, 李紫源, 郝彦军  
(四川大学物理科学与技术学院, 四川成都 610064)

**摘要:** 针对目前实验教学存在的问题, 创造性的提出了“三层次三结合”的实验教学内容新体系。重视实验项目的选取, 引入实验仪器的拆分、组装、实际产品的制作作为教学内容, 建立多元化的实验课考核体系, 构建自主、合作、讨论式的学习模式。

**关键词:** 三层次三结合; 考核体系; 多元化; 自主; 合作

## 1 引言

近年来随着高校招生人数的扩大, 办学规模急剧扩张, 高等教育质量面临严峻的挑战。以质量求生存, 探索高校创新型人才培养的新模式已成为各高校迫切需要解决的问题。大学物理实验是学生进行工程实践和科学研究的重要基础, 是培养学生创新能力的核心课程之一<sup>[1]</sup>。目前, 我校大学物理基础实验开设的实验课程难易程度一样, 没有给学生一个循序渐进的学习过程, 而且课堂教学又片面强调传授知识、实验内容安排过死、因材施教不够、留给学生独立思考的时间较少, 整个实验过程中, 学生纯粹只是一个接线工, 实验过程都是按部就班的模仿教师。虽然测到实验数据, 但也不理解方法, 导致学生对实验理解不深<sup>[2]</sup>。为了解决这一教学问题, 作者提出了“三层次三结合”的实验教学内容新体系。本文研究的主要内容就是如何选择实验项目以及相应的教学方法, 并建立全面合理的考核体系来激发学生的学习兴趣、提高学生的动手能力、培养学生的创新能力, 希望能对物理实验的教学改革做些有益的探索。该方案已经应用到四川大学“物理实验与仪器开发”课程教学中, 并且起到了很好的教学效果。

## 2 实验教学改革顺利进行的保障和面临的关键问题

“物理实验与仪器开发”是四川大学物理实验教学中心开设的面对全校理工类学生的文化素质公选课。该课程注重对学生动手能力与创新能力的培养。每学期约向 300 名学生开课。该课程实施了“三层次三结合”的实验教学内容新体系, “三层次三结合”实验教学新体系的建立, 必须要面对以下 5 个关键问题:

- 1) 如何选取循序渐进且利于引发学生学习兴趣的实验教学内容;
- 2) 如何根据实验内容选择实验项目、仪器;
- 3) 如何改革传统的教学模式, 利用新的教学方法达到教学目标;
- 4) 如何做到因材施教、适应学生的个性化发展, 培养学生的创新能力;
- 5) 如何制定全面、合理的实验成绩考核标准;

学校和学院两级领导高度重视物理实验教学并给予大力支持, 具有配备较完备的实验室和足够数量的教学仪器。除此之外, 该课程的建立还有以下几点保障措施:

- 1) “物理实验与仪器开发”是物理实验教学中心开设面向全校学生的文化素质公选课。在教学内容、教学模式与方法、考核标准上有完全的自主权, 不受外部因素的影响。
- 2) 该课程是在四川大学物理实验中心开设的“综合设计与创新型物理实验”与“探索型物理实验”的基础上进行了补充和扩展, “创新型”与“探索型”这两门课已经成功运行了 8 个学期, 提供了宝贵的经验。
- 3) 教师队伍稳定且师资力量雄厚。任课教师都是高学历且教学经验丰富的一线教师。

4) 本教研组已经实施完成了一系列物理实验教学改革并取得了一些教学改革成果。在科研学术论文、专著和发明专利方面也取得了显著成果。

### 3 物理实验教学改革的具体措施

#### 3.1 物理实验教学内容新体系的建立

以能力培养为核心，把实验内容划分为基础训练、动手实践、综合设计与应用三个层次来循序渐进的培养学生的创新能力；实验教学与理论知识相结合、实验教学与科学研究相结合、实验教学与生活实践相结合。即“三层次三结合”的实验教学内容体系：

1) 基础训练主要是让学生掌握基础物理量的测量与计算，了解和掌握实验仪器的基本操作与使用。此部分是对实验中心开设的普通物理实验课程的复习，与教材的基础知识紧密相关。

2) 动手实践类实验要求学生深入了解实验仪器的组成和结构，清楚实验仪器的各个功能是如何实现的，并能判断仪器的基本故障，可以对实验仪器进行简单的维修与维护。学生既学到了技能又可以维修实验仪器，真正做到了实验室与学生的双赢。

3) 设计应用部分要求学生可以根据物理实际问题自己设计实验方案，并选择合适的实验仪器来完成实验目的；做一些小发明、小创造、电子玩具等，例如有些学生利用温度传感器原理制作的电子温度计等。

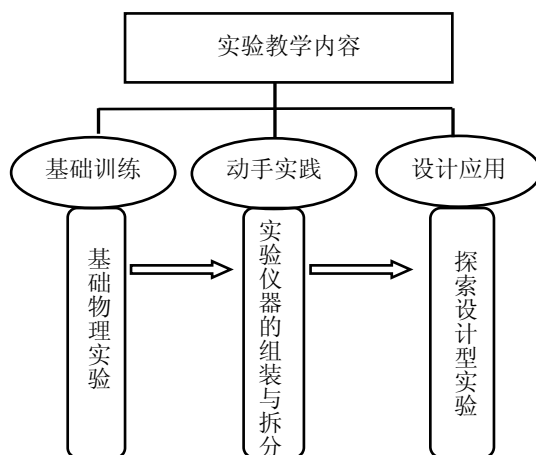


图1 实验教学内容体系图

##### 3.1.1 基础训练类实验

基础训练类物理实验主要以基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能的训练和基本测量方法与误差分析为主要训练内容<sup>[9]</sup>。此部分实验采用问题讨论式教学方法：课前要求学生做好预习，并写好预习报告册。教师讲授完实验原理，学生没有问题之后，教师给出本节实验课的实验目的；然后找一位同学根据自己预习的知识，按照教材对照实验仪器为大家介绍实验方法，并进行相关操作，其他同学在旁观摩，遇到问题时让所有同学参与讨论、尝试解决问题。在规定的时间内让学生自由讨论，最后由教师进行总结补充。这种教学方法，不仅增强了学生的学习动力，还锻炼了学生的语言表达能力，充分体现了以学生为主导地位的教学特点。此部分主要开设物理基础实验项目，实验仪器使用实验中心一些基础的实验仪器。

##### 3.1.2 实践类实验

在学生具备了一定基础之后，教师向学生介绍实验仪器的构造及工作原理。使学生不仅懂得如何操作实验仪器，更要了解实验仪器的工作原理，清楚仪器的各项功能是如何实现的。例如：在杨氏模量实验中，需要调节望远镜的视场。教师除了讲解调节方法之外，还要让学

生明白视场的调节就是目镜与物镜焦距的调节；并且要让学生看清楚焦距的调节是如何实现的。对于一些电子产品，教师讲解电路原理，并介绍各个元器件的功能和产品的具体制作过程。组织学生自己动手拆解、组装实验仪器；教师提供一些电子产品的元器件和电路图，然后要求学生按照电路图自己焊接简单的小产品，如收音机、万能充等生活小用品。学生也可以自己设计电路图然后制作一些小发明、小创造，真正做到实验教学与生活实践相结合。

### 3.1.3 设计应用类实验

设计应用类实验主要针对动手能力强、基础好的学生。让学生自愿组建合作小组，每组3-5人。根据学生的实际情况，给学生开设一些无统一标准的答案、无详细的实验方案、无指定实验仪器的“三无类型的实验项目”。学生必须自己思考问题、自己设计实验方案、步骤、自己选择实验仪器，有时还需要自制简易实验仪器来辅助实验。实验项目的完成需要小组成员的紧密合作，而每位小组成员遇到的问题都需要自己去查阅资料，自己去思考解决。既锻炼了学生的团队合作能力又增强了学生的学习和解决问题的能力。

### 3.2 建立多元的实验考核方法、创设研讨论坛，引领创新思维

改革教学效果的评价体系，建立全面的实验考核标准，统筹考核实验过程和实验结果。充分考虑学生在实验过程中的表现，以学生的论文、学生制作的电子产品等为主要考核内容。不以实验报告单作为考核学生成绩的唯一标准。鼓励学生撰写科研论文、申请发明专利、搞一些小发明、小创造等科研活动，并引入加分标准当中。

组织学生建立学生研讨群，参加科学启迪讲座、导师论坛等学术交流活动。努力营造以学生为中心、自主活动为基础的宽松教学环境。建立师生间的交流、指导、互动机制，引领学生的创新思维。创设一种健康有序、宽松和谐、开放高效、激励上进有利于创新型人才脱颖而出的育人环境。

## 4 物理实验教学改革的意义

目前，国内所有高校的物理基础实验教学内容枯燥，实验项目难易程度一样，没有给学生一个连贯的、循序渐进的学习过程。国内高校在积极引入设计类实验项目的同时却忽视了基础训练，没有达到预期的教学目标<sup>[4]</sup>。本文提出的方法已经应用到“物理实验与仪器开发”课程中：做到高低搭配、难易适当、层次分明，取得的教学效果比较明显，这也将对物理实验教学改革起到一定借鉴作用。本文把“物理实验与仪器开发”课程与传统的大学物理实验课程在教学方法、实验项目、教学主体、考核标准4个方面进行了比较，如表1所示。指导学生发表的论文和申请的专利数见表2<sup>[5]</sup>。

表1 课程变化对比表

比较内容	原课程	现课程
教学方法	说教式	讨论式
实验项目	验证性	多层次
教学主体	教师	学生
考核标准	单一	多元化

表2 近2年本科生在物理实验中心发表的论文与专利统计表

年份	发表论文数	申请专利数
2012年	8	2
2013年	10	25

## 5 结束语

本文介绍了“物理实验与仪器开发”课程的建设情况,详细阐述了课程实施的具体方案。确保物理实验课不仅锻炼学生的基本实验技能,又能增强学生分析与解决问题的能力、强化学生的动手能力、培养学生的创新能力。新课程难易适当、层次分明、高低搭配适合大多数理工科学生<sup>[6-7]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 徐文娟,韩仁学,杨德生,苑鹏涛,胡丹。基础实验一体化教学改革研究与实践[J]。2013(8): 85-87。
- [2] 张红伟,刘黎。四川大学拔尖创新人才培养模式创新试验区-吴玉章学院[J]。高等理科教育,2012(3): 83-85。
- [3] 梁坚,方诚。大学物理实验教学的课题研究型模式探究[J]。华东理工大学学报,2012,31(2): 181-183。
- [4] 梁红,宋国利。改革实验教学模式-注重大学生创新能力的培养[J]。黑龙江高教研究,2010(10): 177-178。
- [5] 陈水桥,李海洋,陈洪山,陈红雨,等。研究型物理实验以内容为中心的站队式教学方法探索[J]。物理实验,2012,32(11):19-22。
- [6] 张萍,宋金璠。基于培养学生创新能力的物理实验教学改革与实践[J]。实验室科学,2009(6): 7-9。
- [7] 隗群梅。改变物理实验教学方法培养高素质创新性人才[J]。大学物理实验,2009,22(1): 107-110。

## Design And Construction Of Physical Experiment Teaching Content New System

LIANG Xiao-chong, MU Wan-Jun, ZHU Jun, YU Bai-ru, LI Wei, LI Zi-Yuan, HAO Yan Jun  
(Sichuan College of Physics Science and Technology, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** Three layered three combine of experiment teaching content new system was introduced for current problems in experiment teaching. The select of the experimental project was paid great attention. The split and assemble of Experimental apparatus and the actual product of production were introduced as teaching content. The diversity of experiment evaluation system was established, self-regulated cooperation and discussion learning model were established

**Key words:** Three layered three combine; Diversity of experiment evaluation; Self-regulated; Cooperation

## 以学生为主导的物理实验创新实践基地介绍

郑志远, 李传涛, 董爱国, 董敬敬, 高 华, 樊振军, 张自力  
(中国地质大学 物理实验教学示范中心, 北京 100083)

**摘 要:** 结合中国地质大学(北京)物理实验教学示范中心在大学生创新实践基地建设过程中存在的学生积极性不高、管理机制不完善、与教学衔接不够等问题, 从环境建设、内容设置、运行模式等方面浅谈了面向全校开放的大学生创新实践创新基地的实践经验。

**关键词:** 实验课程; 创新基地; 运行模式; 环境建设

为深化高等学校教学改革, 创新教学理念、培养模式和管理机制, 培养大学生的实践能力、创新精神和团队协作意识, 提高学校人才培养质量, 根据教育部、财政部《关于“十二五”期间实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”的意见》(教高〔2011〕6号)和北京市教育委员会《关于开展北京高等学校校内创新实践基地建设的通知》(京教函〔2011〕702号)要求, 2012年中国地质大学(北京)物理实验教学示范中心经过学校答辩、校内外专家评审、现场考察及终审评议, 最终成为校内首批大学生创新实践基地。2013年秋顺利通过北京市专家评审, 成为中国地质大学首个北京市级的大学生创新实践基地。

在创新基地建设过程中, 针对学生积极性不高、管理机制不完善、创新内容脱离教学等各种问题, 有针对性的采取各种措施, 收到了良好的效果, 并在附近高校中起到了一定的示范作用。

### 1 面临的问题

作为物理创新实践基地, 其目的在于进一步创新教学理念、深化培养模式和管理机制, 提高学生实践能力、创新精神和团队协作意识, 为广大学生开展创新性实验、物理实验学科竞赛和社会实践等活动提供平台和环境。而如何进一步发挥该创新实践基地的作用, 保证基地的良好运行, 实现学生创新能力的全面提高, 是物理实践创新基地建设过程中面临的主要问题, 主要表现为以下几点:

1) 学生积极性不高。由于学校没有设置与物理相关的本科专业, 到物理创新实践基地的学生绝大部分是承担了大学生创新性实验项目和实验室开放基金项目的学生, 只有小部分对物理实验本身感兴趣的学生主动到基地进行学习或承担创新项目。在这样的情况下, 如何提高学生的兴趣, 让更多的学生进入实践基地, 进一步提高实践基地的使用效率, 是创新实践基地面临的首要问题。

2) 管理和激励机制不完善。开放是创新基地提高学生创新能力的重要途径之一, 物理实践创新基地在过去的几年内实行了多层次的开放。随着开放层次的加深, 到创新实践基地开展创新项目的学生变得越来越多, 这带来了管理上的困难。第一, 进行创新项目的学生大多数为本科二年级或三年级的学生, 对专业知识掌握不够, 更不用说是一些跨专业的知识, 这需要指导老师付出更多的指导, 其工作量在一定程度上超过指导一个研究生的工作量。这将面临着激励机制的问题, 以保障指导老师的工作热情和积极性。第二, 由于学生数量的增多, 创新实践基地面临仪器损坏率增加、耗材增加以及实验室的安全卫生和管理方面的问题。

3) 学生创新实践内容与实验教学衔接不够。学生进行创新项目的来源主要有两部分: 教师科研项目及实验教学内容。①每年学生承担的创新性实验项目和实验室开放基金项目以

**资助项目:** 中国地质大学(北京)2013-2014年度学科建设项目, 教学研究与教学改革项目



教师科研项目为依托,让学生承担科研项目内的小课题或直接参与到项目当中,让学生的创新能力通过科研项目得到提高和发挥。②与教学内容结合。以实验中心开设的实验内容为依托,对日常教学过程中遇到的问题进行立项,让学生进行仪器改造、制作或改造以解决实际问题,并将学生在创新活动中遇到的问题反馈给教学,根据一些反应普遍的问题来调整教学任务和教学内容。但随着近几年学校对科研的重视,创新项目的来源多数来自科研,与课堂教学内容衔接不够,学生创新项目取得的成果没有最大限度地应用到教学中去,存在实验教学内容与学生创新项目联系不紧密的问题。

## 2 措施

为解决上述问题,物理实验中心采取了以下措施:

1) 加大基地的宣传力度。学生兴趣不足、不走进实验室的原因之一是由于对物理创新实践基地了解不够,所以把新生开学的第一周作为宣传周,把物理实验中心现有的条件、环境、取得的成绩和开放措施等方面对学生进行宣传。让学生了解基地现有的条件、开放时间和各种制度,以及在过去的几年内学生取得的成绩。另外,把学生的一些创新成果以报纸的形式,定期进行制作并在全校范围内进行发放宣传。

2) 有针对性的开设与学校优势学科相关的实验课,以及与其他学院课程交叉、延伸的实验课。进一步加大与地学、能源、材料等学校优势学科结合紧密的物理实验,在实验内容上实现与学生现有的知识储备相联系,这样,学生参与的积极性自然会提高。

3) 文化建设。实验室文化是实验室内涵建设的重要组成部分,使学生在潜移默化中接受情感熏陶和人格塑造。利用教学楼梯道与实验室墙壁进行科学氛围的营造,除了门牌、指引牌标志、文化走廊、宣传橱窗等的建设外,还对在项目完成过程中成绩突出的学生进行展板宣传。以此提高学生的学习兴趣和欲望,实现对学生的科学素质与人文素质的培养。

4) 加大开放力度。创新基地对所有实验室进行门禁管理,对进入开放实验室做项目的学生,基地管理员可以设置密码,学生在24小时内可以随时进入做实验。管理员也可以根据学生情况,按时段设定进入时间,这样学生突破了时间上的限制,基地管理员无论是否在实验室,都可以进入实验室做实验。基地的每个开放实验室都有年长学生负责实验室的安全、卫生、记录及各个项目之间相互协调,提高实验仪器的使用率,在不影响其它项目的情况下做到资源共享。同时由于门禁系统的运用,实现了学生对基地的自主管理。

5) 考核方式改革。传统的笔试考试方式对于实验课程来说存在不足,如何将操作融入考试当中,既能体现学生对知识的掌握,又能考察学生的实际动手操作能力,物理创新实践基地进行了以下几方面的尝试。第一,操作与笔试相结合。考试分为两部分,即操作加笔试。操作成绩占总成绩的80%,笔试成绩占20%。笔试考察对理论的掌握程度,而操作考察基本动手能力和操作实践能力,同时突出了操作的重要性。第二,仿真实验考试。仿真实验是将真实的实验过程放到一个软件中进行,学生通过操作计算机完成实验。这样可以实现对大批量的学生同时进行考核,不再受仪器数目的限制,而且不用担心由于没有老师的指导而造成实验仪器的损坏。

## 3 特点

中国地质大学(北京)物理实践创新基地具有以下几个特点:

1) 良好的运行模式。在没有专业支持的情况下,让更多的学生进入实践基地,提高综合能力。依托大学生创新性实验项目、实验室开放基金项目、学科竞赛和社会需求,充分激发大学生的创新热情和潜能,实现以学生自主管理为主、教师指导为辅的资源共享、并具有鲜明特色的创新实践基地。

2) 严谨的管理和激励机制。加大鼓励学生创新团队中的跨年级、跨专业组合。这样除

了保障知识的完整性之外,还能实现老生带新生的益处,形成一个良性循环的管理形式。与学校的资产处及教务处联合,将指导创新项目的工作量纳入年底考核及职称评审之中,以保障指导老师的积极性。此外,实验中心每年评选出一定比例的“实验室先进个人”,进行劳务报酬及精神鼓励。

3) 新的教学体系。物理实验教学中心的教学工作由“实验课教学”、“实验课开放教学”和“物理实践创新基地”三者构成,三者之间是互为依托、相互促进的关系。在现有的基础上,加大创新实验题目中实验课堂教学内容的研究。通过实验室开放基金对日常教学过程中遇到的问题进行立项,让学生进行仪器制作或仪器改造以解决实际问题,并将学生在创新活动中遇到的问题反馈给教学,根据一些反应普遍的问题来调整教学内容。实现了课内实验教学是课外创新的基础,课外创新是课内教学实验的延伸,实现课内和课外的融合。

#### 4 成效

从 2010 年创新基地成立以来,在各方面取得了很好的效果。北京高校中的清华大学、北京交通大学、北京航空航天大学、北京科技大学、北京邮电大学、中国农业大学等 12 所高校的实验室负责人给出了很高的评价,并建立了良好的交流平台。借助于物理实验竞赛,加强与兄弟院校的联系,推动创新人才的培养。承担的各项活动从最初的大学物理竞赛,发展了大学物理实验竞赛、数学建模、创新班科技培训、中小学科普基地等。参与的大学生人数由原来的每年 110 人,增加到现在的每年 650 人。并在北京市物理实验竞赛中多次获一等奖及最佳组织奖。2012 年创新基地的一些经验受到辽宁省物理学会和河北省物理学会的关注。相信,随着时间的推移,中国地质大学创新实践基地的创新理念将会受到全国更多高校的关注,更多的学生将从中受益。

#### 参考文献:

- [1] 郑志远, 蒋芸, 薛巍, 等. 大学生创新实验计划实施的实践与探索[J]. 实验技术与管理, 2010, 27: 30-31.
- [2] 郑志远, 樊振军, 董爱国, 王亚芳, 高华, 冯娟, 张自力. 浅谈学生创新能力提高的几种途径[J]. 物理实验, 2012, 32: 24-27.
- [3] 郑志远, 樊振军, 董爱国, 张自力, 周惟公. 谈学生创新能力提高的新途径—实验室开放基金[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30: 97-99.
- [4] 董爱国, 周惟公, 张自力, 郑志远, 蒋芸, 冯娟, 樊振军, 高华, 王亚芳. 开放式创新型实验物理教学中心的建设与发展[J]. 物理与工程, 2012, 22: 21-24.

# 设计性研究性实验题目设置和分类指导之研究

张映辉

(大连海事大学 物理系, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 本文站在提高学生科学素养、培养创新型人才和增强国家科技竞争力的高度, 针对大学物理实验教学中普遍存在的设计性、研究性实验题目设置“难”, 以及由此带来的教学“难”问题, 提出了明确的思路和较实用的解决方案, 对于全面贯彻教学基本要求, 提高实验教学层次和质量具有重要的现实指导意义。

**关键词:** 设计性、研究性实验; 题目设置; 分类指导

## 1 问题的提出(意义)

1) 物理实验是科学实验的先驱, 在实验思想、实验方法、实验手段等方面是各学科科学实验(科学试验)的基础, 物理实验教学比理论教学能更为直接地体现科学的世界观和方法论。

2) 新版《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》<sup>[1]</sup>把设计性、研究性实验作为理工科各专业大学物理实验教学的重要组成部分, 并规定了最低学时比重。这对于提高学生科学素养, 培养独立工作能力、探索创新能力, 建设创新型国家具有极其重要的意义。因此, 探索设计性、研究性实验教学的一般规律, 提高设计性、研究性实验教学水平, 是关系学生质量和国家科技竞争力的重大问题, 是每一个教师的重要职责。

3) 传统的大学物理实验大都是基础性或综合性实验。经过几百年的积累, 现成的基础性、综合性实验题目众多, 且不乏经典。设计性、研究性实验要求学生通过自行设计、用自主研究的方式进行实验, 而不是象过去那样, 先由教师“设计”好了, 让学生“按图索骥”走一遭。这就给教师的教学工作提出了更高的要求, 首先就是教学题目的设置(即选题)问题。

4) 设计性、研究性实验教学倡导学生通过自行设计、用自主研究的方式进行实验, 而学生个体的差异性则会造成实验方案(手段、途径和方法)的多样性, 这将给教师在教学(实验原理和技术)指导上带来许多意想不到的问题, 教学的难度更大了。

## 2 关于设计性、研究性实验的题目设置

经过几年的研究探索, 我们感到, 贯彻“提高学生科学素养”要求, 指导学生进行设计性、研究性实验的空间十分广阔, 题目设置的方法非常众多。现仅就教学实践中认为简单、适用的方法举出几个方面为例:

设计性实验题目设置的一般方法:

1) 探索新的实验方法(方案)的设计性实验。面对日新月异的高新技术、新仪器、新设备, 我们完全可以对某些经典实验的路径选择进行重新考量, 重新设计。即引导学生使用新技术、新仪器、新设备重新设计实验方案, 并依此完成实验。

2) 更新现有仪器、设备的设计性实验。计算机(数字)技术、激光技术等新技术的广泛应用大大提高了人类对于物质(实验所输入的固体、液体、气体)、能量(输入的声、光、电)的控制能力和输出(现象)的观测能力, 必须及时地应用到生产、生活和科学实验(试验)之中。即以提高输入控制水平和输出(现象、结论)观测(测量、记录)水平为目标,

**基金项目:** 辽宁省普通高等教育本科教学改革研究项目资助(2012, 指南题号: 3-7)

指导学生围绕“提高实验的精确度”进行设计性实验,并进而更新仪器、设备。如学生王秋林研究制作的“RC 充放电智能化实验仪”具备随机采集相关实验数据,实时动态显示 RC 充放电过程,提高测量精度等功能,已由上级批准正式列为实验“RC 串联电路充放电特性研究”教学仪器。

3) 创制新的仪器、设备的设计性实验。对于某些在过去生产、生活、实验中不大常见、常用(或仅用其大略而没有很高的精度限制),而在今后的生产、生活、科学试验中已(将)普遍运用的现象和数据(或运用精度有较高要求),客观上显然需要创制新的仪器、设备进行观测、记录和控制。类比前段所述,可引导学生运用计算机(数字)技术、激光技术等新技术创制新的仪器、设备,并通过实验进行验证、调试。

研究性实验题目设置的一般方法:

4) 截取法<sup>[2]</sup>,是指在现有的生产流程(生产实践)、科学试验或者正在进行研究探索的科研课题中适当截取一小段或一部分内容作为设计性、研究性实验题目的选题方法。也就是说,可以把现有的生产或科学试验流程作为设计性、研究性实验题目的渊源,从中截取其有代表性的一部分加以简化和改造,使其成为设计性、研究性实验题目。如我们开设的“玻璃材料的设计与制备”实验就取自于玻璃生产流程,使学生学习和体验新材料制备和不同配比下凝聚态物质特性研究的一般方法。

5) 跟进法,是指将最新科研成果、最新生产流程、最新实验方法进行适当加工和简化作为设计性、研究性实验题目,或者在最新科研成果、最新生产流程、最新实验方法的基础上进一步提出前进性探索研究课题的选题方法。与截取法相比较,跟进法含有“跟”和“进”两层意思,“跟”就是紧跟前沿进行选题,而“进”则可以站在前沿或者超越现有成果进行选题。一般来说,跟进法实验选题的题目和内容可以是开放的。即在实验教学题目上只给学生一个大致的实验(试验)研究方向。如在现有设计性、研究性实验题目以外,利用开放实验平台,向学生提供某个生产或试验流程的情况介绍、科研项目成果或进展的资料,引导学生围绕相关流程和具体解决方案进行设计性、研究性实验,或者突破现有的研究范围和现有成果进行前进性、开拓性、开创性(独创性)的研究。

6) 并行法(或者叫类比法),是将科研课题(或其一部分)直接转化为设计性、研究性实验题目<sup>[3]</sup>,或者将与科研课题、生活难题以及生产实践中遇到的现实问题相类似、相近似的问题用类比的方式转化为设计性、研究性实验题目的选题方法。这里讲的“并行”在某种意义上可以是时间上的同步性(同时实行或实施),也可以是内容或方法上的相似性、类比性。一种方法是指导学生直接参与本系老师承担的科研项目,将其中难度适中的某一部分(或部分)内容作为设计性、研究性实验题目或毕业设计(论文)题目交给学生去探索和研究。另一种方法是将生产、生活中现实难题的解决直接确定为设计性、研究性实验。

应该指出或说明的是,设计性实验和研究性实验没有严格界限,设计性实验所设计的方案、仪器、设备需要通过实验进行研究、改进、调试和验证。而研究性实验则更需要对原理、思路、方案、手段进行认真的设计。上面对设计性实验、研究性实验题目进行的分别论述只是为了阐述实验题目设置方法的便利。窃诸君自会明鉴。

### 3 关于设计性、研究性实验的教学指导

1) 对工程设计制造类工科专业(如我校轮机、电气、土木、自动化)的学生应着重提供处于前沿、难度较大、具有创新探索性质的设计性、研究性实验题目,重在引导学生开阔思路、大胆设想。一是综合运用理论知识和各种仪器设备(包括计算机),对既定的实验题目进行独创性研究和探索,从而得到实验结果或结论;二是对最新科研成果及相关(或相近)问题进行独创性研究和探索,从而导出新近得知的结论、做法、设备、工序等;三是导出与最新科研成果相关、相近、相类似的新结论、新成果、新做法、新设备、新工序。第三点亦

可作为指导学生毕业设计（论文）的一个做法选项。

2) 对其他普通工科类（如航海技术，交通运输之外贸运输、港口管理）的学生，应主要提供基础性、验证性、难度相对较小的设计性、研究性实验题目，重在进一步熟悉和理解物理概念和规律，熟悉仪器的使用方法，并在此基础上引导学生开动脑筋、大胆实践、勇于创新，提高知识的综合运用能力，培养学生自信心。

3) 对兴趣浓厚、设计创新能力较强的学生，一是开放实验室，给他们提供更多的研究机会；二是指定教师负责组织他们形成研究攻关小组，加强引导、交流配合、举办“头脑风暴”沙龙，指导他们设计新方法、新组合、新程序，创制新仪器、新设备，指导他们撰写论文、帮助他们推广新方法、新设备；三是积极组织本校物理实验技能大赛，发现人才，培育创新研究兴趣进而选出骨干力量，参加省市物理学术竞赛和物理实验竞赛，直接参与前沿学术研究，感受、探索、创新氛围，为国家和社会培养和输送基础扎实、综合素质高的科技人才。

4) 对物理专业的学生（尤其是研究生）应着重提供能较好地体现物理思想和方法，有一定难度和创新性的设计性研究性实验题目。重在引导学生在深刻理解物理规律，熟练掌握仪器设备功用的基础上，积极运用物理科学发展中形成的各种先进的思想和方法进行独创性研究和探索，实验的目的不止于得到实验结果或结论，而更在于学会运用物理思想和物理方法，更在于思路和方法的创新性，更在于培养一种科学精神、一种追求真理的习惯，以及对物理科学的一种崇敬、信仰和热爱。

#### 参考文献：

- [1] 教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委会。理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2010年版)。北京：高等教育出版社，2011：15-18。
- [2] 张映辉。截取、跟进、并行--设计性、研究性实验选题的重要方法 [J]。《物理与工程》2013 年增刊-“2013 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会论文集”。303-304，307。
- [3] 张增明，孙腊珍，霍剑青，等。创新研究型物理实验教学平台的建设与实践 [J]。物理实验，2009，29（7）：14-17。

# 人文社科背景下物理实验的课程架构和教学探究

何春娟, 汪六九, 夏天龙, 王善才  
(中国人民大学理学院物理系, 北京 100872)

**摘要:** 从实验课程特点出发, 通过对人文社科类学生的知识结构和能力的分析, 引进了文理的跨越与交融的理念, 建立了文科物理实验的多层次递进和同层次多元化为特点的的课程体系, 在教学中采取灵活多样包容性的评价方式, 为文科学生提供了一个宽松的学习和探索科学知识的实践平台。

**关键词:** 知识结构; 文理交融; 课程体系

## 1 实验课开设的背景

现代社会是一个科技化程度越来越高, 科技覆盖面越来越广的社会, 为了适应社会对综合性创新型人才需要, 中国人民大学提出了培养人文素养和科学精神兼备的现代化人才的理念, 于 2004 年成立了理学院并先后成立了化学系、物理系、心理学系等专业, 使人大不仅成为具有强大的人文社科专业, 同时也具备了精干理工科专业的综合性大学。在人才培养方面, 人大一直努力践行“道术结合、文理交融、中西会通、知行合一”的培养理念, 为文理在冲撞中实现跨越和交融提供了一个良好的平台。物理学作为科学最古老的源头之一, 在文艺复兴时期对哲学、宗教、社会和产业革命的发展产生了根本性的影响, 今天物理学在科学技术发展中仍处于主导地位, 并且为自然和社会科学学科以及工程技术领域提供技术、方法和概念基础<sup>[1][2]</sup>, 因而更适用文科学生对科技知识的学习。人大物理系先后开设了《诺贝尔物理奖和现代物理学》、《物理与科技发展》、《物理与人类文明》、《科幻中的科学》等公选课, 极大地契合了学校新的人才培养理念, 受到了学生的欢迎。物理学作为一门实验学科, 实验课的开设是必不可少的, 在这样的背景下, 我们分析了人文社科专业学生的知识结构和能力水平, 参考了国内部分高校的经验, 结合我们的师资和实验室条件, 开设了《文科物理实验》课程。

## 2 文科物理实验的课程体系

文科物理实验作为公选课开设不是简单的普通物理实验的删减版, 在对课程特点和生源特点分析的基础上, 我们提出了立足于文理的跨越与交融来对实验课进行定位, 从而确定文科物理实验的课程体系。

### 2.1 实验课的特点

实验课相对理论课来说, 弱化了理论知识的系统性, 注重知识结构的层次性和多元性。针对不同的授课对象建立由低层到高层、由基础到前沿、由接受知识到能力培养的层次递进关系, 构建同层次之间多元关系(实验的原理、内容、方法、技术)的系统性, 将单个实验的“碎片知识”理性梳理系统地体现出来。

授课方式上不是单向的信息传递, 而是以教师为主导学生为主体的双向式、多向式信息传递与交流, 课堂形式较理论课也更多样性, 讲授理论、协同操作、演示展示、参观体验、计算机仿真、专题活动等, 在实验过程中能充分发挥学生的主观能动性, 最大限度地调动学

---

**作者简介:** 何春娟(1964-), 女, 山西运城人, 中国人民大学物理实验中心高级工程师, 主要从事物理实验教学和实验研究。

生自主学习的积极性和主动性,也更有利于因材施教有针对性的进行个体培养。

## 2.2 生源的特点

人大有着较为优秀的生源,学生思维活跃,求知欲强,具有较强的学习能力和接受新知识能力,但人文社科专业的背景(相当一部分学生中学就是文科生)也导致学生知识结构不完善,数学基础薄弱,物理知识欠缺甚至空白;能力发展不均衡,实验动手能力不足等先天缺陷;同时文理专业在思维方式的差异,又造成文科生理性思维和逻辑思维能力较弱。只有明确学生的优势,找准学生的劣势,才能通过实验课的设计扬其长补其短。

## 2.3 文理的跨越与交融

从学生的兴趣出发,选择适合学生的概念化的教学方法将知识与应用相结合,寻求生活和社会结合点,达到融入专业的文理跨越与交融。

兴趣性:“兴趣,是最好的老师。”首先让学生对实验课有兴趣,觉得实验课好玩好看很奇妙。所以我校在实验教学环节的设计上注重“引进门”,先看现象和应用,再了解原理,再完成实验。让学生看到题目后有很强的求知欲和兴趣,激发学生强烈的学习和探索的欲望。比如对理工科学生开设的“固定均匀弦振动的实验”,在文科实验中我们以“弹拨乐器的结构、振动及调音原理——固定均匀弦振动的研究”的形式开设;“太阳能电池特性测量”在文科实验中以“新能源的介绍——太阳能电池的特性测量”的形式开设等,这样就使每个实验都能对应找到其与生活和社会的结合点和关注点。

适用性:针对学生的特点,在内容上降低数学和物理理论的要求,用尽量少的数学公式进行概念化教学<sup>[1][2]</sup>,同时以多种课堂形式展现物理世界的丰富多彩。

实用性:文科物理实验是为提高文科学生的综合素质培养其科学素养开设的,因此既要考虑课程专业性和先进性,涉及新科技和工业应用、注重与其他学科的交叉渗透,又要具有基础性和广泛性,重视知识与应用相结合,贴近生活便于观察。比如现代物理实验“功能晶体的制备和试样测试”就是基于上述几个因素考虑开设的。

## 2.4 文科实验的课程体系<sup>[3]</sup>

在综合以上几个条件考虑后,我们确立了文科实验的课程架构和实验教学内容:

### 1) 兴趣培养

结合学院组织的文理对话、实验室开放、科普知识宣传活动、主题周等活动,增进文理科学家的交流,引导学生对物理实验课的关注和兴趣。

### 2) 实验理论

介绍常用仪器的使用,讲授数据的读取,误差的基本概念,基本的实验方法和实验技术,介绍物理学发展简史。

### 3) 基础及应用拓展实验

硬币如何能漂浮——液体表面张力的测量;

弹拨乐器的结构、振动及调音原理——固定均匀弦振动的研究;

微距的测量——衍射光强分布的研究;

立体电影、电视及摄影艺术——光偏振现象的研究;

常用光源的特性——LED 伏安特性的研究;

新能源的介绍——太阳能电池的特性测量;

计算机仿真实验(筹建中)。

### 4) 演示及体验实验

常温磁悬浮、超导磁悬浮、超导楞次定律、魔球、光隧道、手蓄电池、雅各布天梯、激光琴、加尔顿板、普氏摆、李沙育图形、温差发电、转动惯量等等的构造和物理原理演示,介绍其在方方面面的应用。

#### 5) 现代物理实验

功能晶体制备:对自然界的岩石以及矿物等材料做简要的介绍,分类介绍宝石学方面的知识。讲解实验室中常用的晶体制备方法,利用实验室设备生长单晶。

试样(多晶,单晶)的金相显微观察:结合光学显微镜、金相显微镜、扫描电镜、透射电镜、扫描隧道显微镜等光电显微镜的研究数据以及图像介绍固体物理的入门知识。基于实验获得的样品进行镶嵌、抛光、并进行金相显微镜观察。

#### 6) 科研实验室开放

介绍物理系前沿科学研究,对物理系的样品制备平台、高端谱学以及测试设备平台、工程化应用研究设备平台(透明陶瓷、白光LED研究)做详细的介绍,使得学生对前沿科学研究有进一步的了解。参观物理系凝聚态物性研究实验室、功能材料制备实验室、微纳加工实验室、光电功能材料实验室。

#### 7) 文理跨越

引导文科生和理科生合作申请跨专业的创新实验项目。

### 3 评价方式

作为公选课应该在学习科学知识的同时,尽量满足学生的兴趣爱好,发展学生的个性和特长,所以在学生的评价方式上不设单独的考核环节,采取能体现不同专业特色和展示个人特长的灵活多样的评价方式,除了实验理论和基础实验部分要求规范的实验报告外,其他层次实验学生可以根据课堂内容选择不同的切入点,无论从内容、形式、格式、载体上都广泛开放,给学生提供一个学习和探索科学知识的宽松的环境和开阔的实践平台。

### 4 效果以及建议

文科实验的效果出乎意料的好,学生对实验充满了好奇,兴趣浓厚学习热情很高。一位哲学专业的学生在他的论文“科学与科学奇迹”中论述了“科学本身是什么,与大众对科学的认知是什么,这是很不同的两个问题”;一位社会与人口专业的学生通过超导实验了解了课堂上并没有完全涉及的“超导的零电阻效应”、“迈纳斯效应”、“二级相变效应”、“单电子隧道效应”、“Josephson 效应”等物理概念,并且查询资料了解到了超导方面的很多应用如:“上海的磁悬浮列车”、“甘肃的高温超导输电电缆”、“湖南的高温超导限流器”以及“新疆的超导变压器”等;一位外院的学生说:“或许我一辈子也搞不清超导的工作原理,但是现在我知道超导磁悬浮是怎么回事了,对我来说不再神秘了”。不同知识结构的学生通过一门实验课的学习在他们各自专业各自领域得到不同的启示,我想这或许已经达到了我们开设《文科物理实验》的初衷和目的。

我们的文科物理实验开课时间还很短,开课内容、课堂形式、评价方式还需要进一步探索和完善,以后还将增加计算机仿真实验和多媒体教学的内容,进一步研究如何科学、细化的评价学生实验报告和科学报告的办法,以期确实提高本校学生的科学素养,为学生在以后的学习和工作中奠定良好的基础。

#### 参考文献:

- [1] 赵峥。物理学与人类文明十六讲[M]。北京:高等教育出版社,2008。
- [2] Art Hobson。物理学的概念与文化素养[M]。秦克诚,等译。北京:高等教育出版社,2008。
- [3] 中国人民大学物理实验中心。文科物理实验讲义[Z]。2014。



## Curricular structure and pedagogical exploration on Physics experiments in humanity and social sciences environment

HE Chun-juan, WANG Liu-jiu, XIA Tian-long, WANG Shan-cai

(Department of physics, Renmin University of china, Beijing 100872, China)

**Abstract:** Based on curricular features of experimental courses, the present study analyzes knowledge structures and abilities of humanity and social sciences students, introduces the concept of bridging and fusing between arts and sciences subjects and establishes a curricular structure which is progressively multilevel and features significant diversity among the same level for Physics experimental course for humanity and social sciences students, which takes flexible and inclusive appraisal methods and offers an opportunity for a relaxing academic environment and scientific exploration endeavors for humanity and social sciences students.

**Key words:** knowledge structures; fusing between art and sciences; curricular systems

# 物理实验项目管理初探

沈学浩, 周红, 杨文明  
(上海交通大学 物理与天文系, 上海 200240)

**摘要:** 通过对物理实验项目的规范化管理, 建立实验项目档案, 定时维护保养, 提高实验教学设备的利用率和完好率, 保证实验教学的正常进行。

**关键词:** 实验项目; 规范化; 管理; 档案

## 1 引言

加强创新型、实用型、复合型人才的培养, 促进有创新潜力和志趣的学生智力潜能的开发、研究能力的培养、动手实验技能的训练和心理素质的提高, 都离不开实验教学的环节。作为基础的物理实验, 尤为重要。而实验设备的优劣、管理水平的高低, 将直接影响学生的受益。近年来, 由于211、985项目的投入, 各校实验教学的基本条件和设施都得到了很大的改善, 实验设备和实验项目都向创新型、实用型、复合型人才的培养倾斜, 前沿性与先进性的现代化实验仪器也进入到基础实验教学中, 适合于各校实验教学体系的个性化自制实验设备也日新月异地投入到了相关的实验教学中。

有一个问题不可忽视。前期建设经费的大量投入, 确实在短期内使整个实验教学体系、规模更加翔实、丰满, 但后续维护资金的缺乏制约了实验教学的持续发展, 这是横亘在我们面前不容忽视的现实。如何游走于维护资金缺乏, 又使其实验设备能长治久安, 这就需要我们能好的管理机制。

对每个物理实验教学中心而言, 课程体系的建立, 就意味着每学年将根据不同课程开出众多实验项目, 所涉及的实验设备涵盖力、电、光、声、热等各种仪器, 品种、套数之多, 前期排设的和后期维护的工作量之大, 非规范不能承受。管理水平的高低将对教学质量和效益产生直接影响。

在实验室管理人员相对缺乏, 维护资金难以到位的情况下, 如何加强实验室仪器设备的管理, 保证现有的仪器设备的完好, 使其最大限度地发挥作用, 以真正提高实验教学的质量, 为学生服务。为此, 我们进行了有益的探索, 分享一下实验项目管理的体会。

## 2 规范化管理

本中心实验项目近百个, 基本每天均有开课。管理人员不到十人, 且逐年递减(正常退休)。为更好地加强实验室建设, 提高管理水平, 更好地为教学服务, 我们对实验项目进行了规范化管理。

### 2.1 建立实验项目档案

根据实验项目, 建立实验仪器及相关器件分类表, 标明“设备或器件名、型号、规格、数量、生产厂家、地址、联系电话、供应单位, 以及相关的备注”, 自制器件配以设计图纸。以“硅光电池特性的研究”实验项目为例(见附表1)。

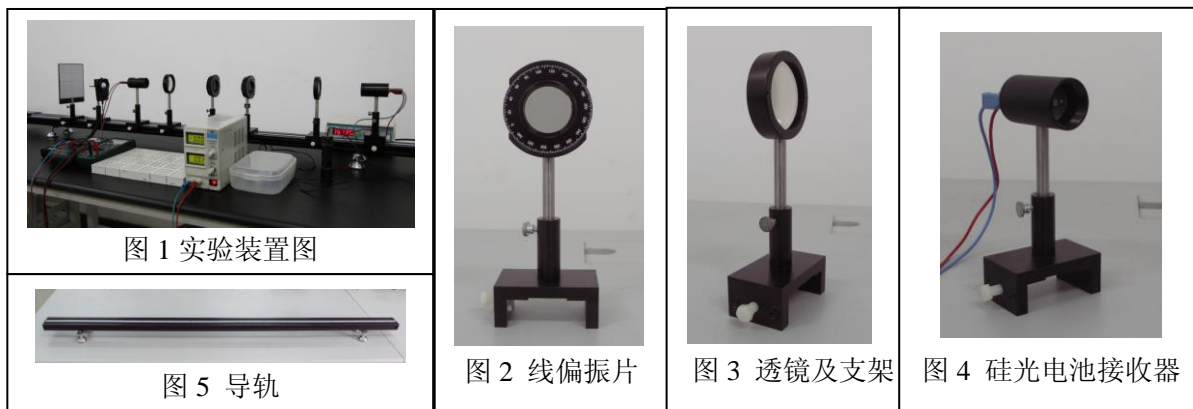
表1

序号	设备或器件名	型号	规格	数量	生产厂家	地址	联系电话	供应单位	备注
1	导轨	OYU-8-3060	1.5m; 处理: 抗光照氧化发黑, 厚度级别: AA20	1	上海欧宇铝制品有限公司	上海松江区九富工业区盛高路 258 号	021-67691423	物理实验教学中心	自制, 铝型材抗光照发黑, 加底座, 具体规格见: 导轨欧标 3060
2	线偏振片		φ40mm/分度 1°	2	海安县汇虹光电仪器厂	海安县双楼工业区刘圩 31 组	0513-88793069	海安县汇虹光电仪器厂	支架自制, 铝合金加工抗光照发黑, 图纸见文件: 偏振光座
3	透镜及支架		透镜 φ60mm / 红超+6.00 单片	1	恒茂眼镜	上海火车站北站广场(沈家宅路 55 号)三叶眼镜批发市场 115 号	021-51013093	物理实验教学中心	支架自制, 铝合金加工抗光照发黑, 图纸见文件: 透镜架
以下内容忽略									

实验项目档案的建立不仅是为现有管理者提供维修依据, 也为后续的管理者提供了维护便利和索引。

## 2.2 建立图片档案

建立整套实验装置和各实验器件的图片资料, 使管理者能方便地找出相关的仪器设备。以硅光电池实验为例, 列出部分图片, 见图 1-5。



实验中心的任何老师, 只要根据实验项目档案和实验器件图片就能方便地搭建出整套实验装置, 而无需受制于某一管理者。

## 2.3 规范实验开设前准备

每个实验项目都会有不同的技术要求, 要确保排出的实验项目能正常地工作, 就必须在排设过程中, 根据教学要求和仪器设备的情况, 认真检测, 确保完好。若有故障, 必须及时排除。所以根据每实验项目的特点, 制定相应的开设前技术准备程序, 对规范实验项目的管理, 确保实验教学的正常进行至关重要。以硅光电池实验为例进行说明。

开设前的技术准备:

- a. 改装稳压电源, 将其最大输出控制在 6V 左右, 目的在于防止硅光电池烧毁;
- b. 导轨、滑块清洁上油, 并检查滑块上的压紧弹簧、固定螺丝是否正常。同时, 检查导轨的底座支架是否松动, 若有异常, 当即时解决;

- c. 检查照明光源及供电恒流源和稳压源输出是否正常；
- d. 用万用表的电压和电流档分别检查硅光电池接收器的输出是否正常；
- e. 查看两偏振片、透镜透光清晰情况以及偏振片的检偏、起偏情况；
- f. 数字万用表的电流测量档 200mA 量程的保险丝是否正常；
- g. 照度计安装于光具座上。

### 3 维护

在教学实验过程中，仪器设备的利用率是非常的高，损耗和故障在所难免。如何将故障率降到最低，使实验教学能正常有序的进行，让学生能正常、完整地整个实验，真正获益，就必须有相关的维护措施。为此我们制定了几个维护的阶段，以确保实验仪器的正常。

#### 3.1 日常维护与保养

要求每次实验后，必须首先认真查看任课老师记录的仪器设备所发生的故障情况，发现问题，及时处理，切不可将故障带入下一轮实验中。同时，根据实验精度要求和仪器常见的故障情况，制定记录表格，对主要器件进行检查，做好相应的记录。见附表 2。

#### 3.2 每周检查维护

每周定期维护检查，则根据实验仪器的使用情况、实验环境进行针对性的维护。

#### 3.3 每月检查维护

每月定期维护，则是在日常维护的基础上，对实验仪器进行全面的保养。

#### 3.4 课程结束后的维护

课程结束后，对所有实验仪器进行检查。对电、力声、光、热等各类仪器器件，按相关的技术指标和要求检查，修复故障，正常后收起。

仍以硅光电池实验为例，能较为清晰地了解实验项目保养、维护的整个过程。

##### 1) 日常维护

附表 2

日期： 每日主要器件检查情况表

序号	检查维护器件	状态										情况处理	
		正常	无信号	电压纹波 > 1V	电流纹波 > 5mA	开机 3 分钟后电池情况	日光灯下电压值	日光灯下电流值	电流档无示数	污染 / 松动 / 破碎	亮度不足		不亮
1	稳压电源输出 0-15V												
2	光源恒流源 0-200mA												
3	万用表												
4	硅光电池接收器												
5	透镜												
6	偏振片												

7	光源（发光二极管）												
8	照明光源												
9	照度计												

- 2) 每周检查维护
- a. 万用表电压档标准测量;
  - b. 透镜清洁;
  - c. 检查导轨底座, 螺丝固定、旋紧;
  - d. 实验桌面整洁;
  - e. 硅光电池检查, 观测表面是否有短路烧毁情况, 测量暗电流、开路电压和短路电路情况。

3) 每月检查维护

定期对导轨、滑块上油润滑, 以保持滑块与导轨之间滑动灵活。

4) 课程结束后的维护

- a. 导轨、滑块上油润滑, 螺丝固定;
- b. 透镜清洁;
- c. 电源、恒流源检查, 确保输出正常;
- d. 所有元器件检查, 正常后收起;
- e. 整个装置盖上仪器布, 防尘。

#### 4 结语

对实验项目建立详细的电子档案, 为实验教学了提供完备的资料, 为实验技术人员的管理提供了很好的行动指南。实验项目的规范化管理, 保证了实验仪器的完好, 使得实验教学能正常有序地进行。我们所开设的实验项目, 均建立了相应的实验项目管理规范, 经过几年的实践, 效果明显, 为实验教学提供了很好的支撑。

## Exploration of Physical Experiment Project Management

SHEN Xue-hao, ZHOU Hong, YANG Wen-ming

(Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** By means of the physical experiment project standardization management, we set up the experimental project files, make the equipment maintained regularly, improve the utilization and perfectness rate of the experimental teaching equipment, and guarantee the normal proceeding of the experiment teaching.

**Key words:** experimental project; standardization; management; files

# 大学物理实验教学管理模式的探讨

周红, 赵西梅, 窦葳, 王锦辉, 杨文明, 沈学浩, 叶庆好  
(上海交通大学 物理与天文系, 上海 200240)

**摘要:** 本文介绍了近5年来上海交大物理实验教学管理模式的演变过程, 分析了各种教学模式的特点及存在的问题, 并对中心教学管理的发展前景进行了展望。

**关键词:** 教学管理模式; 主讲教师; 学科组教师; 助教

## 1 引言

“大学物理实验”课程是对高等学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程, 是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端, 是工科类专业对学生进行科学实验训练的重要基础。

本课程以“加强基础、重视应用、开拓思维、培养能力、提高素质”为指导思想, 通过该课程的学习, 使学生直接观察和分析重要的物理现象, 学习掌握物理量的测量和基本的物理实验方法, 加深对物理原理的理解, 使学生受到从事科学实验以及进行科学研究的基本训练。“大学物理实验”课程着力培养和提高学生的实践能力和创造能力, 使学生成长为适应二十一世纪所需要的, 具备基础扎实、知识面宽、能力强、素质高的人才。

## 2 教学管理模式介绍

近5年来, 随着上海交通大学物理与天文系的迅速发展, 作为基础教学单位的物理实验教学中心的教学管理模式也发生了较大形式的变化, 共存在过以下6种情况:

### 模式1 中心教师作为主讲教师与助教协同教学

实验课程的建设是课程教学质量的基本保证, 是实验中心专职教师的重要责任。物理实验教学中心负责实验课程建设的规划和部署, 中心专职教师在课程负责人的主持下实施课程的建设。实验课程建设的内容主要包括: 现有教学实验项目内容的设计与改进、实验仪器的改进、教材和实验指导资料的编写和修订、资料的收集、教学挂图和多媒体资料的制作等; 新教学实验项目内容的设计、实验仪器的研发、教材和实验指导资料的编写、资料的收集、教学挂图和多媒体资料的制作等, 实验教学方法的研究和交流讨论, 实验教学管理方法的研究和交流讨论等。

助教应在主讲教师的指导下实施教学, 主讲教师对课程的教学质量负责。作为课程的主讲教师, 备课阶段需负责助教的培训、教案的审核、试讲的把关。课程教学阶段时, 每次课由一位主讲教师带领四位助教共同完成四个实验项目的教学, 助教作为实验指导配合主讲教师完成整个教学过程, 同时主讲教师还需要对助教的实验报告批阅质量进行把关。学期结束阶段, 教师须确保实验成绩的正确录入、对助教进行综合考评并提交实验课程评测总结报告。

### 模式2 学科组教师作为主讲教师与助教协同教学

学科组教师为本系其它研究所的教师, 他们也参与中心的实验教学工作。作为课程的主讲教师, 虽然不必参与中心的课程建设, 但在教学过程中这些教师的工作职责与实验中心专职教师一样, 带领助教完成相应的教学任务, 并需对该课程的教学质量负责。

### 模式3 学科组教师作为任课教师参与教学

由于教学安排的需求, 有少部分学科组教师作为任课教师参与教学, 他们只承担课程的教学任务, 完成一定的教学工作量, 但不负责助教培训及相关的管理工作。

#### 模式 4 中心教师作为主讲教师参与教学

中心教师作为课程的主讲教师，负责教学的全部过程。主讲教师除了自己要独立完成一定的教学工作量，还需要负责助教的相关培训管理工作，教学过程不再像模式 1 的全程管理，而是抓两头中间松，即必须好象模式 1 一样，严格把关好助教备课和学期结束这两个阶段的相关工作。课程教学阶段，由于主讲教师也同时在上课，较难做到全程监管，但中间松不代表不管，而是采取了抽查听课、加强实验技术教师巡查等措施，以保证良好的教学质量。

#### 模式 5 学科组教师作为主讲教师参与教学

在实验教学的过程中，与中心主讲教师的工作职责一样。

#### 模式 6 助教参与教学

在教学过程中，助教在主讲教师的管理下，经过课前的培训，独立完成实验，实验报告及教案得到主讲教师的认可，方可进行试讲。试讲通过后进入助教工作的试用期，试用期一般为 2-3 周，在这个期间，助教需独立完成整个教学过程，主讲教师有责任进行听课及对作业批阅情况的审查，经主讲教师确认方可与校方签订助教工作协议书，正式上岗参与教学工作。

### 3 各种教学管理模式演变

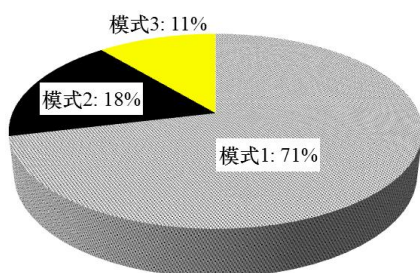


图 1 2010 年度教学工作量统计

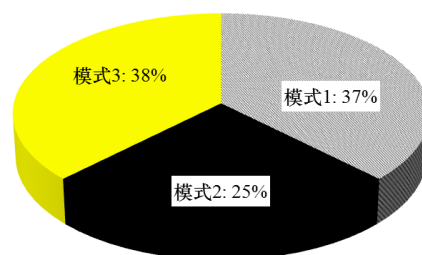


图 2 2010-2011-2 学期教学工作量统计

面向全校工科学生开设的“大学物理实验”课程由于学生数量较大，教师资源紧张的关系，使用了大量的硕博研究生助教。为更好地掌控实验教学的教学质量，由中心和学科组的教师担任主讲教师，在 2010-2011-2 学期以前，实验中心采用了模式 1 和 2 进行教学管理，以 2010 学年为例（见图 1），中心教师担任主讲教师的比例高达 71%，当时已经有部分学科组的老师参与到中心的教学中，由于中心教学安排的需要，参与的方式有所不同。以模式 1 和 2 完成的教学工作量比例高达 89%，这些教学工作量需要同时由 112 位助教协助主讲教师共同完成。由于整个教学过程由主讲教师全程负责监管，整体的教学效果虽然良好，但由于主讲教师是与助教协同上课，一方面教师的投入从工作量的层面上看没有产出，另一方面由于需要的大量的助教，每个学期的助教招聘工作难度较大，给教学安排带来了很大的困扰。

基于以上的原因，从 2011 年度的 2011-2012-1 学期开始，中心的教学管理的模式做了较大的调整，试点采用了 4 和 5 的教学管理模式。由于在课程教学阶段主讲教师和助教各自独立完成教学任务，需要助教的人数就大大减少了，以该学期为例，助教人数同比减少了 42%。虽然助教人数减少，但助教承担的教学工作量还是占了 65%（见图 3），主讲教师合计的工作量占了 22%（13%+9%）。在实验教学过程中，主讲教师的管理相应的减弱了，但由于加强了实验技术老师的巡查，整体的教学质量也得到了广大学生的认可。这样的教学管理模式已经沿用至今。随着中心专职教师的逐年退休，聘用的助教人数也一直在增加，统计至本学期，助教承担的教学工作量已经高达 75%。

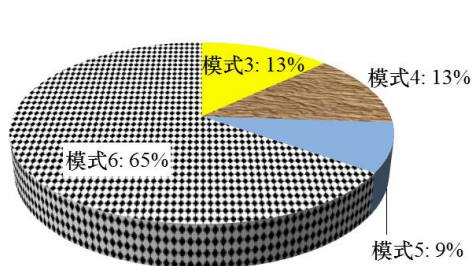


图3 2011-2012-1 学期教学工作量统计

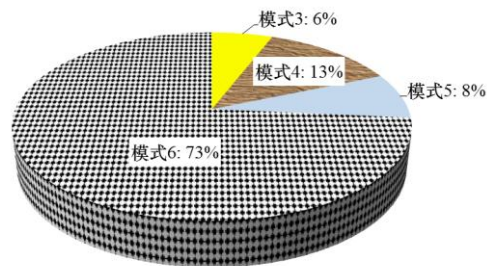


图4 2012 年度教学工作量统计

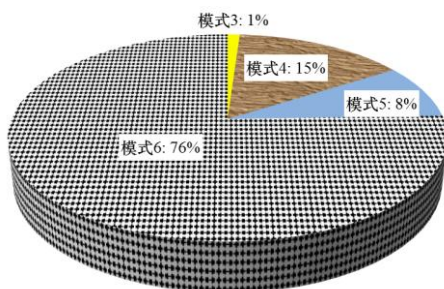


图5 2013 年度教学工作量统计

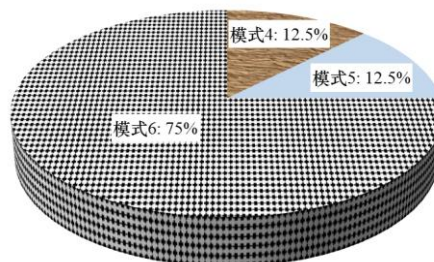


图6 2013-2014-2 年度教学工作量统计

#### 4 未来的展望

近年来, 任课教师的比例逐渐较少, 中心的教学管理模式主要由中心主讲教师、学科组主讲教师和助教三部分组成。随着近年来上海交通大学物理与天文系的快速发展, 学科组年轻教师大量引进而中心专职教师的人员的逐渐退休, 两种主讲教师的比例也在不断的调整中, 从2014年上半年的统计可以看出(见图6), 学科组主讲教师的比例已经与中心主讲教师持平了。同时由于大量实验助教走上了教学的第一线, 教学管理就需更加严格, 建议引入实验教学督导常态化的制度, 加大第三方监管的力度。同时研究生助教本身还有课业和科研任务的重担, 在课业或科研工作上与实验教学时间发生冲突时, 由于中心教学人员太少, 也会造成一定的教学安排困难。所以还是希望保持一支相对稳定的基础教学教师队伍。实验中心也希望在近几年探索的基础上摸索出一套更适合物理与天文系发展的实验教学管理模式。

### A discussion about the teaching management pattern of college physics experiment

Zhou Hong, Zhao Ximei, Dou Wei, Wang Jinhui, Yang Wenming, Shen Xuehao, Ye Qinghao  
(Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** This article introduces the evolutionary process of the experimental teaching management pattern of Shanghai Jiaotong University in recent 5 years. The characteristics of the teaching pattern and the corresponding problems are analyzed. Furthermore, the development prospects of the teaching management in the centre are summarized.

**Key words:** Teaching management pattern; Chief lecturing teacher; Subject group teacher; Assistant



# 产学研结合物理实验教学模式的探索

董敬敬

(中国地质大学(北京) 数理学院, 北京 100083)

**摘要:** 产学研一体化是将教学、科学研究以及企业需求相融合, 达到提高学生创新能力和服务社会的目的。文章首先从高校的社会功能层面分析了产学研一体化的必要性, 然后就我国目前高等院校产学研现状, 指出了创新能力的制约因素, 最后探讨了产学研一体化的物理实验教学改革对策。

**关键词:** 产学研; 物理实验; 教学模式

## 1 引言

在建设创新型国家的进程中, 高等院校肩负着教学、科研、服务社会三大职能, 它们是相辅相成、共同发展的。一方面, 教学与科研相互促进、共同发展: 系统的学科教学有助于为科研定向, 并为科研提供新的对象; 科研也可以进一步丰富、更新和充实教学内容。另一方面, 教学、科研与社会实践之间也是相互依存、不可分离的: 学生可以通过社会实践了解技术、产品、生产、管理和市场的关系; 同时为适应市场竞争, 企业也需要不断更新设备、工艺和发展新技术<sup>[1,2]</sup>。因此, 要实现三个职能协调发展, 必须坚持走产学研结合道路。

实验物理, 作为大学生接触到的第一门实践课程, 是高等院校课程教学的重要组成部分。它对于提高学生的综合素质, 培养学生的创新精神和实践能力具有独特的、不可替代的重要作用。然而, 针对当前国内高等院校的物理实验教学方式普遍存在的与社会需求内容脱节、课程内容陈旧、学生自主学习和实践能力缺乏等现状, 探索出一种产学研有机结合的物理实验教学模式是提升高校科技创新能力和社会影响力的有效途径和方式。

## 2 产学研现状及问题

近年来, 国内各高校在产学研结合方面进行了积极的探索, 尤其体现在将实验教学与科学研究结合, 以科研促教学, 从而提升教学内涵<sup>[3,4]</sup>。例如, 中国地质大学(北京)物理实验教学示范中心提出“以项目促创新, 以创新促教学”的教学理念, 以实验室开放基金项目、大学生创新性实验项目、北京市物理实验技能大赛等活动平台为切入点, 将科研项目与实验教学相结合, 课内和课外相融合, 课内实验是课外创新项目的基础, 课外创新项目是课内实验的延伸, 努力打造成科研氛围浓厚、特色鲜明、效果良好的学生第二课堂。并且建立了一套合理的激励机制, 从而极大的提高了学生参加科技创新项目的积极性和老师指导项目的热情。中国地质大学(北京)物理实验教学示范中心在教学与科研的结合方面已经取得了丰硕的成果, 但是依然存在一些问题: 诸如, 课内教学内容陈旧、授课方式缺乏引导性、科研项目参与度低等。此外, 中心大部分研发成果脱离了社会 and 市场需求, 很难转化为现实生产力。如何利用中心现有资源解决企业生产中的实际问题, 建立校企联合发展模式<sup>[5]</sup>, 真正的实现产学研结合, 同时进一步加强“以项目促创新, 以创新促教学”的教学理念, 我们应该从以下几个方面着手, 进行改革和创新。

---

**作者简介:** 董敬敬(1985—), 女, 山东聊城人, 博士, 中国地质大学(北京)数理学院, 讲师, 研究方向为纳米材料与器件。

### 3 物理实验教学改革途径

#### 3.1 将科研成果转化为综合性物理实验题目, 充实物理实验教学内涵

物理实验教学示范中心大部分教师都承担着科研项目, 同时每年都会指导北京市物理实验竞赛、大学生科技创新项目、以及实验室开放项目。如果将教师的科研成果和学生的创新性实验成果转化为一批综合性的物理实验题目, 一方面可以使实验教学紧跟科技前沿, 另一方面也可以使学生受到更多科研方面的训练。在 2013 年的北京市物理实验竞赛中就有很多非常优秀的项目, 例如: 太阳能电池的性能测试、超声探测实验在岩石测速中的应用、石墨烯的物理性质研究等等。如果将这些项目转化为一批综合性实验题目, 学生可以选作其中 2~3 个, 我认为一定可以激发学生的实验学习兴趣, 同时提高了整体的科研素养。

#### 3.2 根据社会需要, 优化科研与物理实验教学内容。

针对大部分高等院校物理实验课程教学内容陈旧、脱离实际应用等问题, 为了提高成果的指向性和针对性, 我们可以以企业需求为导向, 优化科研与物理实验教学内容。首先, 深入企业, 在充分调研基础上了解企业需求, 根据本地企业产品开发需求拟定产品研发的项目和内容, 将这些项目设计为难度不同、层次不同的综合物理实验项目, 并通过课内实验或课外科技活动实施之。其次, 找准合作切入点, 采取灵活多样的合作方式<sup>[5]</sup>。比如: 以协作形式建立校外实训基地, 或者, 合作办学, 一方面, 实现了教学、科研资源的共享, 更好的发挥了服务社会的职能; 另一方面, 也可以根据企业需要及时变换教学与科研内容, 真正的做到与时俱进。

#### 3.3 将实验教学成果和科研成果与产业化研究融合, 实现产学研统一

科学研究成果和实验教学成果的最终目的是产业化, 但是要真正实现实验教学、科研成果与产业化研究融合, 产学研统一, 不仅要根据企业需求决定科研方向与物理实验教学重点, 并及时的将教学与科研中取得的成果应用于实际生产过程中, 从而使得实验成果在企业中的直接转化, 有效地提高了项目的针对性和成果的转化率; 还需要探索一套合理的监督机制, 对教学、科研、生产三个环节的权利及义务进行明文规范, 保证三个环节的和谐统一<sup>[6]</sup>。

### 4 结束语

教育的价值在于解决实际问题。产学研结合物理实验教学模式就是根据企业需求, 确定实验教学及科学研究内容, 并将实验教学及科研成果及时的进行成果转化, 指导企业生产。积极探索产学研相结合的物理实验教学模式, 不仅有利于提高学生的创新能力, 也能提高教学、科研资源利用效率, 更好的发挥高等院校服务社会的功能。

#### 参考文献:

- [1] 王建伟. 建立产学研紧密结合的高等理工实验与实践教学模式[J]. 实验室技术与管理, 2008, 25(9): 25-27.
- [2] 于世勋. 地方高校产学研合作教育的路径探索[J]. 国家教育行政学院学报, 2013(1): 8-12.
- [3] 余凌, 鉴定. 面向协同的产学研创新能力提升路径与对策研究[J]. 理论月刊, 2013(7): 104-106.
- [4] 冯小燕. 基于“产学研”结合的地方高校专业实验室建设策略[J]. 实验技术与管理, 2009, 26(8): 155-158.
- [5] 王依群. 浅析校企合作培养电子信息高技能人才的有效途径[J]. 管理观察, 2010(32): 108-109.
- [6] 孔新舟. “专业实体化”产学研合作模式探索[J]. 职业技术教育, 2010, 31(2): 5-7.

## Exploration on Physics Experiment Teaching Mode of Education Combined with Research and Production

DONG Jing-Jing

(China University of Geosciences (Beijing), School of Science, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Integration of education, research and production is a mode combining the education, research and enterprise needs, to improve students' ability to innovate and serve the community. This paper analyzed the necessity to combine education, research and production from the talent-development firstly; then pointed out the constraints of innovation based on the current situation of university education; finally, discussed the methods to achieve the integration of education, research and production during physics experiment teaching.

**Key words:** education; research and production; physics experiment teaching; education mode

# 用创新的方法推动大学生创新实验发展

李传涛, 郑志远, 董爱国, 张自力

(中国地质大学 物理实验教学示范中心, 北京 100083)

**摘要:** 国家大学生创新性实验计划是教育部为推动创新型人才培养工作而实施的一项重要改革举措, 取得了一些重要成果。本文着重分析了目前物理实验竞赛中存在的一些问题, 并提出了相应的解决办法。

**关键词:** 创新; 创新实验; 创造性思维

## 1 前言

国家大学生创新性实验计划是教育部为推动创新型人才培养工作而实施的一项重要改革举措, 于 2007 年进入正式实施。通过开展实施计划, 带动广大的学生在本科阶段得到科学研究与发明创造的训练, 改变目前高等教育培养过程中实践教学环节薄弱, 动手能力不强的现状, 改变灌输式的教学方法, 推广研究性学习和个性化培养的教学方式, 形成创新教育的氛围, 建设创新文化, 进一步推动高等教育教学改革, 提高教学质量<sup>[1]</sup>。

国家性大学生创新实验计划推出以来, 教育部组织了部分高校 2010 年开始举办了首届全国大学生物理实验竞赛; 北京市早在 2007 年也组织了首都高校的大学生物理实验竞赛, 很多省区也纷纷组织了本省的物理实验竞赛, 这些都极大的推动了学生的参赛热情, 提高了大学生的动手、动脑能力。但是纵观来看, 现在还存在着一些问题。

## 2 存在的问题

### 2.1 创新思维欠缺

创造性思维是一种具有开创意义的思维活动, 即开拓人类认识新领域, 开创人类认识新成果的思维活动, 它往往表现为发明新技术、形成新观念, 提出新方案和决策, 创建新理论。从广义上讲, 创造性思维不仅表现为作出了完整的新发现和发明的思维过程, 而且还表现为在思考的方法和技巧上, 在某些局部的结论和见解上具有新奇独到之处的思维活动。

从现在的大学生创新实验来看, 我们能看到很多大学生思路比较清晰, 也展现了很多独特的设计思路, 出了一些优秀的作品。但同时我们也应该看到也存在着一些问题: 原创性的东西不多, 更多的是对一些细节的完善和修正。相对来讲, 中国人更善于学习, 而不是创造。大部分中国人缺乏现代科学的思维模式, 任何创新, 都需要一个自由的环境, 需要有批判性思维<sup>[2,3]</sup>。培养学生的创新性思维不是单独一个学科、一个学校就能做到的, 我们不应对学生有所苛求, 这是全社会应该努力的方向。

### 2.2 学生参与度不够

近年来, 大学物理实验竞赛在各地如火如荼的举行, 但也掩盖不了繁荣之下的尴尬。大学物理实验可以提高学生的动手能力和创新能力, 但是现在大学中有各种各样的竞赛, 例如由教育部主办的赛事有大学生数学建模大赛、大学生电子设计大赛、大学生机械设计大赛、计算机仿真大赛、大学生结构设计大赛、工程训练中心综合能力竞赛、“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛等, 还有各协会举办的各种全国大学生竞赛。由此, 学生可以选择的竞赛种类繁多, 自然造成了学生的分流。

另外, 全国大学生物理实验竞赛是教育部财政部开展的“本科教学质量与教学改革工程”资助竞赛之一, 是为激发大学生对物理学和物理实验的兴趣, 提高大学生的创新意识、知识

综合运用能力和实践能力,同时为国家级实验教学示范中心物理学科组各高校的师生们提供交流的平台。全国大学生物理实验竞赛提倡“重在参与,注重过程”,促进全国各高校大学生基础知识与综合素质培养的有机结合,为优秀人才脱颖而出创造良好的条件。然而全国大学生物理实验竞赛只是面对全国部分高校,很多学校没有参赛权,这些学校只能参加省级组织的物理实验竞赛,对学生保研或评优时就不起作用或者分值少,这就减少了对学生的吸引力。

### 2.3 实验题目选择

学生创新性实验项目是本科学生个人或创新团队,在导师的指导下,自主进行研究性学习,自主进行实验方法的设计、组织设备和材料、实施实验、分析处理数据、撰写总结报告等工作。

物理实验竞赛试题大致可以分为开放式和封闭式(现场命题式)两种。第一种方式,开放方式,采取自选题目(主要指论文或自制设备等)形式来完成某种问题,这种试题评价标准不好确定,且竞赛结果不一定全是参赛者个人的结果;主要问题还存在解决问题方式不创新,但是做得却很精细且很好。而有些解决问题的方法很创新,结果却不是很好。第二种方式,封闭式(现场命题式),这种方式也有一定局限性:试题形式过于呆板,无法体现大学生的创新能力的培养;其次,对保密要求和竞赛环境要求较多等<sup>[4]</sup>。

## 3 解决办法

### 3.1 创新实验模式

在美国、英国、德国、加拿大等发达国家的许多高等学校中,实验室、实习基地大部分都是开放性的。实验、实习内容多以学生自行设计、制作、测试为主,学生可以做课内规定的项目,也可以做自己感兴趣的内容,为学生提供了一个大胆思维、不受约束、能充分发挥个性的空间和条件,这也是为什么西方发达国家培养的入才创新能力强的原因之一。事实证明,实行开放性实验教学是深化教学改革、提高办学水平的需要,是形势发展的必然。中国地质大学(北京)对此进行了一系列探索,为配合学生的创新实验,物理实验教学中心专门有一个教室,配有各种工具,学生可以进行各种制作,如打孔、焊接、切割、组装等;在这里学生可以按照自己的想法自主进行操作实习。在此模式下,一部分动手能力强、有想法的同学对感兴趣的问题进行了实验,取得了积极成果。

### 3.2 举办全国大学生物理实验竞赛

目前,很多省市都在组织自己的大学生物理实验竞赛,有的是由省市教育厅组织,有的是依托学会组织。虽然学生有很高的参赛热情,但毕竟由于级别的关系,影响力没有完全发挥出来。为此,我们建议能够组织全国高校普遍参与的全国大学生物理实验竞赛,提高物理实验竞赛的影响力,使其能够成为水平高、影响力广的重要国家级赛事之一,提高在学生中的影响力。

### 3.3 与产业需要联合,更新竞赛题目

我们现在的物理实验竞赛题目经过了组委会老师的精心准备,展示了较高水准,学生也制作了较高水平的作品。但如果能够与一些优秀企业结合,让企业把一些需要解决的、适合大学生知识水平的问题作为竞赛题目,可能能和实际需要结合的更为紧密,更好的让技术成果转化成为现实生产力。

## 4 结束语

大学生创新性实验计划是一个新生事物,在实施中还存在许多问题,需要在今后的实践中进一步探索和完善。通过大学生创新实验计划的实施,学生的创新能力、参与科技活动的积极性都得到了提高,并取得了许多成果。本文简单分析了现在大学物理实验竞赛中存在的一

些问题和解决问题的思路,从而探讨了促进物理实验竞赛能更好开展的方法和途径。

**参考文献:**

- [1] 郑志远, 蒋云, 薛薇, 等。大学生创新实验计划实施的实践及探索[J]。实验技术与管理, 2010, 27(10): 30-35。
- [2] 余华东。创新思维的关键是非逻辑思维[J]。山西大学师范学院学报, 2002, 9。
- [3] 王巍, 王声乐。创新思维能力的培养[J]。辽宁工程技术大学学报(社会科学版), 2008, 10(5): 553-555。
- [4] 肖文波, 何兴道, 龚勇清, 等。大学物理实验竞赛试题设计和考核方式的讨论[J]。物理与工程, 2011, 20(2): 33-35。

## **The development of college students' innovative experiment using the method of innovation**

LI Chuan-tao, ZHENG Zhi-yuan, DONG Ai-guo, ZHANG Zi-li  
(Demonstration Center of Physics Experiment, China University of Geosciences,  
Beijing 100083, China)

**Abstract:** The national college students' innovative experiment plan is the ministry of education to promote the innovative talents training and implement an important reform measures, some important results were obtained. This paper analyses the problems existing in current physical experiment competition, and proposed the corresponding solution.

**Key words:** innovation; innovative experiment; Creative thinking

# 浅议大学生科研精神与创新能力的培养

樊振军, 郑志远, 冯娟, 董敬敬, 高华, 张自力  
(中国地质大学(北京) 数理学院 物理实验中心, 北京 100083)

**摘要:** 本文结合教学实践介绍了现阶段大学生进行科学研究的主要模式, 以及大学生进行创新活动存在的主要问题, 根据实践情况提出了引导大学生进行科学研究应注意的问题以及鼓励大学生进行创新活动的主要方法。

**关键词:** 创新能力; 实践能力; 科研精神

## 1 引言

经过十几年的小学及中学的学习, 我国的学生在升入大学后亟待提高其科研精神及创新能力, 不同于国外的个性化教育, 我们国家的中小学的教育过程存在着重应试教育, 轻创新精神的培养, 一个儿童从小为了升入好的学校必须参加各种应试的培训班, 他们没有时间进行独立的观察与思考, 所以逐渐的也就慢慢地失去了创新能力与质疑的精神。而对于升入大学的大学生来说, 一旦缺失了创新能力与科研精神, 那么他们大学毕业以后在自己的工作岗位上就很难有所作为。我们说国家的强盛, 需要科技的创新来支持, 所以也就要求我们的高等教育学校培养出更多优秀的具有创新能力及科研能力的大学毕业生。

## 2 现阶段大学开展科研工作的主要模式有以下四种<sup>[1]</sup>

### 2.1 校级大学生创新实验项目

根据“教育部办公厅关于申报国家大学生创新性实验计划的通知”、“中国地质大学(北京)大学生创新性实验计划项目实施办法(试行)”文件精神, 为了提高大学生创新能力和实践能力, 进一步调动全校本科生开展科学研究的主动性、积极性和创造性, 中国地质大学(北京)每年开展一次大学生创新研究项目的申报。项目分为一般与重点两类, 资助经费为3000~10000元, 学生是项目的管理者与实施者, 每一个项目选取一名指导老师。在每年的大学生创新题目的申报中, 大学生创新实验项目分为北京市级与国家级两类重点创新项目, 以及校级的一般项目及校级的重点项目四个等级。对于研究内容详实、题目前沿的项目学校会推荐获得北京市级与国家级的资助, 资助经费比校内的项目要多, 项目结束后, 由学校负责验收, 并将验收结果报北京市教委。

### 2.2 实验室的开放项目

高校的实验教学在本科生教学中占有重要的地位, 实验室为学生开展实验、发挥主观能动性提供良好的条件和环境, 极大的调动了学生的积极性, 有利于创新性人才的早期发现与培养。中国地质大学(北京)资产处负责每年的实验室开放项目的申报与管理, 原则上项目由教师提出, 实验题目要求与实验内容相关, 使得从事开放项目的同学能在实验室进行项目的研究。实验室的开放项目根据项目研究内容的情况, 同大学生创新项目一样也分为四个等级, 即国家级、北京市级、校级一般及校级重点项目, 除了研究经费不同以外, 每一个项目

---

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金资助(项目编号 2652012054)

**作者简介:** 樊振军(1975—), 女, 山东省临清市人, 中国地质大学(北京)数理学院, 副教授, 理学博士, 主要研究方向为准晶材料的生长及其性能研究。

的管理及检查验收的方式都是一样的。

### 2.3 参加物理实验技能大赛

从 2006 年开始，中国地质大学（北京）每年举办一次物理实验技能大赛，大赛的题目与北京市物理实验技能大赛的题目相同，每年在暑假前公布竞赛题目，学生根据兴趣选取题目进行研究，利用暑假的时间进行准备。通过物理实验技能大赛的形式每年也吸引很多同学利用暑假进行科研工作，物理竞赛的题目包括科研论文、限定题目的竞赛项目及有物理思想的仪器制作，所以学生对于研究的内容有很宽的选择范围。

### 2.4 以实验室为依托，进行独立的科研创新活动

对于没有成功申请大学生创新及实验室开放项目的学生，以学院为单位的实验室也是真正对科研感兴趣的学生进行科研的地方，比如中国地质大学（北京）物理实验中心具有大量的机械加工工具及一些物理测量仪器，而且实验室全天开放，所以有很多学生在实验室已经和正在开展自己感兴趣的科研项目。

## 3 大学生进行创新活动存在的主要问题

以上是近几年我校大学生进行科研活动的主要模式，在上述的科研活动过程中，大部分的同学都增强了科研意识，提高了动手实践能力，在实验总结的撰写过程中提高了论文写作能力。但是在具体的实践中，也暴露出学生在科研活动的过程中存在一些问题，主要表现为两个方面。

### 3.1 研究题目的提出基本都是由教师来完成

我校学生的研究题目超过九成都是由教师提出，学生听从教师的指挥进行一些工作，由于缺乏对生活的实际观察及思考，另外极少关注科研动态，很少有学生能独立自主的提出切实可行的研究题目。

### 3.2 学生的主体作用较差

在进行科研活动的具体过程中，有近一半的学生只能听从老师的指挥进行一些跑腿的工作，对于项目的实施没有自己的想法，如果学生在科研活动的过程中只是被动的执行老师的安排，就达不到培养科技创新能力的目的。

## 4 鼓励学生创新活动的主要方法

为了鼓励学生积极的进行科学研究活动根据我们近几年的工作经验，发现采取合理的方式方法对学生进行指导与鼓励，可以极大地提高学生进行科研活动的积极性，将学生被动的进行工作转变为其主动的快乐的进行科学创新，从而收到了比较好的教学效果。

首先，广泛的宣传是吸引到多数学生的主要手段。我们的宣传方式包括课堂老师的告知，以及校园网站的通知公告，经过上述的宣传物理实验中心一年学生的报名数大概为 20 组，约 60 人；2013 年夏物理实验中心进行了走廊改造，在走廊的两侧及顶部的墙上展出了以时间及空间为主线的物理知识，及物理知识在生活实际及军事工业等方面的应用，这样学生在上课的过程中利用课前或课后的时间，可以学习到非常广泛的物理知识，了解到物理在生活中的实际应用。尤其是文科学生看到图文并茂的生动直观的物理知识的介绍后，很多同学也对物理的学习产生了兴趣，由此可以看出，适当的科研氛围的建立是引导学生步入科研殿堂的一个非常可行的方法。为了鼓励更多的学生进行科研活动，吸引更多的学生加入到创新的团队中，利用学校社团的力量进行宣传更容易拉近学生与科研的距离，通过高年级同学的自己科研活动及科研成果的介绍，更能建立学生对科研的信心及兴趣。

其次，建立适当的奖励机制也是吸引学生的有效方法。相比较研究生大学生的课堂学习时间要多很多，能进行科研活动的大块时间不多，很多同学担心做创新项目会占用他们很多的时间，所以就不敢去申请研究项目，走不出进行科研活动的第一步，针对上述问题，我们



学校规定选修了创新实验题目的同学可以申请创新学分,从而可以减免部分课程的学习;物理实验中心规定对于选作中心创新题目的学生可以申请减免部分相关的物理实验题目,通过上述形势学生的创新实验工作的工作量得到认可,也能减少他们进行创新活动的一些担忧,许多同学在选题前怕进行课外的科研活动影响课堂的学习,有的同学担心实验工作占用太多时间,如果从学校层面肯定了学生的科研活动,他们在进行课外的创新项目时就减少了很多的精神负担,所以近几年学生进行科研活动的积极性越来越高。

总之,创新对于我国的教育来说,不是一种新思想,但无疑是一个新课题,它对宏观的教育体制和微观的教育措施等都带来一场前所未有的挑战,培养创新人才,需要创新教育。高校建立科学的创新能力培养体系,营造浓厚的大学生科技创新氛围,营造科技创新环境,对于培养适应经济社会发展的高级创新人才具有十分重要的现实意义。

#### 参考文献:

- [1] 王松武,刁鸣,于云峰。适应学生课外科技活动的实验室开放与运行模式[J]。实验技术与管理,2006,24(7):139-141。
- [2] 郭伟锋。实验室环境下创新能力培养的协同观[J]。实验室研究与探索,2009,28(10):14-16。
- [3] 葛龙威。大学生课外科技创新活动特点及问题分析和对策研究[J]。经济师,2006,3:88-89。
- [4] 徐洪珍,李茂兰。大学生科技创新能力培养的探索与实践[J]。东华理工大学学报(社会科学版),2009,28(3):294-297。
- [5] 樊振军,郝会颖,赵长春。通过参加科学实践提高学生创新能力[J]。中国科技信息,2008,(9):205-206。
- [6] 张小康,王亚南,刘华平。大学生科技创新活动中重视文献综述能力的培养[J]。中国科教创新导刊,2010(31):23。
- [7] 张幼芳。大学生科技创新活动存在的问题与思考[J]。中国科教创新导刊,2009(31):171。
- [8] 唐杰,王跃球,尹进田。大学生创新教育新模式的探索[J]。电气电子教学学报,2009,31(2):119-120。
- [9] 朱亦赤,王玲。从研究生的视角谈如何提高研究生科研能力[J]。中国科教创新导刊,2010(31):168。

# 拔尖人才培养中综合物理实验教学改革实践与探索

张俊武, 程向明, 王红理, 高 博  
(西安交通大学 理学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 在理工科大学教育中, 物理实验课程占有重要的位置, 尤其在以培养拔尖人才为目标的新一轮教育改革大潮中, 更具有很强的针对性, 是全面培养学生分析能力、解决实际问题能力、激发创造能力的重要训练课程。我们对所承担的拔尖人才专业的综合物理实验教学进行了改革与探索, 经过几年的实施, 取得了一定的成效。

**关键词:** 拔尖人才; 物理实验; 教学改革

## 1 引言

近年来, 随着我国高等教育事业的蓬勃发展, 各高校纷纷开设高层次本科专业, 着眼于拔尖人才培养, 以西安交大为例, 先后开设“少年班”、“钱学森班”、“物理试验班”等专业, 对于这些学生的课程设置有和开设, 成为衡量我们教育改革能否成功的重要标志。

在理工科大学人才培养中, 物理实验课程在有着不可替代的重要地位, 它可使学生巩固所学知识、加深对物理现象和规律的理解, 同时又培养学生动手解决实际问题的技能, 提高其观察、分析实际问题的能力, 从而成为培养学生创造性的重要训练课程。

但是, 对于这些拔尖人才的物理实验课程开设, 尤其在完成了以动手能力训练为目的的基础物理实验之后, 为全面培养其观察、分析、解决实际问题的能力, 在后续的物理实验教学中, 必须采取灵活性、多样化、多元化的教学方式, 激发学生的学习兴趣, 培养和提高其自主研究性学习能力、创新能力和动手实践能力。

正是基于以上考虑, 我们对所承担的拔尖人才专业的综合物理实验课程进行了研究与探索, 经过连续几届的摸索与实践, 在“少年班”、“钱学森班”和“物理实验班”的教学中推行, 得到学生积极的响应, 取得了良好的效果。

## 2 课程内容与形式的改革

在综合物理实验课程内容与教学形式改革方面, 我们结合本校、本中心的特点, 进行了深入的研究与探索。按照理论与实践相结合、各个学科相互交叉的原则, 将实验内容进行了模块化设置, 将其分为多个系列专题, 各个专题中包含数目不等基础实验、拓展实验和研究性实验内容。学生根据自己的兴趣、爱好和能力选择内容, 并以小组形式完成实验。在每一个实验小组里, 每个学生首先要完成一定数量的基础实验, 在此基础上, 还必须以个人或小组形式完成一定内容的设计性实验, 根据要求设计出实验方案、进行查阅资料、理论准备、完成实验器材的搭建、采集、处理、分析实验数据, 并最终完成综合性实验报告。

教学过程注重与学习的互动, 激发他们的学习兴趣; 注重与工程实践、实际应用相结合。实验课程内容分为以下专题:

1) 计算机传感器专题: 在学习了传感器理论和基础实验之后, 学生选择项目进行设计、创新、完成全部的实验内容。通过该专题的学习, 可以使学生学习传感器的理论及应用、传感器的内部结构和外部特性以及接口电路; 更好地了解各类传感器在现代科学技术各领域里的应用, 学习怎样用计算机对各类物理量进行数据采集与处理。传感器是检测技术和自动控制的重要环节, 目前已广泛应用于科学各领域, 通过该专题的学习, 为今后从事科研工作奠定一个良好的基础。

2) 近、现代光学专题:通过学习声光效应的理论和系列实验,可以了解各类声光器件的原理和应用,声光技术在激光技术、光信号处理和集成通讯等方面有着重要的应用;学习用迈克尔孙干涉仪测量光源波长及精细结构和微小长度和长度的微小变化等应用;学习全息照相的基本理论、拍摄技术,观察和分析全息图。通过全息系列实验的学习,可以了解全息照相技术在精密计量、无损检测、信息存储和处理等领域的应用,全息技术已经发展成为近代科学的一个新领域。

在教学实践探索过程中,对学生的考查要求也逐步深化,要求其在完成专题实验内容后,撰写相应的综合性专题实验报告,对系列实验的目的、原理、过程和结果进行描述,着重分析实验中所碰到的各种问题及应对措施,分析、评价实验结果,并大胆提出自己对于整个实验过程、仪器的改进设想,有条件时可分步实施,并完成自己的设计性实验指导。

### 3 教学改革效果与评价

在实验课程中,通过对于传感器系列专题实验研究,学生们学习了传感器理论、传感器的内部结构和外部特性以及接口电路和基础实验,并对部分传感器和实验内容进行设计性改造,提出了自己的实验方案。对于光学专题共开设了“声光效应”、“迈克尔孙干涉仪”和“全息照相”3个专题。大多数学生对全息照相专题感兴趣,他们积极学习基本理论、拍摄技术,观察和分析全息图之后,查找资料,自己设计全息照相技术在精密计量、无损检测方面的应用方案,反复试验,得出结果。

通过这种方式的学习,大大地激发了学生的积极性,进一步锻炼了他们的动手能力,提高了他们在面对实际应用时分析、解决问题的能力。许多学生为通过反复的实验和努力解决了问题而感到兴奋,自愿延长实验时间,甚至利用课外时间进行实验。他们积极主动地完成了实验内容,并同时通过自主学习完成综合性专题实验报告,内容充足详实、分析精细,提出的问题尖锐、有针对性,解决方案可行性很强,报告的篇幅甚至达五六十页。可以看出来,学生们在用“心”做实验。

近几年来,利用实验课程平台,多名学生参加全国大学生实验竞赛及学术竞赛,取得了不错的成绩。

以下是部分学生对课程改革的评价:

“高级物理实验所谓的高级在我看来一是实验仪器的高级(实验的先进性);二是学生的自主性,完全由学生自己选题,自己动手操作、设计实验;另外,实验拓宽了我们的视野,学到了课本上学不到的东西。这些给我留下最深刻的印象。”

“这次的实验跟我们以前的实验不同,因为我感觉这次我是真正的自己去完成。我们学生自己的能力得到了充分的发挥,真正得到了收获,特别是学到了进行实验所需要的很多品质。所以我觉得这次实验是最宝贵,最深刻的。”

“通过这次实验,我不但对理论知识有了更加深的理解,对于实际的操作也有质的飞跃。经过这次实验,我们整体对各个方面都得到了不少的提高,希望以后学校和系里能够开设更多类似的实验,能够让我们得到更好的锻炼。”

“总体说来,这次课程学习感到收获满满,激起了我进一步学习物理的兴趣。”

### 4 结束语

实验课程教学改革是一项长期而艰巨的工作,在实际的教学实践中我们深感到各种不足与待改进:实验专题数量偏少、传感器种类不够丰富、指导教师理论知识有待进一步拓宽,尤其在面对层次较高的拔尖学生时,这些问题尤为突出。在目前情况,即刻解决这些问题并不现实,只能通过坚持不懈地探索与实践,不断地摸索,寻找最大地发挥现有资源优势的方法,这恰恰也正是进一步进行教学改革的动力所在,也是我们进行教育改革的目标之一。

## Comprehensive physical experimental teaching reform practice and exploration for Talent training

ZHANG Jun-wu, CHENG Xiang-ming, WANG Hong-li, GAO Bo  
(School of Science, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In the science and engineering university education, the physical experiment teaching occupies an important position, especially in the new round of education reform tide, which is as the goal to cultivation of talents, more targeted very strong. It is an important training courses to train the students' ability to analyze, stimulate solving the actual problem ability and creative ability. After several years of implementation, the reform and exploration of our comprehensive physics experiment on the top talent teaching achieved certain results.

**Key words:** top talents; physical experiment; teaching reform

# 大学物理实验教学质量评估体系的研究与实践

王铁云

(长治学院 电子信息与物理系, 山西 长治 046011)

**摘要:** 根据《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》对实验教学质量的评价值念, 结合大学物理实验课程教学的实际, 对大学物理实验课程教学的质量要素与评价标准进行了研究与探讨, 构建了客观、有效和操作性较强的大学物理实验教学质量评估体系, 并对质量评估的有效实施、评估实践中容易出现的问题、评估对提高实验教学质量的促进作用等作了分析与讨论。

**关键词:** 大学物理实验; 教学质量; 评估; 指标体系; 评价标准

## 1 引言

实验教学是高等学校教学工作的重要组成部分, 大学物理实验是理工科类专业学生进行科学实验基本训练的公共必修课程, 是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端, 是培养理工科类专业技术人才最重要的基础课程, 大学物理实验教学质量的优劣关系到本科人才的培养质量<sup>[1]</sup>。近年来, 随着教育部高等学校物理基础课程教学指导委员会对《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)的出台, 各个高校对大学物理实验课程的教学条件、教学队伍、课程体系均进行了优化。但是, 对大学物理实验教学质量的评估还没有规范的评估办法, 实验教学质量已成为学校领导和教学管理部门关注的问题。本文就是依据《基本要求》对实验教学质量的评价值念, 结合大学物理实验教学的实际, 吸取我校多年来实验课程管理与评估的经验, 对大学物理实验教学质量评估体系进行研究与探讨。

## 2 大学物理实验教学质量评估指标体系的设计原则

大学物理实验教学质量评估指标体系的设计, 是对大学物理实验教学质量进行有效评价与鉴定的基础, 为使大学物理实验教学质量的评估具有科学性和有效性, 评估指标体系的设计须遵循一定的原则。

### 2.1 客观性与导向性原则

客观性是指大学物理实验教学质量评估指标体系的设计要符合大学物理实验教学规律, 指标体系具有合理性、可靠性与可操作性, 通过客观地建立大学物理实验教学质量评估指标体系, 使评估结果符合实验教学实际, 能客观的体现大学物理实验教学质量。

大学物理实验教学质量评估的目的是引导教师重视实验教学, 推动实验教学的改革, 提高实验教学质量。所以导向性作用既体现在指标体系各条目的选择和评估标准的制定上, 又体现在如何确定各条目的权重上, 同时要求评估指标的内涵、评估过程、评估侧重点都符合《基本要求》。按照大学物理实验教学质量评估指标体系对大学物理实验教学质量所作出的

---

**基金项目:** 山西省高等学校教学改革重点项目《新建本科院校理工科类非物理专业大学物理实验教学改革研究与实践》(项目编号: J2011104); 教育部高等学校教学研究项目《基础物理实验课程教学评估研究与实践》(项目编号: JGY08029)

**作者简介:** 王铁云(1956—), 男, 山西晋城市人, 理学硕士, 教授, 主要从事物理实验教学与研究工作。研究方向: 实验物理与现代教育技术。

评估,能够为大学物理实验教学改革的进一步提高提供导向作用,最终达到有效地提高学生的科学实验能力与实验综合素质。

## 2.2 先进性与可行性原则

先进性是指评估指标体系能反映大学物理实验教学所达到的现代教育科学水平,通过考察实验教师的教学思想、教学理念、教学内容、教学方法和教学手段等方面的新颖性来体现。可行性指在现有实验条件下,从大学物理实验教学的实际出发,选取能有效地反映大学物理实验教学改革的评估指标与观测点,能真实地反映实验教师的教学实际,评估结果能被学校、社会、教师、学生接受,可操作性强。

只有评估指标体系的先进性与可行性原则有机结合,才有利于加强大学物理实验教学管理,充分调动大学物理实验教师积极投身教学、参与实验教学改革的积极性,促进大学物理实验教学质量的提高。

## 3 大学物理实验教学质量评估体系的构建

实验教学质量评估是高校教学质量监控工作的重要组成部分,建立适合于大学物理实验教学的质量评估标准,构建一个合理的、规范的、科学和操作性强的大学物理实验教学质量评估体系,不仅能对实验教学效果进行有效的评价,而且能及时发现问题与解决实验教学中存在的问题,对不断地提高大学物理实验教学质量具有促进作用。

### 3.1 评估指标体系的构建

评估指标体系是评估工作的尺度,是评估工作的关键环节。大学物理实验教学质量评估象理论课那样单纯,它的涉及面较多,是一个多因素、多层次的复杂问题,评估指标必须全面、准确地反映大学物理实验教学的特点和体现与实验教学质量相关的因素。我们认为大学物理实验教学质量评估的指标体系应当是以实验教学条件为基础,以实验教学绩效为目标,以实验教学过程管理为控制手段,以实验教学改革为补充的结构体系。根据评估指标体系的设计原则,大学物理实验教学质量评估指标体系应包含实验教学文件、实验教学条件、实验教学过程、实验教学改革、实验教学效果等质量要素<sup>[2]</sup>。

### 3.2 质量要素的内涵及标准

大学物理实验教学质量涉及到多方面的内容,要使实验教学质量评估科学、有效、可行,最主要的是确定评估指标体系中的要素、主要观测点、评价标准以及权重系数等。而评价标准的内容也是多方面、多层次的,大学物理实验教学质量评估就是要紧紧围绕各质量要素相互之间的衔接及其关系,以及质量要素所包含的内容建立量化指标与质量标准。

#### 1) 实验教学文件

实验教学文件考察的内容主要是实验教学大纲、实验教材、实验教案、教学日历及实验安排、实验项目管理等资料。大学物理实验课程教学大纲是根据专业教学计划的要求,课程在教学计划中的地位、作用,以及课程性质、目的和任务而规定的实验内容(项目)、实验体系、范围和教学要求的基本纲要,它是实施教育思想和教学计划的基本保证,是进行实验教材建设、实验教学和实验教学质量评估的重要依据,也是指导学生学习、制定考核说明和评分标准的指导性文件。实验室要根据实验大纲准确、规范地填写好实验项目卡与实验教学日历,科学安排的大学物理实验课程的教学进度表,确保教师保质保量地完成各个实验项目的教学任务。实验教案是教师依据实验教学日历的进度要求,为完成教学大纲所规定的实验项目而准备的实验教学工作计划,是教师以实验项目规定课时为单位编写的、实施教学活动的具体方案,它所承载的基本内容是实验教学过程的组织管理信息,是落实实验教学思想、教学方法、教学手段和考试方法的具体措施,是指导具体实验项目的重要依据。所以说,实验教学大纲、实验教学日历和实验教案是实施实验教学检查、督导、评估工作的重要依据。

## 2) 实验教学条件

大学物理实验教学是在具备了一定的一起设备、实验场所、实验教学队伍等条件下的教学活动。根据大学物理实验教学的需要,实验室的面积、通风、照明、安全设施等符合要求,配置能保证学生基本实验教学质量台套数的仪器设备,并且保证仪器设备的完好率和贵重仪器设备的使用率等,这些基本条件能够直接体现出大学物理实验教学正常开设的基础建设水平。实验室的仪器设备等基础教学设施是实现应用型、创新型人才培养目标的物质基础。大学物理实验教学队伍是对实验教学质量产生较大影响的关键因素。实验队伍的学历、职称、年龄结构要合理,人员构成要相对稳定、要具备进行实验教学研究和改革的意识与能力。同时,大学物理实验教学的负责人要具备扎实的物理实验理论基础与实践技能、具备较高的管理与沟通能力;在大学物理实验教学中,实验场所与实验仪器设备是确保实验教学质量的基本物质保障。只有实验室具备一定的规模,配置的实验仪器设备能够满足大学物理实验教学的需要,才能保证实验教学质量,达到专业人才培养对大学物理实验教学的基本要求。

## 3) 实验教学过程

大学物理实验是观察与实验相结合、思考与判断相结合、个性与共性相结合的课程,其教学过程是在教师指导下学生动手操作独立完成实验的学习过程。要从教师的教學态度、教學能力、实验教学内容到教师的教學方法、学生的实验操作技能训练、教学纪律等方面来考察。首先是实验教学内容的选取要做到经典与现代实验的结合、综合与基础实验的结合、设计与研究性实验的结合,实验的教学环节在安排中要突出综合性、创新性与应用性,符合《基本要求》的要求;其次教师要对实验教学工作有热情,能够严格遵守教师教学工作规范,讲课认真、投入、精神饱满,对实验内容及仪器设备很熟悉,能很好地把握实验内容的难度和深度,能将理论课与实验课有机联系起来,或对学科前沿课题给予适当介绍;第三是教师注重对学生实验操作的基本功与实验技能的训练、思维方式和科学作风的培养,通过及时指导实验,激发学生的求知欲;第四教师能客观地评价学生的实验操作、数据采集、解决实验中实际问题的能力,课后能及时地确定评价等级,并且能及时、认真、公正地批阅实验报告,在实验课纪律、实验操作、课程考核等环节都能够严格要求学生<sup>[3]</sup>。这样做有助于学生的实验动手能力、独立实验的能力、分析与研究的能力、理论联系实际的能力与创新能力的训练和培养

## 4) 实验教学改革

大学物理实验教学改革研究,要从实验室实际出发确立实验教学改革思路和研究项目,实验内容的更新、实验教学形式与方法的改革是实验教学改革的重点,要提高综合性、研究性与设计性实验的比例,要突出创新应用,注重利用科研成果和现代技术手段更新实验内容,使学生能够在实验中掌握基本的实验技能、学习现代科学的基本技术、熟悉课题研究的思路与方法,培养学生主动掌握新的实验技术、主动关注科技发展动态、主动适应科技创新应用的品质,培养学生的创新精神、创新意识与创新能力<sup>[4]</sup>。

实验教师或其他实验教学人员要定期开展教学研究活动,进行大学物理实验教学改革研究。同时,实验教师首先要学习现代实验理论和技术,追踪现代物理学的新进展、新成果,了解高新技术适应新形势的要求,总结实验教学改革的成果,每年都能在学科或实验教学、实验技术的公开刊物上发表教学改革研究论文。

## 5) 实验教学效果

大学物理实验教学效果主要从教师的教育教学水平和学生达到的学习水平两方面来体现,它是实验教学质量评估的关键因素,着重评估实验教学的实际质量和能力培养的实际效果。实验教学效果的评估更重视学生在实验中解决实际问题的能力,依据“解决实验问题的能力”的教学效果评价观点<sup>[5]</sup>。注重在实验教学中创新,激发学生自觉、主动实验的学习热

情,充分体现学生的动手能力,不仅是实验操作和实验数据的准确程度,而更应该是现代实验技术技能和科技创新的综合能力。

### 3.3 评估指标体系结构表的设计

在指标体系的结构设计中,从大学物理实验教学质量评估的目标出发,把目标分解成二级项目,然后再经分解、量化指标内涵,建立质量标准,以达到可测性的要求,这样即可保证指标体系与评估目标的一致性。根据评估指标体系的设计原则与大学物理实验的教学特点和要求,大学物理实验教学质量评估体系应包含评估要素(一级指标)5项、主要观测点(二级指标)18个、内涵及标准、权重系数、评估等级与分值、评估方式等内容。也就是说,按照“评估指标→评价标准→权重→评价等级→评估方式”的顺序设计评估指标体系结构表。如表1所示。

表1 大学物理实验教学质量评估指标及评价标准

一级指标	二级指标	内涵及标准	权重		评价等级				评估方式
					A	B	C	D	
实验教学文件	教学大纲	有按专业培养要求编写的实验教学大纲,大纲格式规范。	0.1	0.3					检查
	实验教材	教师能根据实验课程教学要求选用合适的实验教材或实验指导书,或学校自编并出版的校本教材		0.1					检查
	实验教案	目的要求明确,对重点难点有分析,熟练掌握实验中所用仪器的使用方法,有实测实验数据,且数据处理正确		0.3					检查
	实验教学日历	按实验教学大纲填写好教学日历,内容准确规范;按规定分好实验小组数,实验时间、内容依据教学日历安排合理,并能严格执行		0.1					检查
	实验项目管理	准确、规范填写好实验项目卡,每个实验项目管理规范,记载有名称,面向专业,组数,主要设备名称,规格型号,数量及材料损耗等情况		0.2					检查
实验教学条件	实验队伍	实验队伍的学历、职称、年龄结构合理,人员构成相对稳定,且具备进行实验教学研究和改革的意识与能力;实验专职人员有明确的岗位职责与分工细则;专兼职人员有具体的考核办法与定期考核材料、有培养培训计划	0.1	0.5					检查 座谈
	实验仪器设备	配置能保证学生基本实验教学仪器设备的台套数,原则上一人一组,个别不能一人完成的实验,以满足实验要求的最低人数为准;仪器设备的完好率和贵重仪器设备的使用率在90%以上		0.3					随堂 检查
	实验环境	实验室的面积、通风、照明、安全设施等符合要求;室内布局合理,实验台面、凳、仪器整洁卫生		0.2					随堂 检查
实验教学过程	教学态度	教师对实验教学工作有热情,能够严格遵守教师教学工作规范,讲课认真、投入、精神饱满,重视教学反馈,不断改进实验教学方法;对学生要求严格,模范遵守实验室规章制度	0.4	0.1					听课 座谈
	实验内容	实验项目的选取经典与现代实验结合、综合与基础实验结合、设计与研究性实验结合;基础性、综合性、研究与设计性实验的开设符合《基本要求》规定的比例;按照教学计划,实验开出率达到100%		0.3					检查 听课
	实验讲授	讲课思路清晰、条理清楚,熟悉实验原理与仪器使用方法,讲授精练准确,仪器操作熟练、规范,演示正确、物理现象清晰,课时分配合理,强调实验安全及注意事项		0.1					听课 观察



	实验过程	教师能认真仔细观察学生实验操作过程，并及时正确解答学生疑问，指正学生的错误操作和实验过程中出现的问题，注重培养学生的实验技能，培养学生发现问题、分析问题与解决问题的能力	0.4						听课观察
	教学纪律	教师没有无故缺课、随意调课、迟到、实验过程中随意离开实验室等现象；对学生要求严格，实验秩序好，师生能遵守实验室规章制度		0.1					检查
实验教学 改革	教学改革	注重实验教学改革研究，有从实验室实际出发的实验教学改革立项课题；能利用科研成果和现代技术手段更新实验内容	0.1	0.5					检查 座谈
	研究成果	有实验改革和实验研究成果；实验人员每年都能在学科或实验教学、实验技术的公开刊物上发表实验研究、教学改革研究论文		0.5					检查
实验 教学 效果	学生实验 技能	在教师指导下学生能独立地完成实验，且实验操作规范；学生能理解掌握其基本理论，基本知识和基本技能；学生实际操作能力符合培养要求，实验中的动手能力、解决实际问题的能力得到了提高	0.3	0.4					听课 观察 座谈
	实验报告 质量	每个学生都能自主完成实验报告，有详细地原始实验记录，实验数据计算、结果表示正确，实验结果分析符合科学规律、问题讨论透彻；实验报告批阅及时、规范、公正		0.3					检查 座谈 问卷 调查
	学生满意 程度	达到实验目的，实验效果学生满意率达 85% 及以上		0.3					问卷 调查

## 4 评估体系的实施及应用

### 4.1 评估方式

过去的教学质量评估，大都采用发放学生调查问卷的方式，由学生无记名评价教师的教学情况。由于学生是大学物理实验课程教学的直接受益者，所以学生对实验教学质量的评价能更好的反映课程的教学效果。这种方式的优点是便于组织，收回问卷进行数据统计，评价结果明显清晰；缺点是部分学生有马虎应付态度、或对某些教师的个人偏爱感情用事、以及其他因素会影响问卷调查的统计结果，使评估出现偏离实际情况的现象，影响了评估工作的可靠性和准确性。

大学物理实验教学质量评估从本质上说它是一种价值判断活动，价值判断的显著特点是客观性与主体性的高度统一。评估专家的认知结构，主体意象都会影响评估的客观性和准确性，所以大学物理实验教学质量的评估就是选择不同的评估主体从不同角度对不同教师的同一门课程进行评估。

我们经过调研以及总结过去的经验，认为大学物理实验教学质量评估首先要成立校系两级评估专家组，然后分别采用实地查阅资料进行检查、召开座谈会、组织听课及观察实验过程、现场督导教学、学生无记名问卷调查等方式，对照指标体系有针对性地采用不同方式进行评估。

### 4.2 评估的实施

#### 1) 评估前的准备

评估的前期，学校成立课程教学质量评估组、选定评估专家是完全必要的。但是，大学物理实验教学质量的评估主要是对实验教学中的行为（实验教学过程）和结果（实验教学效果）的鉴定，评估的实施特别要重视“行为人”的作用。所以，大学物理实验教学质量的评估，首要的问题是让全体实验教师都能够适应教学质量评估，让大家清楚地认识到：开展大学物理实验教学质量的评估，对提高实验教学质量、实现实验教学目标管理、培养应用型人才具有重要的作用，也是解决重视理论教学、轻视实验教学的必要措施。同时，还要让全体实验教师学习评估指标体系，充分理解指标体系的内涵与评价标准，理解实验教学质量评估的意

义,并在大学物理实验教学实践中落实评估指标的内涵及质量要求。

### 2) 评估的实施过程

从大学物理实验教学教学质量评估指标体系五项一级指标所包含的内容可看出,该课程的评估是过程性评估,也就是说,评估指标的内涵涉及到课程的全过程。所以,大学物理实验教学教学质量的评估可分为期中、期末两个阶段进行。

期中教学质量检查可完成评估要素 1、2、3 及要素 4 与 5 的部分内容。即:评估专家可以从查阅资料开始,考察大学物理课程的教学文件及有关管理制度的完善情况、教师的教案、学生实验报告水平和教师批阅质量等;通过随堂听课、观摩教师的讲授、操作演示、指导答疑、组织教学和学生实验实际操作等环节,考察教师的教学态度、方法、水平、效果和学生的基础知识与实验技能的掌握情况;通过实验室实地考察与召开实验教学座谈会,了解实验室的环境设施及实验室管理情况、仪器设备的使用情况、实验队伍配备情况,考察实验教学条件。

学期末可完成教学质量评估要素 4 与 5 的大部分内容。即:采用分别召开教师、学生座谈会和查阅资料的方式,通过现场询问及问卷调查,了解学生对教师教学水平的评价和对自己学习效果的估计、了解教师的实验教学改革研究项目的进展与运行情况,以及学年研究成果。

### 3) 评估等级及量化

在评估指标体系中,每个评估项目(观测点)都有 A、B、C、D 四个评价等级,A、B、C、D 四个等级的含义是达到内涵标准的程度为:优、良、中、差。在评估实施过程中,来自不同评价主体的评价等级要充分体现“以质性评价为主”的理念。

依照评估指标体系对评估项目确定了评价等级后,为了获得客观、科学、准确的评估结果,总是要对各指标项的评价等级进行量化处理,最后形成大学物理实验教学质量的定量结果或定性综合意见。由于指标体系涉及的评估项目较多,考虑到指标体系的复杂性,一般地,根据各指标项的权重,用模糊数学理论建立大学物理实验教学质量的模糊综合评判矩阵模型,并应用于评估实践。

模糊综合评判法的基本思想是在确定评估一级指标项、二级指标项的评价等级标准和权重的基础上,运用模糊集合变换原理,以隶属度描述各一级指标项、二级指标项的模糊界线,构造模糊评判矩阵,通过多层的复合运算,最终确定评价对象所属的等级。也就是经过“建立评估指标集→建立评价集→确定各指标因素的权重→建立评价矩阵→模糊综合评判运算”等步骤后,采用最大隶属度原则,得出评估结果。如果要使评估得出定量的结果,可以将评价等级转换为百分制分数,即赋予分值:取“优”=95分、“良”=85分、“中”=75分、“差”=60分。也可采取简单方法得出评估结果,即根据一级指标、二级指标的权重给评价等级赋予一定的分值,用加权平均法求出结果的总分值。

## 4.3 评估实践中需要厘清的问题

### 1) 评估整体与样本的关系问题

如果将大学物理实验教学质量的评估作为一个总体的话,那么,实验教学条件与教师的教学就是评估总体中的样本,评估该门课程的整体教学质量是建立在对实验教学条件与教师的实验教学质量的评估的基础上。所以,评价每位实验教师的教学质量主要考察评估要素 3、4、5,和要素 1 的部分内容,每位教师的评估结果的“集合”与条件评估的结果就构成了大学物理实验课程教学质量的评估结果。

### 2) 学生评教与实际教学的差异问题

大学物理实验教学质量的评估是检验大学物理实验教学的有效手段,学生评教工作是学校教学质量监控体系的重要环节。但是,学生对于实验教学与理论教学在感受程度上是有差异的,理论教学可以用“懂不懂”或“会不会”来描述,以此来体现学生对教师的认同程度;而

实验是在教师指导下学生独立完成的课程,学生的感受是“成功与失败”,由于在实验过程中受条件的影响,学生可能是一人一组或两人一组做实验,在仪器的调节、数据的采集、学生间的配合等因素都会导致实验不完全成功或者失败,这些因素在一定程度上影响着学生对教师及实验课程教学质量的评价。

### 3) 评估与常规教学的关系问题

作为一名实验教师来讲,可能会认为大学物理实验教学质量评估是为了制约、监控教师的实验教学活动,使其在思想上形成一种压力,而影响常规的实验教学。因此,作为实验教学管理部门及人员,一定要处理好评估与常规教学的关系,将评估作为实验教学管理的一种措施。通过评估可掌握实验教学各环节的动态,获得反馈信息,及时发现并解决影响大学物理实验教学的问题,从而更好地服务于实验教学,以促进实验教学质量的进一步提高。

### 4) 教学督导与质量评估的关系问题

大学物理实验教学质量评估是过程性评估,实验教学督导是对实验教学活动的各个环节以及各种实验教学管理制度等实施检查、督促、评价和指导,通过随机听课、观摩实验教学过程、抽查教师实验教学教案和学生实验报告、参与实验考核、召开实验教学座谈会等,对实验教学实施全程监控,这正是实验教学质量评估所要做的过程监测工作。所以说,实验教学督导为质量评估提供了可靠的实验教学事实依据和意见,对学校职能部门改进实验教学管理、提高实验教学质量具有非常重要的作用。

## 5 结语

大学物理实验教学的管理实践证明,建立科学、有效的大学物理实验教学质量评估体系不仅是使评估结果与实验教学实际相符的关键,而且也对实验教学目的起到重要的调控、纠偏作用。开展大学物理实验教学质量评估,可以及时发现影响大学物理实验教学的问题,促进学校加大实验室建设的投入力度,引导教师重视实验教学,推动实验教学改革,提高实验教学质量。同时,也为学校实验教学质量检查、课程评估制度的建立奠定一定的基础。

## 参考文献:

- [1] 教育部高等学校物理学类专业教学指导分委员会. 高等学校物理学本科指导性专业规范[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 24-25.
- [2] 王铁云. 改革物理实验教学模式, 培养学生创新能力[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(8): 6-9.
- [3] 胡成华, 史玲娜. 大学物理实验教学创新模式的探索与实践[J]. 物理与工程, 2012, 22(1): 44-46.
- [4] 王铁云. 基于《基本要求》的新建本科院校大学物理实验教学模式研究[J]. 物理与工程, 2012, 22(3): 13-16.
- [5] 王震, 丁永文, 杜木. 普通物理实验教学中的“提出问题”[J]. 物理实验, 2010, 30(4): 18-21.

## Research and Application of Quality Assessment System in College Physical Experiment Teaching

Wang Tie-yun

(Changzhi College Electronic Information and Physics Department, Changzhi 046011, China)

**Abstract:** Based on basic rules of college physical experiment in universities of science and engineering, the paper applies the assessment concept of experiment teaching quality into the practice of college physical experiment teaching. At the same time, quality elements and assessment standards in college physical experiment teaching have been researched and explored, and related quality assessment system has been built that is objective, effective and strongly operational. Finally, the paper analyzes and discusses the problems and effects easily occurring in the practice of effective performance and assessment of quality assessment.

**Key words:** college physical experiment; teaching quality; assessment; index system; assessment system

# 师范生探究性基础物理实验项目建设的思考与实践

柴志方, 崔璐, 戚小华, 宦强, 赵强  
(华东师范大学物理系, 上海 200241)

**摘要:** 为了加强师范专业学生物理实验技能的培养, 华东师范大学物理实验教学中心对师范生探究性基础物理实验项目进行了再建设, 具体为: 选用能够加深和提高中学物理相关内容理解的综合性实验内容, 在编写讲义时, 采取基础加拓展式双层实验内容, 并且不再提供实验实施方案和步骤。这些调整促进了师范生探究性、设计性能力的培养。

**关键词:** 师范生; 探究性实验; 实验内容; 再建设

## 1 引言

物理实验不仅是物理学研究的基础, 是物理学教学的重要手段之一, 也是中学物理教学的重要内容, 更是实施素质教育的极其重要的环节之一<sup>[1]</sup>。2003年, 《高中物理课程标准》公布实施, 为中学物理教学带来了新的理念、新的要求, 实验教学的相关内容也发生了较大的变化。新的《课程标准》要求中学物理教师在思想上高度重视实验教学, 从方式方法上改进实验教学, 从评价的角度强化实验教学, 对中学物理教师在实验方面提出了更高的要求<sup>[2]</sup>。这就要求师范院校在对师范生的培养上, 进一步加强对师范生实验实践能力的培养。

在现行的师范生实验教学体系中, 探究性、设计性基础物理实验用来培养师范生的实验实践能力。然而, 由于师资、硬件、专业等多方面的原因, 在大部分院校中这部分已开设的实验或者师范特色不明显, 或者对普通物理常规物理现象的探究缺乏系统性, 影响师范生对高中阶段物理实验的深入理解。针对这个问题, 从2011年开始, 华东师范大学物理实验教学中心调整了物理系探究性基础物理实验的授课内容、授课方式等, 以加强对师范生在相关领域实践能力的训练。在此后的两年中, 物理实验教学中心不断对授课内容、授课方式进行探索和研究, 并取得了一定的效果。本文主要详细阐述了物理实验教学中心这两年在师范生探究性物理实验授课内容方面所作的工作。

## 2 探究性实验内容建设

探究性、设计性实验是普通物理实验的一个重要教学环节, 它一方面用来加深学生对普通物理有关知识的理解, 同时培养学生初步的动手能力和探究能力。在考虑开设哪些实验内容给学生探究时, 第一个需要考虑的是教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理学类专业教学指导分委员会《高等学校物理学本科指导性专业规范》(2010年版)和《理工科大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)<sup>[3]</sup>, 以及《上海市高校基础物理实验课程教学规程》(2013年版), 在这些文件中, 总共建议了至少40个基础物理实验项目, 单纯从这40个项目的内容上来看, 适合作为探究性实验项目的内容并不多。在开设探究性、设计性实验时, 需要对这些实验项目进行进一步的开发和整合。

对于师范生而言, 在其成为一名物理教师后, 不仅要能够胜任中学物理实验的常规教学任务, 还要能够对学生的课外物理实验进行指导<sup>[4]</sup>。为此, 师范生应该掌握具有专业指向性的、较为综合的、体系化的实验培训, 通过探究性、设计性实验训练后, 能够具备针对中学

---

**作者简介:** 柴志方(1977-), 男, 河北邢台人, 华东师范大学物理实验教学中心, 副教授, 博士, 主要从事物理实验教学与研究。

物理实验教学内容进行一定拓展的能力。

目前,在师范类院校,教学法实验是专门针对物理师范生的一门课程,该课程为师范生提供了一个深入研究中学物理实验的一个窗口。然而该课程的教学重点是实验教学法的训练,对于师范生的相关知识拓展与实验设计能力的训练,则并不关注。为此,在探究性实验项目中注入师范专业这一重要的元素,是培养高质量物理师范生的关键。

表1 师范生探究性实验内容

实验一	冰的熔化热及相关热学实验探究	实验二	用示波器检测 RLC 电路及判断电学黑盒子
实验三	运动物体瞬时速度的测量与探究	实验四	测量与分析非线性元件的伏安特性
实验五	弦线上的驻波	实验六	多用电表的设计与制作
实验七	光衍射现象的观察和测量	实验八	偏振光的观察与测量
实验九	误差理论及应用	实验十	拓展性实验系列

因此,在经过近两届学生的实践后,目前暂定的师范生探究性实验内容如表一所示。在设置实验内容时,既考虑到力学、热学、电学和光学等实验的教学计划,也考虑中学物理实验能力的训练和提高,同时,也兼顾了实验分析、设计等能力的培养。

### 3 基础性加拓展性的双层实验内容

对于表一中所列的实验项目,在设计讲义的时候,对于实验内容部分,它的设置不同于普通物理验证性实验内容的设置方法,而是采用了基础加拓展的形式。具体说来,就是针对每一个实验,分别设置基本内容和拓展性实验内容两个部分,基本内容有助于实验的学生了解基本物理原理、熟悉仪器使用方法,是必做实验。拓展性实验内容则包含多个内容,需要实验的学生具有一定的发散思维的能力,学生可以根据自己的兴趣选择其中一个或多个实验进行实验。

例如,在设计“偏振光的观察和测量实验”的实验内容时,设置了“马吕斯定律的验证”、“圆偏振光和椭圆偏振光的获取与检验”为基础实验,通过该实验,实验的学生一方面可以熟悉起偏器、检偏器,另一方面,可以对偏振光的概念有一个深入的掌握。同时,又设置了“互补色的观察”、“薄玻璃片折射率的测定”和“生活中的偏振现象观察”为拓展性实验内容。

再如,在“光衍射现象的观察和测量实验”中,设置了“单缝衍射现象的观察及测量”为基础型内容,用以学生理解普通物理光学课的相关内容,设置了“光盘道间距的测量”,“漫反射全息的观察”,“观察生活中的其它衍射现象”等作为拓展型内容,让同学进一步掌握衍射现象的应用等,具有一定的拓展思维能力。

在“弦线上的驻波实验”中,“验证弦线中驻波的波长和弦线中张力的关系”,“验证弦线中驻波的波长和振动频率的关系”为基础性能容,弦乐器发生原理探究则为探究性实验。

### 4 探究性的体现

在普通物理实验中,主要是验证性实验,针对每一个实验内容均给出了详细的实施步骤,留给学生思考的空间并不多。由此造成学生完成实验的过程只能是机械的重复实验步骤的过程,对学生实验设计能力的培养很有限。实验完成后,学生往往并不了解所采用实验步骤的特殊性,也不会明白所采取数据处理方法的特殊性。

以我校普通物理实验的“霍尔效应及通电螺线管磁场分布的测定实验”为例。作为一个验证性实验,它的教学目的的一方面让学生了解霍尔效应,另一方面则让学生了解通电螺线管内部磁场分布的规律。学生做完实验后,往往也只是了解了这两个方面,对于这个实验的设计思想,则是并不了解,因而也难以培养其实验设计能力。

实际上，在实验设计方面，“霍尔效应及通电螺线管磁场分布的测定实验”有着很多方面可以供学生学习，例如，为什么在螺线管内部每一个测量点，均要电流正反向测量一次霍尔电压？为什么要采用单刀双掷开关？实验内容的设计上，为什么要先测量霍尔元件得灵敏度，再测量通电螺线管得磁场分布等等，这些问题，都会被学生忽略掉。而对于“如果补偿电压的旋钮故障了，是否还可以通过施加补偿电压的方法去掉剩余电压的影响”这一类问题，学生更不会去考虑，学生在实验中一旦发现补偿电压旋钮无法调零，一般会立即要求教师调换仪器。如果将以上问题设计成思考题，以思考题的形式让学生了解实验设计意图，我们发现它的效果也并不明显。

针对上述情况，我们在编写探究性实验讲义的时候，对于每一个实验，仅给出实验目的，并对原理进行简单的介绍，再给出实验内容，实验讲义中不安排实验实施方案和步骤。对于实验具体的实施步骤，由学生在实验的时候自己设计、实践、再设计。

仍以“偏振光的观察与测量”为例，在编写讲义时，对于采用偏振光来测量玻璃折射率这部分内容，我们仅简单的叙述了实验原理，如：当自然光以布鲁斯特角入射平面玻璃的表面时，折射角与入射角之和为 90 度，反射光为完全偏振光（线偏振光）。同时，由折射定律可求得平面玻璃的折射率。

因此学生在测量玻璃折射率时，学生需要考虑怎么样使用所给定的实验仪器，产生一个什么样的入射光，如何检测出射光，应该观察到什么样的现象。实验过程中每一步的现象学生都没有经历过，是未知的，因而学生需要反复探索、实践，才能得到合理的方案和正确的结果。

## 5 运行效果

在具体的建设与实践过程中，我们发现，一个在以往看起来非常简单的实验内容，在取消了实验步骤后，则对学生变得非常的难，学生往往不知道怎么下手。以“验证马吕斯定律”为例，在有实验步骤的时候，实验非常简单，一般学生都能够用 20~30 分钟的时间操作起偏器、检偏器和功率计获得正确的实验结果。然而，当去掉实验步骤后，学生首先不清楚公式  $I = I_0 \cos^2 \theta$  中的  $\theta$  如何确定，不懂得利用 P1、P2（见图 1）的消光位置确定  $\theta=90^\circ$  的位置。其次，不清楚  $I_0$  怎么确定，在确定  $I_0$  的时候，往往会忽略掉 P2 表面反射光。这两个似乎很简单的问题，往往需要同学讨论很久，思考很久。因而，学生完成实验，通常要花费 60 分钟甚至更多。然而，在这样的实验过程中，学生不是处于被动获得知识的地位，可以说他亲身经历了实验的过程和探索，经过了主动积极的思考，这样掌握的知识是非常牢固和深刻的。在一个学期的探究性实验实践过程中，我们发现，学期初，学生对于所操作的实验畏难、没有头绪，而到学期末，明显学生的思路和方法开阔了许多，完成实验的时间得以缩短，质量也得以提高。

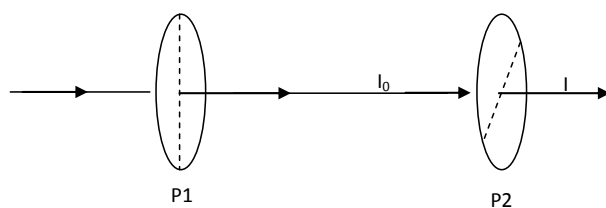


图 1 马吕斯定律的验证光路

## 6 总结

由于师范专业的特殊性,我们针对现行的师范生基础物理探究性实验项目进行了调整和建设,使其内容更具有师范生特色,有助于师范类相关专业知识的拓展和培养。在实验内容上,则采取了基础加探究型的双层实验内容体系,并且与普通物理实验相比,在讲义中不再叙述具体的实验实施步骤。这些调整使得实验内容的探究性增加,学生获得知识的方式也由被动转化为主动。我们的工作有助于强化师范生物理实验的设计能力,为其以后担任中学物理教师打下基础。

### 参考文献:

- [1] 马葭生,宦强,等。大学物理实验[M]。华东师范大学出版社,1998。
- [2] 《走进新课程》丛书编委会,物理课程标准研制组。《走进新课程丛书:普通高中物理课程标准(实验)解读》[M]。湖北教育出版社,2004。
- [3] 教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会。理工科类大学物理实验课程教学基本要求[M]。高等教育出版社,2011。
- [4] 张德启,李新乡,陶洪,等。物理实验教学研究[M]。科学出版社,2005。

## The Thinking and Practice of exploring experimental project construction for normal school students

Chai Zhi-fang, Cui Lu, Qi Xiao-hua, Huan Qiang, Zhao Qiang

(Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** To strength the normal students' teaching ability training of physical experiments, the project exploring experiments is reconstructed. Three measures are carried out. The first is that the experimental projects are related to physical knowledge in middle school, and can deepen the understanding of the physical knowledge in middle school. The second is that two-level experimental content, the basic and expanding, is designed. The third is that the experimental procedure is not provided. These actions promote the Cultivation of inquiry, design ability for normal students.

**Key words:** Normal students; Exploring experiments; Experimental content; Reconstruction



# 观国际知名赛事对中学生实验能力培养的作用

——15 届亚洲物理奥林匹克竞赛观察员心得

刘丽飒, 张春玲, 宋 峰, 李川勇  
(南开大学 物理科学学院, 天津 300071)

**摘要:** 对比了两类著名的中学生物理赛事: 国际奥林匹克物理竞赛(或亚洲物理奥林匹克竞赛)和国际青年物理学家锦标赛对中学生实验能力要求上的异同。综合两类竞赛对学生实验能力培养方面各有千秋, 建议师生备赛时在实验方面相互借鉴。

**关键字:** 物理竞赛; 物理实验; 能力培养

## 1 引言

国际奥林匹克物理竞赛(或亚洲物理奥林匹克竞赛)和国际青年物理学家锦标赛是目前两类著名的中学生物理赛事。国际奥林匹克物理竞赛(或亚洲物理奥林匹克竞赛)有独立的实验考试, 国际青年物理学家锦标赛要求学生进行的竞赛报告中涵盖自己的实验内容。本文简单介绍这两类知名赛事, 分析了国际奥林匹克物理竞赛(或亚洲物理奥林匹克竞赛)对中学生实验能力的要求。着重比较了两类赛事对学生实验能力培养方面的异同。

## 2 国际奥林匹克物理竞赛与亚洲物理奥林匹克竞赛简介

国际奥林匹克物理竞赛的英文名称是 International Physics Olympiad, 简称 IPHO。它的宗旨是通过组织国际中学生物理竞赛来“促进学校物理教育方面国际交流的发展”, 以强调“物理学在一切科学技术和青年的普通教育中日益增长的重要性。此项竞赛于 1967 年在波兰华沙首次举办, 起初仅东欧 5 国参加, 后扩展到包括苏联在内的 8 个国家。自 1972 年开始, 有非东欧国家参加, 以后逐渐扩大。经过 30 多年的成功举办, 国际声望越来越高, 它的作用已被联合国科教文组织和欧洲物理学会所肯定<sup>[1]</sup>。自 1967 年第一届中学生国际奥林匹克物理竞赛(简称国际奥赛)至今, 除 3 年之外, 每年举办一次, 至今年已举办了 44 届。

亚洲物理奥林匹克竞赛(APhO)源于 IPHO, 每年举行一次, 是目前亚洲最为重要的物理比赛。在 1999 年 IPHO 期间, 由印尼领队 Yohanes 连同 IPHO 主席 WGorzowski 教授, 共同着手筹备, 2000 年 4 月第一届 APhO 在印尼成功举办。至今已有 15 届历史。APhO 的宗旨是: 通过组织国际性中学生物理竞赛, 宣传物理学科的重要性, 推动亚洲各国在物理学教育方面的交流与合作, 增进亚洲各国青少年间的联系与理解, 激励有才华的青少年脱颖而出。APhO 作为物理学领域重要的国家赛事, 为亚洲各国和地区的青少年表现本民族的聪明才智提供了交流和竞争的舞台, 因而受到各国政府的高度重视。

每年全国中学生物理竞赛都通过几十万名中学生物理爱好者的层层淘汰和选拔, 为国际物理奥林匹克竞赛、亚洲中学生物理竞赛选出参赛选手, 这些选手在国际性比赛中都取得了很好的成绩。至今承接过 APhO 国家队辅导任务的高校有复旦大学、南京大学、北京大学以及南开大学。中国队除 2001 年和 2003 年因故未能参赛外, 在历届 APhO 中成绩均十分优异。尤其是 2008 年北京大学担任国家队培训以来, 更是创造了连续五年所有队员全部金

**基金项目:** 国家基础科学人才培养基金(J1103208, J1210027)

**作者简介:** 刘丽飒(1978-)女, 河北秦皇岛人, 南开大学物理科学学院副教授, 博士, 从事基础物理光学实验教学。

牌的记录。

受中国科学技术协会和中国物理学会委托,南开大学物理科学学院和天津市物理学会自2012年起,承担中国物理奥林匹克队培训及带队参赛任务。在2013年的第十四届亚洲物理奥林匹克竞赛和第四十四届国际物理奥林匹克竞赛中,13名参赛选手全部获得金牌。为了积极备战第15届亚洲物理奥林匹克竞赛,物理科学学院自2013年11月起对培训队成员进行了严格、规范、高强度的培训和选拔。本人有幸作为观察员全程参与了今年5月11日至19日在新加坡举行这次赛事。本届竞赛共有27个国家,174名选手参加,竞赛设金牌15枚。8名中国参赛选手均获得金牌,新加坡获得3块金牌,越南、中华台北、泰国、俄罗斯各1块金牌。此外中国参赛队员还获得总分第一、实验第一、理论解题最佳创意奖、最佳男生奖。

### 3 亚洲物理奥林匹克竞赛对中学生实验能力的要求

作为长期从事实验基础教学的老师,就赛事对学生的实验能力培养给予了特别的关注。通过这两年对国家集训队的培训,和对历年实验考题的分析,发现在实验能力要求方面,APHO具有以下特点:

a. 仪器开放,要求学生按图自行组装。由于实验装置要在有限的经费内解决(一套实验装置100美元左右),竞赛通常用简单的元件可以却近似取代精密仪器的作用。实验装置的设计十分巧妙,值得老师和学生们学习。

b. 要求学生自行设计实验的测量范围、间隔、次数等,或对实验方案进行选取。比如在今年的APHO实验题的第三部分需要自行确定配置盐溶液的浓度范围,以及浓度间隔。在第二部分要求在两个透镜中选取一个来完成实验。

c. 注重探索物理趋势,尽可能提高实验准确度。由于测量装置的简易性,要测得可靠的物理结果,除了依赖题目已经限定好的实验方案外,学生要取得准确的实验结果,必须实验考虑在操作中要避免的引起误差的主要因素。

### 4 国际青年物理学家锦标赛简介

国际青年物理学家竞赛简称IYPT(International Young Physicists' Tournament),由前苏联在1987年发起,每年举办一届,目前已经进行了27届。IYPT由大学组织实施、中学生参与,是一项以团队对抗为形式的物理竞赛。它以培养参赛者的创新意识、创新能力、协作精神和实践能力为根本理念<sup>[2]</sup>。比赛过程中正方队员要进行报告,按照评分规则要求报告中应涵盖所进行的实验研究,并对正方实验和理论分析的吻合程度有分数考量。

### 5 两赛事对学生实验能力要求的异同

两种赛事对学生实验能力上的要求有所不同,主要体现在以下几个方面:

a. 不同于APHO或IPHO实验装置给定,IYPT的仪器由学生全自组,实验方案全自拟。

IYPT虽然是以报告的形式进行最后的研究成果展示,但在此之前学生必须亲手实验观察现象,分析实验原理,并依原理分析确定要测量的参数,自行购置和组装实验器材,进行实验探索。而APHO或IPHO的题目尽管部分理论细节需要学生推导,或部分实验现象需要探寻,但实验原理框架基本已经给定,无需学生探讨和证明。

b. 在实验与理论的关系方面,APHO或IPHO侧重于用已有的理论指导实验获得最准确的实验结果,而IYPT注重用实验去检测学生的理论猜想。

c. APHO或IPHO经常出现黑盒子装置,而IYPT由于仪器由学生全自组,不能进行相关探索。APHO或IPHO为加强对学生实际应用物理知识的能力,黑盒子问题逐年增多,要求学生利用实验观测的结果,揭开黑盒子中的具体结构。已出现的题目有光学黑盒子、电学

黑盒子, 黑盒子内物体的表面未知形貌检测等。

d. APHO 或 IPHO 限定了学生实验必须沿着题目给定的思路进行, 并最终给出标准答案。而 IYPT 在实验上不对方法进行任何限定, 也无任何官方标准解答, 学生通过实践和赛程中的思辨, 探索真理, 着重考量学生的物理思辨能力。

e. APHO 或 IPHO 的题目经常来源于研究热点或前言问题, 大大开拓了学生视野。而 IYPT 的问题经常来自实际生活, 更容易激发学生的实验兴趣。

这两年 APHO 或 IPHO 的题目经常与 IYPT 的类似, 我们甚至可以在 APHO 或 IPHO 的实验装置中找到 IYPT 的题目的最佳实验装置和方案。比如 2013 年 APHO 的实验题目<sup>[3]</sup>: 风能及测量实验中乒乓球风速计: 通过一个乒乓球摆来设计了一个测量风速的实验、利用计算机风扇的产生风洞以及恒温风速仪与恒流风速仪等实验装置, 都对当年 IYPT 题目中的第五题(悬浮空中: 一个乒乓球, 可以被向上的气流所支撑。气流的方向可以倾斜, 然而它仍然可以支撑球。探究气流倾斜的影响, 并优化该系统, 得出在保持球处于稳定状态的情况下, 气流倾斜的最大角度。) 的实验设计有很大启发。2012 年 IPHO 的测水的磁导率实验<sup>[4]</sup>, 给出测量凹液面形状的简易装置和方法, 2012 年 APHO 给出了测量表面摩擦系数的精巧装置。

## 6 结语

APHO 和 IPHO 的实验设计经过出题、试做、各国专家讨论和改进等很多环节, 在物理思维上清晰, 实验设计思路合理并通常是最优化的, 较一般实验题目严谨。所以两个竞赛的题目互相借鉴更有利于学生实验能力的提高。建议 IYPT 的学生将近几年 APHO 和 IPHO 的实验题目作为优秀的实验设计范例来学习。而准备 APHO 和 IPHO 的学生如果能向准备 IYPT 的学生一样, 去分析实验的整体设计方案, 摸清实验各步骤内在的逻辑关系, 则有利于学生快速解题。

### 参考文献:

- [1] 叶沿林. 全国中学生物理竞赛与国际奥林匹克物理竞赛[J]. 物理, 2012, 41(8): 519-523.
- [2] <http://www.iypt.org/Home>.
- [3] <http://apho.phy.ntnu.edu.tw/>.
- [4] <http://ipho.phy.ntnu.edu.tw/>.

## Effect on the Students' Ability in the Experiment of Two Kinds of International Physical Competitions

-- The observer's insight of the 15<sup>th</sup> Asian Physics Olympiad

LIU Li-sa, ZHANG Chun-ling, SONG Feng, LI Cuan-yong  
(School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** The paper compared the two kinds of famous physical competitions for the middle school students: the International Physics Olympiad (or The Asian Physics Olympiad) physicists and the International Young Physicists' Tournament; they are some similarities and differences in the students' experimental ability requirements. The two kinds of competitions focused on the different aspects of the students' experimental ability training. When preparing for one kind of the two competitions, teachers and students can learn from the other' problem in the experimental aspects.

**Key words:** physics competition; physical experiment; ability training

# 信息化时代 PI 教学法创新教育研究

姜东光, 申人升, 李建东, 周 玲

(大连理工大学 物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘 要:** 将创新教育与互联网思维密切结合, 与 PI 教学法、无领导小组讨论等教学手段紧密联系, 是非常必要的。竞赛是体现学生综合素质能力的平台, 更是创新教育的一种导引力量。通过创新实践班教育, 参加全国性物理类竞赛, 摸索出一套切实可行的创新教育模式, 在实践中取得显著效果。这一研究成果对于物理创新教育的发展, 具有一定的参考价值。

**关键词:** 物理竞赛; 导引; 创新教育; 实践;

在当前的信息化时代, 创新教育必然打上互联网思维和互联网生活方式的印记。创新教育是指对人的创新精神、创新能力和创新素质的培养与教育。高等院校在创新人才培养中承担着不可替代的责任。近年来, 我国教育部、财政部先后支持实施了“985 工程”、“211 工程”、“高等学校本科教学质量与教学改革工程”项目。很多高校均大力进行创新教育的研究与实践<sup>[1-6]</sup>。大连理工大学在培养创新人才方面坚持育人为本, 始终把培养具有健全人格的高素质创新型人才作为学校的根本任务, 在人才培养中坚持德育为先、能力为重、全面发展的人才培养理念; 坚持育人以学生为本, 发挥学生在教学中的主体地位, 尊重并发挥教师在教书育人中的主导作用; 努力把学生培养成为社会主义核心价值体系和先进思想文化的捍卫者和引领者, 成为国家政治、经济、科技、文化等领域的开拓者和领导者。

在学校和学院多方政策的激励与支持下, 我院创新班教育已经实行了 6 年有余。虽然学校整体创新班教育取得很大成功, 并在全国范围内引起广泛关注。但是由于物理与光电类创新教育的独特性, 不能照搬机电类或软件类等创新班成功的经验, 而需充分考虑物理学科的基础性与探究性相结合、日常教学与创新教育相结合, 探索一套切实可行的创新教育模式。

竞赛是一个展示的平台, 更是一种导引的力量。我们通过教学内容和教学方法的创新, 以物理竞赛为导引机制多角度地培养创新人才。该模式不仅调动了学生们的主观能动性, 培养了其思维、动手、判断、表达以及合作能力, 还调动青年教师的教学热情与自身修养的提升。该项研究成果对我校创新教育的发展具有很好的参考价值。

## 1 教学内容与教学方法的创新

### 1.1 教学内容的创新

创新班的课程有别于日常班级, 课程安排要有创新, 所以我们根据教师团队的构成和各自学科优势, 结合物理与光电工程学院的科研和教学资源, 为创新班学员安排了如下课程: ①物理学创新案例②物理技术创新案例③物理实验基本技术④物理与光电子专题⑤物理研究与光电综合设计。

以“物理学创新案例”为例, 说明教学内容的优化。

1) 有的放矢, 以点带面。针对日常物理学习中遗留的普遍困惑, 以点带面有针对性地提高学生对物理学的整体理解, 从而显著提高其科学素养。提高学生探究的兴趣, 体会物理学之美。

**资助项目:** 大连理工大学教学改革基金 (MS201281) 资助课题

**作者简介:** 姜东光 (1955-), 男, 江苏赣榆人, 大连理工大学教授, 主要从事理论物理研究和基础物理教学。

2) 以故事为教学内容。以历史故事为教学开端,学习和理解生活中重大物理学进展的背景,如经典力学、电磁学、相对论、热力学统计和量子力学等发展历程,以人物传记的形式,介绍上述研究领域中的重要物理学家在解决问题时的思路、灵感获得以及实验方法。掌握量子物理所代表现代科学的研究方法,以及在当代创新研究工作中的意义。

## 1.2 教学方法的创新

创新班的教学有课堂教学,但更多的是开放讨论式的、自主性的、分工合作式的教学。教学方法的创新体现在:教师的讲授只是一个引子,教师的角色更象是一位朋友、一个问题提出者、一个主持人。在不经意之间,把教学理念、教学经验和重大的物理思想,科学思维的规则和习惯传授给学生,起到了举一反三、画龙点睛的效果。

设置设计性和研究性课题。其中,对于设计性课题,要求学生自行查阅资料、自行写出实验的基本步骤并列出具体的注意事项,经与教师讨论补充后自主进行实验;对于研究性课题,要求学生自主寻找实验测试材料,自主设计实验方案和测试范围。此外还要求学生自行制作PPT讲稿、经教师考核小组主持的答辩,充分讨论后才能够完成。

多年的实践结果表明,通过教学内容和教学方法的创新,不仅能够充分尊重学生的个性化差异,满足学生对于知识的需求,还能切实地激发学生对于物理学的热情、培养其主观能动性以及创造性思维能力,为学生参加物理竞赛并取得理想的成绩,打下了扎实的基础,铺平了道路。

## 2 物理竞赛导引的创新机制

竞赛是综合体现学生教育培养成果的一种形式,是丰富独特的课程安排与组织有力的教学活动的延伸,更是检验日常教学和创新教育能否激发学生的主观能动性、主动创造思维以及学生的创新能力一个平台。与常规物理教学相比较,在竞赛机制的导引下,可以在较短时间内激励学生进行具体的创新实践,并在此过程中培养学生的创新能力。更为重要的是,物理竞赛的类别和形式各不相同,其在普适能力要求的基础上往往对某几项能力的要求更为突出,因此其对学生具体创新能力的锻炼更为有效和更具针对性。另外,物理竞赛的名次排序也是对学生起到正面激励作用。

近几年,我们有选择性地积极参加了全国以及省市级物理类竞赛,并取得了丰硕的成果,在学生中反响强烈。特别是2010年我们组织参加了全国大学生物理实验竞赛;2011年和2012年,组织参加了两届“全国大学生物理学术竞赛”(简称CUPT)。这两项赛事对于拓展创新教学、提升学生创新能力具有十分重要的意义。

### 2.1 物理实验竞赛对大学生基础知识和实验技能的创新能力的导引

1) 赛制简介。全国大学生物理实验竞赛是大学生学科竞赛,该项赛事由教育部高教司(高教司函【2010】13号)批准、高等学校国家级实验教学示范中心联席会主办,全国高校实验物理教学研究会协办。其宗旨是激发大学生对物理实验的兴趣与潜能,培养大学生的创新实践能力,促进高等学校物理实验教学的改革。试题内容涵盖了基础物理实验和近代物理实验中所有的大学物理实验内容,但命题却与学生们所做过的实验完全不同,某些题目甚至是教学科研的探索性题目。

2) 创新能力的导引。该项竞赛对于学生创新能力的导引主要体现为:

a. 基础知识的创新导引。根据赛制要求,学生不仅要熟悉所考察的知识点,而且要对知识点有一定深度的理解。常规的物理教学往往注重知识点的介绍,但是对于竞赛准备而言更为重要的是在理解该知识点的基础上,掌握如何利用其获得某种未知参量的信息,这就激励学生不仅要知其然更要知其所以然。以点带面,举一反三,将简单的物理问题提升到高层次的物理核心上,让学生学会如何用物理的思维去思考。

b. 实验技能的创新导引。虽然辅助实验器材是常规物理教学过程中使用过的,但是学生

所要解决的问题都是全新的,这就需要学生们具有良好的应变处理能力,即要求他们具有敏锐的判断能力和快速的建模能力,在短短几个小时内利用现有的实验手段得到相应的实验结果,并对数据进行合理的分析和准确的处理,最终给出一个完整的实验报告。在创新班中设置了设计性与研究性课题,通过实践创新实现学生实验技能的创新导引,切实地培养了学生创新的实践能力。

通过参加全国大学生物理实验竞赛,我们深刻认识到该项赛事所导引的创新能力的培养,对学生在知识深度掌握和问题应变能力方面具有明显的激励作用。这种以物理实验竞赛为导引的模式,可以突出培养学生的知识积累和问题解决能力。

## 2.2 物理学术竞赛对大学生思维拓展、语言表达以及协同创新能力的导引

1) 赛制简介。全国大学生物理学术竞赛简称 CUPT,是我国借鉴国际青年物理学家竞赛(IYPT)的模式创办的、在全国高校本科学生中开展的学生团体学术赛事。以团队合作的形式研究实际物理问题,以辩论的形式进行比赛。旨在提高学生综合运用所学知识分析解决实际物理问题的能力,培养学生的开放思维能力,交流表达能力和协同创新能力,同时注重加强青年学生之间的友谊。竞赛题目大都来自生活中最为普遍的物理现象,没有确定的研究范围,学生需要综合考虑相关因素,创新地进行相关实验,探究影响因素和形成原因。

2) 创新能力的导引。该项竞赛对于学生创新能力的导引主要体现为:

a.思维拓展的导引。该项赛事的题目源于生活,多数为广为人知的普遍现象。但是其中可变因素多,各因素之间还存在联系,使得命题极具开放性,即没有统一而明确的答案。这就要求学生拓展思维,利用已有的知识采用新办法来创造性的解决问题。我们多次组织教师与学生集体讨论,剖析题目的核心与关键,使学生逐渐养成观察、探索和想象思维的习惯,引导其思维创新性拓展。

b.语言表达的导引。该项赛事的比赛形式为辩论,所以准确而简洁的语言表达至关重要。这需要不仅仅培养学生的语言表达的准确性,同时还要培养其敏锐的洞察力、精简的总结能力以及良好的竞赛面貌。通过多次自由辩论和实战模拟,引导学生的科学素养以及良好的语言表达能力形成,锻炼良好的心理素质。

c.协同创新的导引。该项赛事以团队合作形式来研究具体的物理问题,个人能力的突出表现不能代表团队的情况,只有协同作战才能取得胜利,在此“协同创新”被体现得淋漓尽致。

通过参加全国大学生物理学术竞赛,我们深刻体会到该项赛事所导引的创新能力的培养,对学生在思维拓展、语言表达和协同创新能力方面具有明显的激励作用。特别是经过物理竞赛后的学生,在以后的学习和工作中均有突出的表现。

## 3 总结

在我校“着力提高人才培养质量,着力提升创新能力”的总体要求下,探索具有“大工”特色的人才培养新模式。我院创新班以“创新培养模式、改革教学模式、完善管理模式”为工作重点,通过对创新班教学内容和教学方法的创新,探索出以“物理竞赛为导引的创新教育”模式。该模式切实地提升大学生的科学文化素养,扎实系统的知识结构、能力突出的创新实践、敏锐可观的批判思维、准确生动的表达能力,使学生的知识、能力和素质得到全方位的锻炼。

## 参考文献:

- [1] 赵尚松.近年来“创新教育”研究综述[J].巢湖学院学报,2005,16(6):150-154.
- [2] 杨天怡,胡新平,严薇,袁云松.创新教育与实践教学创新[J].中国高等教育,2005,(23):28-30.
- [3] 马廷奇.产学研合作与创新人才培养[J].中国高等教育,2011,(6):44-46.

- [4] 李洪亮, 李永平, 董岩。地方本科院校大学生创新教育的实践与探索[J]。运城学院学报, 2012, 30(1): 85-88。
- [5] 张树国。高等院校大学生创新教育研究与实践初探[J]。华中师范大学学报(人文社会科学版), 2012, (1): 168-170。
- [6] 张友琴, 王萍, 朱昌平, 朱晖。以大学生创新性实验计划为契机培养创新型人才[J]。实验技术与管理, 2011, 28(7): 167-170, 212。

# 近代物理实验课开展研究性实验的探索与实践

钱建强, 张高龙, 郝维昌, 崔益民, 蔡微, 李华  
(北京航空航天大学物理实验教学中心, 北京 100191)

**摘要:** 根据实验室现有条件和资源, 在近代物理实验课中进行了研究性实验教学改革, 通过开展自主扩展实验、初步实验研究、课题型研究实验、自主设计实验等方面的建设, 建立起初级和高级 2 个层次、研究型实验和设计型实验 2 种模式的促进复合拔尖人才培养的研究性教学体系。同时, 加强实验室开放性建设, 注重教学研究和教学方法与国际接轨, 取得了预期的效果。

**关键词:** 研究性实验; 创新能力; 拔尖人才培养

## 1 前言

如何激发学生的创新欲望, 培养学生科学的思维方法和创新能力是目前每一位实验教师无法回避的问题。研究性学习模式的引入, 为解决这一问题提供了一条有效的途径。研究性学习模式是以探索和研究为基础的学习模式, 它始终把培养学生的独立思考、独立分析、独立判断的研究能力和创新能力放在首位, 注重学生的知识、能力、素质全面发展<sup>[1,2]</sup>。近代物理实验是物理类高年级学生的一门重要基础课, 涉及的物理知识面广, 综合性和技术性强。在近代物理实验中, 加强研究性实验建设, 对培养大学生的实践能力和创新能力有着不可替代的作用, 是大学生实践教学中的重要环节。研究性实验不同于基本实验, 要根据学生的具体情况而定。近几年, 我们根据自己近代物理实验室的特点, 通过开展自主扩展实验、初步实验研究、课题型研究性实验、自主设计型实验等方面的建设, 建立起初级和高级 2 个层次、研究型实验和设计型实验 2 种模式的研究性教学体系。同时, 为了保证研究性教学体系的顺利实施, 加强了近代物理实验室的开放性建设, 并注重教学研究和教学方法与国际接轨, 拓展学生学术视野, 促进拔尖人才培养。

## 2 分层次、多模式研究性实验建设

为了使不同能力和特点的学生都能得到科研素质和科研创新能力的培养锻炼, 研究探索适合不同层次学生的研究性实验内容, 确立相应的研究性实验题目。为适应学生的兴趣和将来的职业规划, 将研究性实验分为研究型实验和设计型实验 2 种模式。为适合不同层次学生的需要, 将研究性实验分为初级和高级 2 个层次。要求同学在完成一定数量基本实验的基础上, 对部分实验内容进行扩展或者对实验内容进行深入研究; 鼓励优秀拔尖同学选做研究型实验和自主设计型实验, 鼓励他们参与教师的科研课题研究, 申请全国大创项目和 SRTP 项目, 并尽可能把成果转化为实验教学内容和教学设备。根据选做的题目, 鼓励学生参加全国的“挑战杯”和学校的“冯如杯”比赛。

我们结合实验室的条件和学生的学习能力与特点, 将研究性实验分为初级和高级 2 个层次、研究型实验和设计型实验 2 种模式, 具体为自主扩展实验、初步实验研究、课题型研究实验、自主设计实验等 4 种方式。

### 2.1 根据现有条件, 开展自主扩展实验

在实验室现有条件下, 让学生利用实验室的仪器设备, 在现有基本实验的基础上, 通过查阅资料、调研, 自己设计实验方案, 增配一些简单器材, 自主扩展开发新的实验内容。近

**资助项目:** 北京航空航天大学重点教改项目



代物理实验中,有不少可以扩展实验内容的基本实验,如:光磁共振、单色仪、拉曼光谱、锁相放大检测、放射性实验等。其中单色仪实验,通过增配简单器件,可以扩展进行辐射温度测量、比色测温、浓度测量、透过率测量等实验内容。

在做光磁共振实验时,张仕超等3名同学对紫外光探测产生了兴趣,随后在任课老师的指导下扩展实验内容,研制了小型紫外线指数探测器,参加当年北航“冯如杯”比赛获三等奖。孟显奎同学利用实验室已有的 $^{60}\text{Co}$ 放射源和NaI闪烁谱仪,采购加工了一些铅、铜、铁和铝吸收片后,扩展 $\gamma$ 射线吸收实验,完成实验设计,得到了很好的实验结果,论文发表在《大学物理实验》上<sup>[3]</sup>。

## 2.2 依据现有仪器,开展初步实验研究

近代物理实验室的扫描隧道显微镜原子力显微镜,拉曼光谱仪,分光光度计,锁相检测放大器等设备仪器,比较适合学生开展初步实验研究。学生依据现有的实验仪器,根据感兴趣的内容,在教师指导下,可自主开展一些实验研究。同时,我们依据近代物理实验室现有的仪器设备,给出了20多个研究性实验题目,学生可自己选择感兴趣的研究题目,在任课教师指导下,进行研究性实验。如验证计数率与距离平方反比实验、 $\gamma$ 射线的屏蔽和测厚、利用双光栅莫尔条纹进行转角及位移测量研究、“水”样品中三氯化铁浓度对共振信号的影响研究、在多晶金属箔和粉末样品上进行X射线衍射分析研究、用C-V法如何测量非突变p-n结的杂质浓度的分布等研究型实验内容。

通过这些锻炼,培养学生的创新意识和初步的科学研究能力。郭晨雷同学的论文“验证辐射强度与距离平方反比率的实验”,发表在《大学物理实验》<sup>[4]</sup>。赵宇、贾越辉同学的论文“pH对TiO<sub>2</sub>光催化降解罗丹明B的影响”发表在《大学化学》<sup>[5]</sup>。

## 2.3 通过课题型实验,促进拔尖人才培养

教师通过将现代科学的热点领域、自己的科研课题与近代物理实验相结合,给出课题型的研究型实验题目,让成绩突出的学生选作,扩展加深近代物理实验内容,让学生了解探索一些最新的科学前沿与进展。尝试将近代物理实验室建成高年级大学生进行大创项目和SRTP以及课外研究的主要实验场所。要求同学根据近代物理实验知识和技能,结合实验室的仪器设备以及老师的科研课题,在任课教师的指导下申报大创项目和SRTP项目,对相关物理内容和实验方法进行深层次的探索和研究。采用这种方式促进拔尖人才培养。

几年来,本科学子积极申报参与各项科研创新项目,共获得国家级大创项目和SRTP项目10项、校级SRTP资助项目20多项。李小凤、蒋莎茹同学在开展国家级SRTP项目期间,在物理类核心期刊“大学物理”上发表2篇论文<sup>[6,7]</sup>,并参与发表1篇SCI论文。张远鹏、郭晨雷等同学,选做了任课老师结合自己的科研课题给出的研究性实验题目,由于工作出色,实验结果整理成论文后,发表在SCI收录学术期刊上,开创了物理学院以本科生为第一作者发表SCI论文的先例<sup>[8,9]</sup>。

## 2.4 开展自主设计实验,促进复合人才培养

这种方式属于高级研究性实验模式,目的在于促进复合人才培养,对学生的综合素质、多学科知识水平、实验能力要求很高。主要是要求学生根据自己所学的理论知识和实验技能,提出自己的观点,和任课教师进行讨论,自主设计新的实验,完成实验装置研制。也可以此申报国家及北京市级SRTP项目。

张亚星同学学习了原子核物理课程后,在近代物理实验课上用磁谱仪测量原子核衰变的粒子时,提出了此装置是否可以开展原子核 $\beta$ 衰变的研究实验。在老师的帮助下自己设计了实验,得出了原子核的自旋和宇称,实验数据和理论结果符合得很好,论文发表在《大学物理》杂志上。该同学后来被美国石溪分校的核物理专业录取。王玮彬同学掌握了闪烁探测器的基本工作原理后,利用核辐射实验室已有的塑料闪烁体和光电倍增管,制作核辐射探测器,获得“冯如杯”二等奖,成果发表在《大学物理》和《大学物理实验》上,该同学已被保送到

清华大学直接攻读博士。

### 3 实验室开放建设及教学方法的国际化

实验室开放是研究性实验教学实施的基础和前提，研究了实验室开放的程度和范围，建立了相关的规章制度，保证开放性的切实可行以及可持续性。目前近代物理实验室面向全校学生开放，各年级学生均可在此开展 SRTP 项目、“冯如杯”项目的研发，也可以进行科学研究探索，孵化学生的创新灵感和火花。

近代物理实验室邀请“千人计划”学者谷畑勇夫教授定期开展核物理实验课教学活动，指导学生的研究性实验。并与日本大阪大学合作开展了开放日活动，中日教师共同探讨近代物理实验教学方法和教学思想，加深双方的合作与学生的交流，为学生开辟国际交流的平台与渠道，提高学生研究性实验的水平和国际化视野。实验室也安排本科生前往日本大阪大学、日本理化学研究所等进行学习，通过交往，提高学生知识运用能力、国际化交流能力，促进拔尖人才培养。

### 4 结论

我们的研究性教学改革及成果受到了国内外同行的关注，先后接待了巴基斯坦科学教育委员会官员、诺贝尔物理奖获得者谢尔登·格拉肖教授、日本谷畑勇夫教授的参观，他们对北航近代物理实验室的建设和教学模式给予了较高评价。通过在近几届学生中开展分层次、多模式研究性实验探索实践，本科学生获得国家级大创项目和 SRTP 项目资助 10 项，以本科学生为主发表 SCI 论文 7 篇，在大学物理、物理实验等中文核心期刊上发表教学研究论文 20 余篇，5 人次获得北京市大学生物理实验竞赛一等奖。

#### 参考文献：

- [1] Maestre J W, Gerace R Defresne, W Leonard. Turning passive lectures into interactive learning environments with a classroom communication system [J]. AAPT Announcer, 1994,24(4): 63.
- [2] Brunstein R, L Lederman. Interactive lectures: keeping students Involved in a lecture course [J]. AAPT Announcer, 1995, 25(2): 80.
- [3] 裴朝, 张高龙, 孟显奎. 伽马射线吸收系数测量方法的研究[J]. 大学物理实验, 2010, 23(4): 20-23.
- [4] 郭晨雷, 任赫, 陶韬, 等. 验证辐射强度与距离平方反比率的实验[J]. 大学物理实验, 2011, 24(1): 35-37.
- [5] 赵宇, 贾越辉, 李阳, 郝维昌, 钱建强. pH 对 TiO<sub>2</sub> 光催化降解罗丹明 B 的影响[J]. 大学化学, 2011, 26(5): 54-56.
- [6] 李小凤, 蒋沙汝, 钱建强, 等. 幅度调制原子力显微镜仿真平台[J]. 大学物理, 2011, 30(7): 51-55.
- [7] 蒋沙汝, 李小凤, 李英姿, 钱建强, 李渊. 基于压电陶瓷迟滞特性模型的原子力显微镜仿真平台研究[J]. 大学物理, 2012, 31(1): 58-61.
- [8] Guo Chenlei, Zhang Gaolong, I. Tanihata, et al. Simulation of 12C+12C elastic scattering at high energy by using the Monte Carlo method [J], Chin. Phys. C, 2012, 3(36): 205-209
- [9] Zhang Y, Liu W, Wang R. From ZnS nanoparticles, nanobelts, to nanotetrapods: the ethylenediamine modulated anisotropic growth of ZnS nanostructures [J]. Nanoscale, 2012, 4(7): 2394-2399.

# 医学类专业物理实验课程分层次教学效果的调研与探讨

冀敏, 苏卫锋, 姚红英, 岑 剌, 张新夷, 马世红, 孙利军  
(复旦大学 物理系, 复旦大学上海医学院, 上海 200433)

**摘 要:** 为探讨医学类专业物理实验课分层次教学的可行性和教学效果, 作者针对本校 09、10、11、12 年级的 180 名临床医学学生进行了问卷调查, 并对回收的问卷分试验组和对照组进行统计学处理。结果表明: ①试验组和对照组关于我校物理实验分层次教学的可行性认识无显著差异; ②试验组和对照组关于物理实验分层次教学的教学效果无显著差异。结论: 物理实验课程分层次教学模式适用于我校的临床医学专业。

**关键词:** 医学类专业; 物理实验; 分层次教学; 医学物理实验

## 1 引言

我校从 09 年开始, 针对临床医学八年制、五年制中的部分学生进行了物理实验的分层次教学改革的试验, 即把临床医学专业的物理实验课程分为两个教学层次, 即“基础物理实验”和“医学物理实验”两个教学层次。现行教学中, 基础物理实验为必修课, 医学物理实验为专业选修课。基础物理实验的教学内容同理工科, 共开设包括力学、热学、电磁学、光学、近代物理等方面的实验 18 个。医学物理实验的教学内容分四个模块, 共开设 9 个必做和 6 个选做实验, 四个模块分别为: 生物物理量产生与测量; 医学影像物理基础与实验; 生物材料物理参数测量; 设计性研究性医学物理实验<sup>[1]</sup>。经过 4 年的教学实践, 学生对分层次教学模式是否认同、对两个教学层次的教学内容与方法以及对后续医学课程的帮助情况、对学生动手能力和交叉创新思维的培养效果如何? 为探讨这些问题, 我们进行了问卷调查和研究分析。

## 2 研究对象

研究对象分试验组和对照组。两组对象均为我校 09-12 级的临床医学专业学生, 其中试验组为参与分层次教学的学生共 80 名, 回收问卷 72 份。对照组为没有参与分层次教学的学生共 80 名, 回收问卷 65 份。

## 3 研究内容和方法

针对医学类专业物理实验分层次教学的可行性研究, 调查问卷设定了三个问题, 即课程性质、所适用专业、基础物理实验和医学物理实验的教学内容的科学性; 针对分层次教学的教学效果研究设定了两个问题, 即对后续医学课程学习的帮助程度、对提高动手能力和交叉创新能力的影响。所有问卷后面都附有医学物理实验的教学内容。问卷随机发放, 纸质发放 140 份, 网络发放 40 份。回收 137 份, 其中试验组 72 份, 对照组 65 份。对回收的问卷进行统计学处理, 根据统计结果分析物理实验分层次教学的可行性和教学效果。

## 4 研究结果

### 4.1 反映分层次教学可行性的三个问题的统计结果

反映分层次教学可行性的三个问题的统计结果见表 1。①适合分层次教学的专业为临床医学的(五年制和八年制): 试验组为 63 人, 对照组为 53 人; ②认为当前分层次教学内容合适的: 试验组为 65 人, 对照组为 52 人; ③关于课程性质, 认为医学物理实验为专业选修课比较合理的: 试验组为 68 人, 对照组为 56 人。以上数据经统计学处理,  $P > 0.05$ , 说明

两组学生无显著差异。可以推知，学生无论是否参与分层次教学的教学试验，绝大多数学生是支持临床医学专业的物理实验进行分层次教学的，因此可以得出结论，物理实验分层次教学模式适合临床医学专业，分层次教学模式、教学内容、课程性质是切实可行的。

表 1 分层次教学可行性统计结果

问题	调查结果			
	试验组（参与人数：72 人）		对照组（参与人数：65 人）	
	人数	百分比	人数	百分比
1、适合分层次教学的专业为临床医学（五年制和八年制）	63	88%	53	82%
2、认为当前分层次教学内容合适	65	90%	52	80%
3、关于课程性质，认为医学物理实验为专业选修课比较合理	68	94%	56	86%
P>0.05，说明两组的认识无显著差异				

表 2 分层次教学效果统计结果

问题	调查结果			
	试验组（参与人数：72 人）		对照组（参与人数：65 人）	
	人数	百分比	人数	百分比
1、关于分层次教学对后续课程的帮助：认为对生理学、诊断学、医学影像学、基础医学实验有帮助	66	92%	58	88%
2、关于分层次教学对学生能力的培养：认为能进一步提高动手能力、物理知识运用能力、交叉创新能力	57	81%	52	80%
P>0.05，说明两组的认识无显著差异				

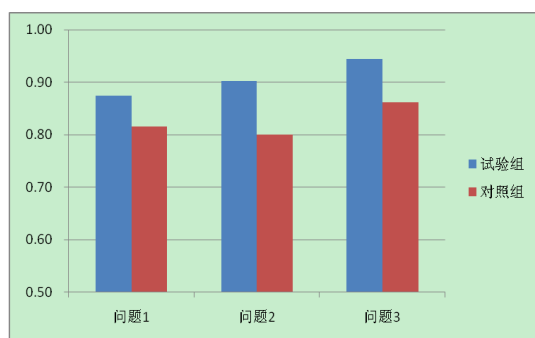


图 1 分层次教学可行性统计结果

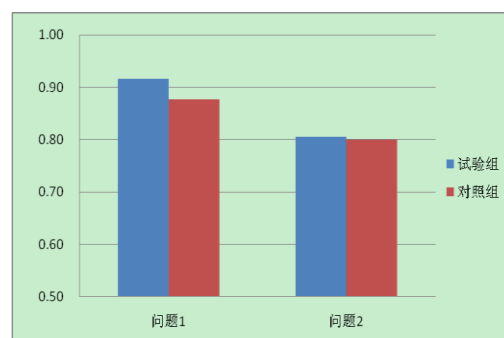


图 2 分层次教学效果统计结果

#### 4.2 能反映分层次教学效果的两项内容的统计结果

能反映分层次教学效果的两项内容的统计结果见表 2。①关于分层次教学对后续课程的帮助：认为对生理学、诊断学、医学影像学、基础医学实验有帮助的，试验组为 66 人，对照组为 57 人；②关于分层次教学对学生能力的培养：认为能进一步提高动手能力、物理知识运用能力、交叉创新能力的，试验组为 58 人，对照组为 52 人；以上数据经统计学处理，

$P > 0.05$ , 说明两组的认识无显著差异。由此推知, 物理实验分层次教学对后续相关医学课程有帮助, 能进一步提高医学生的动手能力、物理知识运用能力、交叉创新能力。

## 5 研究结论

研究表明, 物理实验分层次教学是适用于临床医学专业的, 分层次教学模式、教学内容、课程性质是切实可行的; 分层次教学的教学效果是显著的, 令人满意的, 达到了研究的预期目的。

## 6 讨论

### 6.1 医学类专业物理实验分层次教学的必要性

由研究结果可以看出, 无论试验组还是对照组, 他们对医学类专业物理实验分层次教学模式的可行性认识基本一致。这是因为, 二十世纪以来, 特别是进入二十一世纪前后二十年, 医学科技的飞速发展令人目不暇接, 而这些高科技的诊疗技术无一例不是伴随着物理学理论和物理学新技术的出现而诞生, X 射线被发现后, 即刻出现了放射诊断技术, 使人们的五脏六腑变得“透明”起来, 一百年来, 这门技术不断发展, 特别是计算机技术与 X 射线探测技术及治疗技术的结合, 不仅能即时看到体内脏器、“捉住”肿瘤, 而且能像“刀”一样, 准确地把肿瘤割掉。此类例子举不胜举, 又如, 超声诊疗技术、核物理诊疗技术、核磁共振成像技术、物理康复治疗等等, 已占医疗手段的半壁江山。疑难疾病的诊断和治疗目前已依赖于相关的物理诊疗技术, 人们已经习惯了接受物理诊断和物理治疗手段<sup>[2]</sup>。医学专业的教科书中, 物理学方法、技术、手段已渗透其中, 在中学生的科技读物中, 物理学在医学中应用的内容也常有介绍, 也常见各种媒体对新医疗技术的报道。因此, 当代医学生对比较系统地学习和掌握与诊疗技术相关的物理实验即“医学物理实验”是具有充分认识的。把临床医学专业的物理实验分为“基础物理实验”和“医学物理实验”两个教学层次后, 弥补了教学内容缺少学科交叉知识和医学应用部分的不足。通过两门实验课的学习, 医学生不仅打好物理学技术基础, 而且比较系统地学习了常用物理诊、疗技术和方法。

### 6.2 物理实验分层次教学内容的科学性

对两个层次教学内容的设计, 一方面考虑了现代医疗和医学研究手段所涉及的常见物理量的测量方法和技术手段, 如传感器原理和技术、数据采集技术、显示技术等, 即把相关内容溶入物理实验教学之中; 另一方面, 在医学物理实验的设计上, 充分体现医学应用的特点, 实验模块的划分参考临床物理诊断和物理治疗的分类, 把人体自身物理量的产生和测量作为一个模块, 把各种物理量作用于人体、根据采集物理量及分析相互作用信息进行疾病诊断的作为一个模块, 通过这样归类, 学生很自然的就掌握了应用于临床的两大类诊断仪器的特点和测量方法, 因此受到参与问卷的学生的好评和认可。

### 6.3 分层次教学对学习后续课程的帮助

研究结果表明, 关于分层次教学对学习后续课程的帮助问题, 试验组与对照组无显著差异, 试验组多数学生认为, 医学物理实验这一教学层次对他们后续的“生理学”、“医学影像学”、“诊断学”有较大帮助。作者分析, 学生的认识是符合客观实际的。首先, 在生理学<sup>[3]</sup>的十二章内容中, 有七章内容涉及物理学或医学物理学; 在医学影像学<sup>[4]</sup>的十章内容中, 每章内容都涉及医学物理学知识; 在诊断学中, 物理诊断方法几乎占到了一半。此外, 我们在课程内容设计上充分考虑了以上三门课程所必需的医学物理基础知识。因此, 参与物理实验的分层次教学的试验组同学在学习上会有深刻体会。试验组同学虽无参与医学物理教学, 但根据发放的教学内容材料不难判断对后续课程的帮助程度。因此, 增加医学物理实验这一层次的教学, 能帮助学生理解某些重要概念、掌握物理技术手段在医学学科中的应用, 有助于打好扎实的医学基础。教学效果是显而易见的。

#### 6.4 学科交叉的教学内容对培养学生创新能力的帮助

关于分层次教学能进一步提高交叉创新能力的问题，试验组与对照组无显著差异。这是因为，试验组同学参与了第二层次的教学，而对照组同学虽无参与，但医学物理实验室的定期开放吸引了不少临床医学的同学前来参观和观摩实验演示。第二层次实验在设计上突出了物理与医学实际相结合的方法和思路，在教学上重视引导学生寻找学科交叉创新的结合点，特别是所开设的自主创新实验项目更是对医学生的交叉创新能力的培养提供了正能量。医学物理实验为学生搭建了一个把物理学及其技术应用于医学诊断和治疗的学习平台，学生的创新成果是这个问题的最好解释。2009年以来，学生自主研究和参与研究的医学物理项目有9项，如周晨同学参与X射线透视及CT成像物理实验的教学开发<sup>[5]</sup>，黄青等同学参与了肺呼吸物理模型测量肺顺应性的教学实验开发<sup>[6]</sup>，袁翔同学关于“听阈曲线测试的教学软件”获得国家专利，艾平等同学“基于移动终端的听阈测试软件”获全国大学生“挑战杯”科技创新三等奖，姜畅等同学的血液循环实验模型研制获校级优秀项目，……。

#### 7 结束语

临床医学专业物理实验分层次教学模式的进一步构想：根据对学生的调研结果和结论以及此前对临床医生的相关调研结果，可知我校针对临床医学专业进行的物理实验分层次教学的研究和探索是符合当代医学教学改革需要的，教学模式有一定推广应用价值。我校虽然在医学生物理实验分层次教学方面经过了多年<sup>[7]</sup>的探索，但在实验室建设和教材建设方面还需要进一步完善，有些问题还需要进一步探讨。

#### 参考文献：

- [1] 冀敏，张新夷，苏卫锋，等。医学类专业物理实验分层次教学的探索与实践[A]。第12届物理实验教学研讨会论文集（上册）[C]，2012：213~216。
- [2] 王磊，冀敏。医学物理学[M]。北京：人民卫生出版社，2013：1~3。
- [3] 朱大年。生理学[M]。北京：人民卫生出版社，2008：9~329。
- [4] 白人驹，徐克。医学影像学[M]。北京：人民卫生出版社，2013：3~350。
- [5] 苏卫锋，冀敏。X射线透视及CT成像物理实验的教学开发与探讨[J]。物理实验，2012（增刊）：57—59。
- [6] 冀敏，苏卫锋，李爱萍，等。肺呼吸物理模型测量肺顺应性的教学实验[J]。物理实验，2014，34（1）：22~24。
- [7] 陆申龙，马世红，冀敏。医学类物理实验课教学改革的探索与实践[J]。物理实验，2005，25（12）：20~22。

### Research and discussion on the level-differentiated teaching effects of physics experiment for students majoring in medicine

Ji Min, Su Wei-feng, Yao Hong-ying, Cen Yan, Zhang Xin-yi, Ma Shi-hong, Sun Li-jun  
(Physics Department, Fudan University, 200433; Medical College, Fudan University, 200433)

**Abstracts:** In order investigate the feasibility and teaching effect of physics experiment for medical students, 180 medical students from grade 2009, 2010, 2011 and 2012 were investigated by questionnaire, and the obtained data were analyzed statistically. The results show that the level-differentiated teaching in physics experiment course is applicable to clinical medicine.

**Key words:** medical specialty; physics experiment; level-differentiated teaching; medical physics experiment

# 物理实验教学内容、方法和手段的深化改革

秦颖, 周玲, 姜东光, 李建东

(大连理工大学 物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 本文介绍了本校物理实验教学内容、方法和手段深化改革的具体措施和目标, 通过营造适合信息时代特点的物理实验学习环境, 采用多形式个性化人才培养模式, 培养学生的自主学习能力、实践能力和创新能力。

**关键词:** 物理实验; 自主学习; 信息化; 创新

## 1 引言

通过国家级实验教学示范中心的建设, 大连理工大学物理实验中心对大学物理实验课程体系、实验项目的设置、教学内容、教学方法和方式、考核方式、教学手段等进行了一系列的综合改革<sup>[1-3]</sup>。以培养基础扎实、适应性强, 具有实践能力、竞争能力和创新能力的优秀人才为目标, 建立了分层次立体化的实验教学体系, 解决了多层次学生对教学资源的多层次需求的问题; 采用开放自主研究的教学模式, 培养学生的创新意识和创新能力<sup>[4-7]</sup>。实践教学体系是提升学生能力的主要载体, 它涉及到实践教学内容、教学方法和手段等方方面面的内容。为了适应 21 世纪教育研究的信息时代特点, 需要将信息技术与理工科基础物理实验课程有机地整合, 充分优化和整合实验教学中心的实验教学资源, 拓展教学的时间和空间, 为学生提供自主学习和师生交流的平台; 加强现代化教学信息管理, 以满足学生个性化教育和全面提高学生科学实验素质的需要, 从而达到培养学生创新精神与实践能力的目标, 使物理实验教学质量大幅度提高, 为学生的可持续发展打下坚实的基础。

## 2 打造现代化、可自主实验化、适合信息时代特点的物理实验学习环境

对大学物理实验项目进行系统性调整, 配合新仪器的购进, 整合和优化物理实验资源, 充分发挥仪器潜在的价值。建设信息化、现代化可供多数学生自主实验的实验室, 让动手能力差的学生从认识实验仪器开始, 直到熟练使用仪器, 培养学生的动手能力和自信心; 构建面向优秀学生的自主实验平台, 将综合性、设计性和开放性融为一体, 以科研小课题的形式来进行实验, 培养学生的自主研学能力。为此, 我们需要打造现代化、可自主实验化、适合信息时代特点的物理实验学习环境, 激发实验技能稍差同学的实验兴趣, 同时让已经具备较好实验知识的同学能够在此环境中有所发现, 有所创新。扩展其实验内涵, 增加实验仪器的套数, 配合教学录像片, 为全校学生提供自主学习和面向个性化教育的实验实验室, 延长开放时间, 扩大开放空间, 满足不同层次的学生对教学资源多层次需求的问题, 为学生的创新能力培养提供基础保障。

## 3 构建多种教学形式相结合的创新研究教学平台

### 3.1 培养学生实验兴趣的自主学习教学平台

随着教学内容的更新和网络化的教学及管理模式的建立, 培养动手能力差的学生的实验兴趣, 通过自主开放和网络化的教学方式, 营造自主学习的氛围, 培养他们独立动手完成物

---

**作者简介:** 秦颖(1964-), 女, 吉林白山人, 大连理工大学物理与光电工程学院副教授, 博士, 从事物理实验教学与凝聚态物理研究。

理实验的信心，变被动的学习方式为主主动探究的学习方式，为众多学生的课外自主研学提供场所。自主训练实验室，以常规工具使用、常用实验方法训练为主，实验项目大多是过去淘汰的实验，报废又可惜，留给高中没有受过训练或基础比较差的同学自主练习。这类实验包括单摆实验、长度综合测量、伏安法测电阻、电表的改装与校准、固体密度的测量等十几种实验，学生可以随时到实验室进行自主训练。

### 3.2 培养学生创新意识的实验教学平台

选择有利于培养学生实验动手的实验，扩展其实验内涵，为全校学生的“自主学习和面向个性化教育”提供必要的条件。安装门禁系统，延长开放时间，实验内容从易到难，满足不同层次的学生对教学资源多层次需求的问题，为学生的创新能力培养提供基础保障。这类实验在物理基础知识、实验基本原理上，学生稍加努力完全可以掌握，但又能巧妙地将设计性、研究性、综合性的教学内容有机融合在一起，为全校理工科学生提供开放性、自主研究学习的实践环境。

用超声光栅测定液体中声速的专题研究实验室：近年来，随着激光技术的发展，声光相互作用又重新引起人们的注意，超声光栅已成为控制光的强度、传播方向等的实用方法之一，并得到日益广泛的应用。这个实验原理涉及声学 and 光学，又有实际应用，实验操作调节复杂，有利于培养学生的动手能力。利用现代化的教学手段，改变授课方式，请优秀的教师将仪器的调节要求和注意事项以及操作讲解事先录制好，学生可以根据需要随时观看录像来学习，学生有问题可以和教师讨论，这样可以节省人力，给学生更多自主训练的空间。

分光计调节与使用系列自主研究实验室：分光计的调节思想、方法和技巧在光学实验中具有一定的代表性，但是这一实验难度较大，学生通过一次实验较难掌握，为了学生更好地掌握分光计的调节和使用，我们希望增加课时让学生在测量了介质折射率的基础上，再利用分光计测量光栅常数，这既强化了学生对分光计的掌握同时也拓展了知识面。为了进一步挖掘仪器的潜力，拓展学生的知识面，我们又将近代物理实验内容——氢原子光谱及里德堡常数的测量加入该系列实验，只需加一个氢灯就扩展了实验的研究内容，大大节省了实验教学资源。我们选择最优秀的教师为学生讲第一课分光计的构造与调节，学生在熟练了仪器使用的基础上，可以随时自主进入实验室完成其它的系列实验研究。这不仅节省了优质教师资源，而且充分利用仪器的使用率，节省教学资源。

创新实验教学平台的建设，为全校理工科学生提供开放性、研究性学习的实践环境。鼓励学生把学习与研究结合起来，培养学生的科学思维和创新意识，使学生掌握实验研究的基本方法，提高学生综合运用知识的能力。

### 3.3 培养学生研学兴趣的实验教学平台

课题实验进一步凝炼了实验的教学内容，不断地研究设计新的课题实验，将原有部分适合于大面积学生的课题实验项目下放到基础实验必修课的小课题中，开放给全体学生自由选做。这些实验大多来自中心的研究性、设计性的实验题目（几十个项目），学生比较感兴趣的包括 X 射线测试仪及材料性能研究，光学相干层析实验研究，半导体致冷及佩尔捷效应研究，液晶制作与电光效应实验研究等。课题实验不断引入先进的实验技术和实验方法，注重培养学生从事科学研究工作的素养。学生可自带课题或选择课程提供的科研小课题，在时间、空间全面开放的实验室环境中（必要时可以提供资金用于学生设计实验所必须的设备添置），对课题进行较为深入的研究，期末撰写课题研究论文并以小组为单位进行答辩，也培养了学生团队协作的精神。课题实验给学生提供了开放自主的研学环境，锻炼了学生选题、研究分析、探索创新、总结归纳及论文的撰写和宣讲能力，并且通过适时组织多种形式的讨论课，对学生的研学给以切实引导，培养了学生的研学兴趣。



## 4 多形式的个性化人才培养模式提升学生的创新能力

### 4.1 自主开放性实验班, 培养学生创新能力

招收动手能力强并且有创新意愿的学生, 自主选择实验题目, 自愿组成实验小组, 通过调研、小组设计讨论实验方案, 指导教师启发和学生组内讨论相结合的研究创新学习模式, 最后以小组为单位进行答辩。真正实现以“教”为中心的教学模式向以突出教师主导作用和学生主体作用的“双主”教学模式的转变, 教师的任务而更重要的是引导学生如何学习利用各种学习资源, 变封闭的、被动的、接受式的学习方式为开放的、主动的、探究式的学习方式。通过这样的环节培养学生的创新能力、与他人沟通与合作的交流能力和社会适应能力。

### 4.2 物理实验强化班, 为拔尖人才的培养打基础

招收学习成绩优秀对物理实验充满好奇心的学生, 选择优秀的教师, 安排一些综合性、研究性的实验题目, 每次实验课指定学生来讲解相关实验原理、提出实验方案, 其他学生提出问题, 互相讨论, 优秀的教师参与点评和指导的实验教学模式。这种教学模式, 活跃了课堂, 开阔了学生的思路, 真正体现了学生的主体学习地位, 教师是学生学习的促进者, 实现了高层次学生的个性化培养, 有利于培养学生独立思考, 发现问题和解决问题的能力, 培养学生良好的信息素养, 为精英人才的培养打下坚实基础。在这样的训练过程中, 大大学生提升了学生独立解决问题的能力, 包括对选题的理解, 到具体的需要哪些实验器材, 如何实现所设计的实验方案等, 学生倾其所能, 努力做到最好, 学生觉得这样的训练培养了他们的综合能力, 收获非常大, 积极性很高。经过跟踪调查, 这些学生在今后的各项竞赛中都是主力军, 也都取得了可喜的成绩。

### 4.3 选择优秀的学生, 培养学生从事科学研究的基本能力

在实验教学过程中发现优秀的学生, 教师进一步引导学生从事更深层次的研究, 教师可以把教学中发现和需要解决的问题交给学生, 也可以作为大学生创新训练项目的题目。学生通过调研和深入研究, 拓展实验内涵, 进一步发掘学生自主学习和研究的潜能, 要求教师在平时实验的指导过程中注重对学生的启发和引导, 鼓励学生撰写研究论文, 并对学生的论文撰写给予指导, 切实提高学生从事科学研究所必需的总结、归纳以及撰写和宣读论文的能力。这种教学模式不仅使学生在实验探究的过程中获得知识, 获得继续学习的能力和解决问题的策略, 而且有利于培养学生从事科学研究的基本能力。

## 5 结束语

以学校促进实验室信息化建设经费的投入为契机, 构建课内实验与课外创新相结合的大学生实践教学与自主研学的学习平台, 进一步实现实验教学内容的呈现方式、学生的学习方式、教师的教学方式和师生互动方式的变革。通过多种形式、多种渠道相结合的研究创新平台建设, 将大面积学生的自主研学延伸到了课堂内外、实验室内外、图书馆和科研实验室, 以适应不同学生的需求。让学生真正成为学习的主体, 教师的任务不仅是教学生学习知识, 而更重要的是引导学生如何学习利用各种学习资源, 变封闭、被动、接受式的学习方式为开放、主动、探究式的学习方式; 注重高层次学生的多形式个性化培养; 为学生创造一个适合信息时代特点的实验学习环境, 实现课前、课堂、课后三位一体的“自主学习和面向个性化教育”的教学人才培养新模式。建设信息化、现代化可供全校本科生自主实验的研究室, 进一步延长开放时间, 扩大开放空间, 为学生的自主实验研究提供方便。

### 参考文献:

- [1] 周玲, 姜东光. 深化实验教学改革 打造特色鲜明的实验教学中心[M]. 实验室研究与探索[J], 2013, 32(8): 114-116.

- [2] 秦颖, 余虹, 姜东光. 依托物理实验, 探索大学生创新能力的培养模式[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2012, 33: 21-22.
- [3] 秦颖, 王艳辉, 李建东, 姜东光, 周玲. 物理实验教学方法的研究与实践[J]. 物理与工程, 2013(增刊) 238-239.
- [4] 姜东光, 申人升, 李建东. 基于物理竞赛的创新教育研究与实践[J]. 大连理工大学学报, 社会科学版, 2012, 33: 79-81.
- [5] 张瑞斌, 秦颖, 李敬安, 黄晓明, 赖优. 用于指导交流电桥实验调零的矢量数学模型[J]. 物理实验, 2010, 30(6): 42-45.
- [6] 张天洋, 王艳辉, 邹德滨, 曲光伟. 空气阻力对复摆振动周期的影响[J]. 物理实验, 2008, 28(11): 42-45.
- [7] 曲光伟, 王艳辉, 邹德滨, 张天洋. 复摆运动状态的研究[J]. 物理与工程, 2009, 19(5): 13-15.

## Reform on teaching contents, methods, and facilities of physical experiments

QIN Ying, ZHOU Ling, JIANG Dong-guang, LI Jian-dong

(School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology,  
Dalian 116024, China)

**Abstract:** The present paper introduces the concrete measures and objectives for of the physical experiment teaching contents, methods, and facilities of our university. The learning environment of the physical experiments is enforced to meet the information technology progress of the present day. The capabilities of self-learning, practice and creativity are cultivated by adopting multi-form individual modes.

**Key words:** physical experiments; self-learning; information technologies; creativity

## 构建物理实验创新实践平台的探索

李 晔, 王翠香, 李 磊, 苗 征

(空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051)

**摘 要:** 在近十年基础实验教学改革中, 就学生创新实践平台建设, 从培养目标、顶层设计、激励机制、基础设施建设、教学引导、组织训练等方面进行了积极的探索与实践。

**关键词:** 创新实践; 人才培养; 平台建设

把人才建设摆在优先发展的战略位置, 搞好顶层设计, 创新培养模式, 拓宽培养渠道, 打造新型人才方阵, 加快高素质信息化战斗力生成, 是院校教育所肩负的使命责任。紧紧围绕军事精英人才培养, 实施教育训练综合改革, 是我院实现强教梦、强学梦、强院梦的重要举措。以基础教育训练综合改革为契机, 以构建军事精英人才培养体系为统领, 结合基础实验教学培养目标, 大力开展学生创新实践平台建设, 是践行科学发展理念、丰富实践教学模式内涵、推进基础教学体系建设、促进教育方法手段更新、充实实验教学内容的重要步骤; 是促进学生基本实践能力、科研能力、创新能力、应用能力、思维能力等有效提升的切入点和突破口; 是优化“开放式管理 自主式实践”实验教学模式、强化动手实践训练实效、培育探索创新精神、实现知识学习、转化与应用的良好途径。进行学生创新实践平台建设的探索与实践, 有利于推动军队院校基础教育与时俱进, 向多元化、特色化、正规化科学发展, 为创建一流大学、追赶 985 院校教学水平提供理论支撑。

### 1 深入探索创新实践平台建设体系

学生创新实践平台建设是一项系统工程。教育训练综合改革为完善学生创新实践平台体系建设提供了良好契机, 对强化平台建设力度、规范平台组织管理模式、优化创新实践过程、扩大平台建设规模等, 起到积极的推动作用。

#### 1.1 校、院政策的稳定支持

校、院政策的稳定支持是学生创新实践平台建设的坚强后盾, 在大学新版人才培养方案和学院教学实施计划、课程标准等政策性文件中, 提出了对学生创新实践能力培养要求, 并在教学实践中作出了具体规定和规划。理学院在 2004 年开展教学改革项目研究, 我中心“三级实验教学——学生创新实践探索”项目获得良好评价并受到学院各级领导的重视。近十年来, 有学院的关心支持和相关政策扶持, 学生创新实践活动持续稳步开展, 创新实践平台逐步建立、完善, 学生创新实践训练取得了明显的成效。在不断的实践探索中, 我们也看到, 大学物理实验教学面向刚跨入校门的初学者, 其理论水平、实践基础、思维能力较为薄弱<sup>[1]</sup>。大学物理实验课程是学生进行实践动手能力训练的起始点, 创新实践平台对学生进行科学研究的启迪和训练, 近乎从零做起。可以说, 对上物理实验课的学生进行创新实践训练是人才培养的“育苗期”, 需要精心呵护、培育和相应科目的启蒙训练, 一是在学生中广泛开展实践研究探索, 使学生明确科学研究的基本思路方法、研究过程要求、具体实施步骤, 并进行相应难度的课题研究实践, 实现科学研究实践的零突破。二是校、院教学主管部门持续加大政策扶持力度, 抓大放小, 营造宽松和谐的培训氛围和环境。三是对教研部、室、学生营提出具体要求, 敦促教、学生创新实践训练计划的落实和顺利实施。四要为参训学生提供时间和

---

**作者简介:** 李晔(1962-), 男, 陕西西安人, 硕士, 空军工程大学理学院高级实验师, 主要从事大学物理实验教学、管理与改革研究。

空间支持,开辟绿色通道,确保参训学生课余时间能够参加创新课题研究,必要时允许外出、加班加点、追赶进度等。五是在学生研究过程中要高标准、严要求,真抓实干,在成果审核及考核方面,除抄袭、照搬、套件组装等要坚决否定外,对于学生真实的自主研究、研制的成果,不论简单复杂,材料贵贱,外观拙陋,只要有创新点、闪光点,能解决实际问题,就应鼓励、支持,并最大限度地认可。在教学主管部门的支持下,理化中心成立了“三小活动”课题组,负责学生创新实践活动的信息发布、报名登记造册、中期检查、成果初审、工具耗材提供、结题汇报组织等系列工作,建立中心与学生队、辅导教员与队干部的信息沟通渠道,确保对学生的安全管理,加强双师型教员队伍建设,辅导学生实践研究全过程,组织成果答辩,由高职教员组成评审组,严把研究成果评审关,形成了较完整的学生创新实践训练平台体系。

### 1.2 激励机制的有力支撑

建立健全有效的激励机制是学生创新实践平台建设的可靠保证,是推动创新实践训练可持续发展的强大动力,是不断提升创新实践平台质量效益的直接保障,是调动教、学生全员积极参与的重要手段。

#### 1.2.1 实践过程保障机制

构建学生创新实践平台的目的是让广大学生接受创新实践训练,提高实验探索与研究创新能力。创新实践注重过程训练,以学生为主体,自愿参加、自组研究团队、自选(拟)课题、自行设计研究(研制),自主完成课题创新研究任务。学生创新实践过程必须有完善的实践训练保障机制,一是建立平台导师制,定人、定组、定课题、定目标,定期(不定期)进行指导辅导、问题讨论、思想交流、思路引导等,解决实践过程中遇到的难题、指引学生钻研的思路发展方向。二是提供必要的加工制作工具设备、试验器材耗材原材料、参考资料(书刊或自主查询)、实践场地,并有充足的经费支持。三是建立检查督促机制,参照正常的科研模式,实行课题申报、审批、中期检查、结题审核评价等规范要求,进行规范化建设。

#### 1.2.2 研究成果评审机制

构建学生创新实践平台的目标是追求训练成效的最大化,一是学生参与量的最大化,二是研究成果的先进性、实用性、应用推广价值的最大化,三是研究成果的创新点、闪光点、军校特色的最大化,四是学生自主研制研究占成果总体比重的最大化,五是学生挖掘智慧潜能、拓展知识、技能的最大化等。研究成果能真正体现学生的聪明才智和训练成效,应予以肯定、认可和支持。建立成果评审机制,从初审,中期、终审,评定评价都要规范、客观、实事求是,以鼓励为主,增强学生信心,并在每个环节给出意见建议,结题组织答辩,评定等级,颁发奖状、证书等,并从中选拔优秀成果推荐参加校级、军队(省部级)、国家级各类大学生科技竞赛。激励学生用最好的发挥,最巧妙的设计,最新的设想和创意,最大的兴趣和动力,最强烈的愿望和自信将创新实践训练的成效提升到所能达到的极致水平。

#### 1.2.3 奖励、荣誉激励机制

创新实践训练平台建设为学生发挥个人和团队特长优势、展示技术技能、体现聪明才智提供了时机和舞台,有效推进学生个性、特点、爱好、能力的进一步发展,增强技不压身、技高一筹、科研带头人的荣誉感和自豪感。针对学生创新实践成果建立相应的评比和等级奖励机制,以文件、通报、表彰、标志(物)、流动红旗、奖状、奖杯、奖品、荣誉证书等形式在不同(较低)层次均有所体现,辅以网上公示获奖信息,示范成果展示,选拔精品项目强化训练并重奖,推荐成绩突出、技能全面的师、生交流经验、评功授奖等措施,进一步增强荣誉激励力度,有效激发教、学生参与实践训练、重视自身能力提升、拓展和优化知识结构、致力于创新突破的积极性和主动性。可以想见,集体及个人荣誉感必将激发出教、学生团结向上、争先创优、共同奋进的巨大精神力量和攻坚克难、敢为人先、争创一流的拼搏志气、勇气、才气。

### 1.3 规范严谨的组织形式

严谨有序的组织形式是学生创新实践平台建设组训的模式规范。学生创新实践训练的组织实施是以实验中心课题组为核心，以辅导教员为主导，周密拟定组织程序，严格落实实施计划，营造宽松和谐的科研氛围，在实践进程的各个环节，适时发布活动信息，宏观掌控训练动态。一是把握宽进严出、优胜劣汰的原则，高参与量，低淘汰率，践行开放自主，重在过程锻炼，全员自主参与，共享平台，共同提高，则整体能力水平才能得到有效提升，另外，也为选拔人才和精品项目创造了有效空间。二是把握实事求是的组织规范，学生创新实践过程均在课外进行，要严格教员指导、学生探索实践的角色定位，防止和杜绝教员大包大揽现象，确保学生（团队）研究的相对独立性和研究成果的真实性，真正让学生在创新实践中得到锻炼和提高。三是把握发布的研究课题难度适中，创新实践研究课题紧密围绕实验仪器设备为主线全面展开，兼顾部队军事学习、工作、生活、训练等各方面相关内容，给出的研究课题要适合相应层次的学生进行探索实践，同时，追求课题新颖（杜绝照搬抄袭）、针对性强，切合实际、便于成果转化。四是强化教员辅导、指导力度，学生创新实践训练实行导师制，自主选聘辅导教员，共同确定（或拟定）研究课题，充分发挥教、学生知识、能力特长优势，周密规划创新实践研究实施步骤，讨论制定确实可行的研究方案。五是严格把握审核尺度和量化标准，把握高标准、严要求、练才干、出精品的原则，根据学生知识能力水平确定审核最低尺度，以学生理论联系实际、解决实际问题的方法和力度、技术水平发挥程度、动手创新实践权重，确定量化标准，实事求是反映学生的实际水平。六是把握创新实践平台共享原则，不设立部室、专业、课程等区分和界限，相关研究性课程、研究性实验如研讨课、选修课、讲座课及动手制作类课程等均可纳入学生创新实践平台训练范畴。

### 1.4 理念超前的基础设施

基础设施建设是学生创新实践平台建设的强有力支撑，要将创新实践教学这一块做大做强，必须具备功能完善的训练基础设施、环境和条件支撑。目前学院计划建设的“学生创新实践工程训练中心”，为创新平台建设展现出美好前景，有效推动学生创新实践平台建设走向规模化、规范化、正规化，为后续工作的开展奠定了基础。训练中心定位为学生创新实践公共平台，突破了部、室、中心、学生队等各单位壁垒，为强强协作、合作攻关、提升创新实践成果的层次和水平创造了条件。同时，有效解决了学生实践过程中的实际困难如工具、耗材、材料加工、制版、装配、测试、资料查询等。学生创新实践工程训练中心建设规划，构筑了我院大平台、大协作、大规模的综合化、集成化、基地型学生创新探索与实践训练的发展蓝图，必将成为复合型、创新型部队建设人才培养的孵化器，形成理学院学生创新能力培养的军中“硅谷”。

## 2 积极推进创新实践平台建设发展

创新实践平台建设是基础实验教学改革创新教学模式、转变教学观念、改进教学手段、提高教学质量效益的重要措施，是传统实验教学模式向课题型、研究型、问题式等现代教育方式转变的有效途径<sup>[2]</sup>。大学物理实验中心一直致力于学生创新实践能力训练，倾心打造学生创新实践平台，将创新实践理念渗透到课堂内外、教材和指导书编写、教学实践活动、课程内容拓展等各个方面，推动学生创新实践平台建设向多元化、实效化发展。

### 2.1 课堂教学引导平台

实验课堂教学必须严格按照教学计划要求完成教学任务，同时也为学生进行创新实践训练铺平了道路。通过学习实验原理、方法、步骤和实验仪器设备的调节、使用，学生对仪器结构、功能性能等有了较全面的了解。但是，任何实验仪器的设计并非十全十美，在性能指标、结构设计、操作方法、调节方式、现象观察、数据测读等操作的各个方面多少都存在一些不足和缺陷，只要教、学生善于观察，反复操作，就不难发现装置存在的问题，尤其是

任教教员体会深刻。那么，对发现的问题进行研究，实施改进，就是创新实践的经典做法。教员在课堂教学中提出存在的问题及解决问题的基本思路，均会得到学生的积极响应，并对仪器改进产生极大的兴趣。将实验仪器存在的诸多问题作为学生创新实践研究课题，是利室利民（学生）的双赢举措。其研究成果也能及时转化为教学应用，既提高了仪器品质性能、又锻炼了学生创新实践能力。将创新实践训练融入实验课堂内、外，围绕仪器性能优化和功能完善，仪器的拓展应用，新装置及辅助装置的研制等，开展创新实践研究与训练，是学生创新实践平台建设的重要组成部分。

## 2.2 教材启发引导平台

教材是学生上课必备、课前必读、课堂必用、课后必导的学习材料，尤其是实验教材，一直沿用传统教材编写模式，在课后学生创新实践引导这一块仍然是空白。要充分发挥教材引导作用，在每一项实验最后，开辟学生创新实践内容栏目，指出该实验在装置、操作、测量等实践过程中存在的诸多具体问题（已发现的），提出改进设想，拟定研究课题，是学生课外实践探索的重要课题来源<sup>[3]</sup>。另外，实验教材类型单一，内容受限，相关知识介绍偏少，不利于学生开拓视野、扩展思路、培养发散思维能力，应根据教学和实践研究需要，有计划有步骤地编写与实验教学相关联的参考教材，并逐步形成系列化，丰富教材指导体系。理化中心计划在五年内陆续编写出版《物理实验仪器设备介绍及调节指导》、《大学物理实验思考题经典分析》、《大学物理实验研究课题指导》、《大学物理实验创新实践工程训练》、《物理演示实验操作指导》、《物理虚拟实验操作手册》、《物理研究性实验》等七部教学指导书。此外，补充、编撰和完成《物理实验视频教学》、《大学物理实验设备仪器库》、《大学物理实验微课》、《物理实验数据处理软件》等四部网络教材建设，使物理实验中心实验教材体系完整、内容健全，促进大学物理实验教学实现学生自主学习、自主操作、自主研究创新的开放式、研究型教学模式的全面实施。

## 2.3 实践活动训练平台

结合国家、军队各级大学生科技作品竞赛，广泛开展学生创新实践活动，有目的有目标有步骤地进行组织训练，只要坚持不懈地努力，久而久之就一定会取得意想不到的效果<sup>[4]</sup>。我中心每学年坚持开展学生创新实践工程训练（三小活动），是起步较早的教学单位，目前已施训八届，取得明显成效。学生科技作品在国家级、军队级、西北地区、大学学院等各类竞赛中取得多项等级奖励，发表数十篇研究论文，为我校争得了荣誉。在学生创新实践平台建设与训练中，我们深刻体会到，学生创新实践训练应包罗万象、不拘一格，尤其是军队院校更应体现部队特色，学生研究课题不仅来源于实验室，更应深入部队解决实际困难。黄长强说，部队的困难，就是我们的研究课题。可以看到，部队才真正是学生创新实践的大平台，武器装备需要高端技术，但是官兵的生活、学习、工作、训练，也需要技术力量的协助和支持，其中蕴藏着无尽的有价值、可研究课题，需要我们去发现、去探究、去实践。学院组织学生下部队锻炼这一新举措，搭建起学院与部队之间的桥梁，为了解部队、体验并认知部队、探索挖掘研究项目创造了条件，为学生创新实践平台建设开辟了新途径。根据院校自身条件，更多地组织学生技能竞赛，除军事技能外，诸如学生焊接大赛、全息图制作大赛、机器人制作大赛、单片机编程大赛等，也不失为学生动手实践能力提升的重要手段。物理实验中心在今后的实验教学中，将不定期组织学生在仪器调节、数据处理、全息摄影、仪器维修、新实验内容开发、虚拟实验项目研制等方面进行类似竞赛形式的评比和选拔，评比结果与课程考核成绩挂钩，对成绩优秀者，结合学生创新实践训练（三小活动）汇报总结，一并纳入学生物理实验课免试的奖励范畴，从而拓宽学生动手实践能力的考核检验层面，丰富实验考核方式，创新考核方法，扩展考核途径。实现实验考核手段的多元化，其目的仍然是鼓励特长发挥，突出个性发展，促进创新实践能力有效提升，这是物理实验教学充实学生创新实践能力平台内容建设的新思考、新尝试。

## 2.4 课程开发拓展平台

大学物理实验中心开展学生创新实践训练主要集中在实物实验方面，近几年在虚拟实验研制开发方面也有所涉及，处于研究起步阶段。但作为物理实验“四位一体”教学体系中另外两大支柱——物理演示实验室和物理研究实验室，学生创新实践研究仍少有触及。物理演示实验要纳入物理实验必做内容，对演示实验仪器设备的开发、改进也将成为学生创新实践训练的目标和方向，如何将演示实验进课堂（物理理论课堂），演示实验仪器的小型化改造，演示物理现象明显化的装置开发，新物理演示仪器研制等，都可以列入学生创新实践训练范畴。物理研究实验室是物理经典实验和物理现代技术应用实验的重要教学基地，是物理实验教学的高级层次，是教、学生进行物理研究和专业领域研究拓展的重要物质基础。应选拔物理基础好、学习兴趣浓厚、物理知识丰富、动手实践能力较强的本科学生或研究生学生，在教员指导下进行物理研究性实验的操作、学习、精密测试、应用拓展、技术更新等实践研究与训练，实践结果以研究报告的形式提交，作为课程考核成绩评定的重要依据。课程的开发与拓展研究，是学生创新实践平台建设走向深入的必由之路，是由初级水平向高级水平提升的阶梯，是推进平台建设可持续发展的重要途径。

## 3 充分认清创新实践平台建设困难

随着基础实验教学改革的不断深入，学生创新实践工程训练成为理化实验中心改革创新教学模式的突破口，创新实践平台建设成为提高学生综合实践能力的新的生长点<sup>[5]</sup>。在学生创新实践训练蓬勃开展、平台建设逐步推进的发展进程中，新情况、新问题相继出现，给创新实践平台建设带来诸多困难，需要保持清醒头脑，认清形式，分析研究，抓住问题实质，研究解决办法。

### 3.1 双师型教员队伍培育

教师、导师双师型教员队伍培育是理化中心一直倡导并着重进行的教员队伍建设工程，对教员教学、科研能力提出更高的要求。学生创新实践训练平台建设的实施实行导师制，要求教员在某些领域具备较深入的研究、较全面的知识、较熟练的技能技术、较敏锐的洞察新事物能力，较扎实的动手实践基础，要能够洞悉领域发展前沿，及时抓住发展时机，瞄准奋斗目标，走在发展前列，从而起到示范引领作用。尤其是新市场、新领域，更容易抢夺先机，占领市场。目前，实验室教员的科技指导能力偏弱，分析原因：一是自身没有较明确的研究方向和目标定位，二是缺乏对新事物的敏感性和洞察力，三是浮躁不踏实，对科技研究和创新缺乏自信。从而造成对任何事物的迟疑、怀疑态度和无信心、随大流的被动处境。这种状态既是机会放到跟前也抓不住，对集体、单位、个人的成长与发展都是损失。对教员培育的关键是自信心的培育，尤其是实验课教员，其思想深处对自身定位存在幻想，不安心造成了不作为、不积极、难以沉下心来做研究。因此，首先要加强思想教育，不论是现役教员还是非现役教员，都要端正态度，发挥内动力，明确奋斗目标，加快自身素质和能力水平的提高。二是为教员发展创造良好环境和条件支持，鼓励进修、践学、调研、交流、参赛、短期下部队锻炼等，增强归属感、责任感。三是表彰、重奖成绩优秀者的同时，也要父荫幕后默默奉献而成绩良好者，树立典型更要凝聚一个有战斗力的团队，共同奋发图强，为学生创新实践平台建设健康稳定的发展打下了坚实的基础。

### 3.2 激励与奖罚制度落实

落实激励与奖罚制度是推动学生创新实践平台建设加速发展的重要措施，学生创新实践平台建设从建设初期的教改尝试、试点教学，发展为学院教育训练综合改革计划在建项目和理论研究重点课题之一，培训目标从各教研室内部教法改革改进从而加强能力培养发展成为备战国家、教育部、军队、省市、大学等各类各等级大学生科技作品大赛，在创新实践平台上锻造出除四级英语、数学建模之外又一匹杀出重围的黑马，彰显我院人才培养水准，缔造

学生创新实践传奇,着实是一项令人备受鼓舞和振奋之举。要下大功夫,加强扶持力度,付出更多精力,优化激励、奖惩机制,建议学院或大学设立学生创新实践基金制度,针对国家、军队等不同级别和各类各等级获奖情况,制定相应基金资助,并以制度的形式确定下来,做到规定明确,奖罚分明,申报自主,组织严密,层层审查,严防失泄密,同时,能够吸引并鼓励更多优秀教、学生积极参与创新实践训练,引导学生早进课题、早进实验室、早进团队。有效培养学生创新实践能力,推动我院学生创新实践工程训练做大做强,促进创新实践平台建设正规化、制度化、可持续、健康稳定发展。

### 3.3 军事特色课题研究

军委邓副主席讲过,军队要发展,军校是源头。军队大学及军校大学生肩负部队建设使命,了解部队、研究部队、建设部队是军校教、学生的责任,也是军校特色使然。建立军校教、学生与部队的不间断联系,定期进行短期践学,在部队这样一个大平台上,发现问题并力所能及地解决问题,既有利于部队建设,又锻炼了教、学生科技实践能力,同时也突出了基础实验教学军事特色,是急待开发、可以开发、互利双赢的创新实践平台建设。应建立学院与基层连队横向联系及互助交流机制,研究部队困难,解决部队存在的实际问题。教员和地方入校的大学生,多数对部队不了解,应轮流在每学期用一至二个月时间组织部分教学、员下部队践学,体验部队生活,探索研究课题。这也是学生创新实践平台建设的又一条新思路,是积极的可行的创新实践训练有效途径之一。

## 4 结语

注重学生创新实践平台建设体现了我院教育改革创新动向,彰显了基础实验教学开放搞活、崇尚创新的新气象、新思路,推动学生创新思维能力、创新实践能力的综合发展,铸就学生创新精神、探索勇气和实事求是、敢打敢拼的军魂士气。在学生基本素质和能力培育中,创新实践平台建设融入了科学发展理念,特色鲜明,意识超前,目标前景广阔<sup>[6]</sup>;创新实践平台建设植入了创新研究思想,不论身在何处,研究不懈,创新不止,加速成才训练;创新实践平台建设树立了探索创新精神,直面改革,历经挫折,缔造领域传奇;创新实践平台建设体现了军事院校特色,拓展领域,脚踏实地,解决部队困难;创新实践平台建设成就了人才培育的沃土,构筑能力培养的摇篮,打造素质训练的基地。

### 参考文献:

- [1] 王斌科,李晔.狠抓课程体系建设,促进学员综合素质有效提升[J].空军工程大学学报, 2009(12): 38-39.
- [2] 夏有为.实验为本 探索未知[J].实验室研究与探索, 2013, 32(8): 1~3.
- [3] 王斌科,李晔.大学物理实验[M].西安:西北大学出版社, 2013.
- [4] 徐格宁.构建地方高校实验教学大平台的探索与实践[J].实验室研究与探索, 2010(5): 2-3.
- [5] 宋国李,等.开放式实验教学模式的研究与实践[J].实验室研究与探索, 2010(2): 91-93.
- [6] 宋娟,张家盛,黄琴.开放式实验教学与学生创新能力培养[J].科技资讯, 2009(33): 149-150.

## Exploration on the construction of the innovative practice platform about physical experiment

**Abstract:** During recent 10 years' basic experiment teaching, As to the construction of the students' innovative practice platform, Have a positive exploration and practice on the aspects of training destination, Top design, excitation mechanism, infrastructure construction, teaching-orientation, Organizational training.

**Key words:** innovative practice; talent training; platform construction



## 物理实验室管理的经验和体会

吴庚柱

(武汉大学, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 在物理实验教学中保持实验仪器状态良好是物理实验课顺利进行的基本条件。如何减少仪器故障和消除已出现的仪器故障, 本文介绍了一些这方面的经验和办法。

**关键词:** 物理实验; 仪器损坏; 故障排除

在物理实验教学中实验仪器的损坏是实验室管理中经常遇到的问题, 保持实验室仪器状态良好是实验技术人员的主要工作。笔者对在实验室管理中的一些经验和体会做点介绍。与同仁交流。

要保持实验仪器状态良好有两方面的工作要做好, 一是要预防仪器损坏, 二是出现问题后的维修。

在预防仪器损坏方面有许多工作可做。其一实验技术人员要做好与实验教师的沟通和交流, 合适的沟通和交流, 会提高仪器使用效率、减少仪器损坏。当然这也要求实验技术人员对实验内容和实验仪器性能和特点非常了解。实验教师也应提高保护仪器的认识, 提高预防仪器损坏的经验和能力, 教师的能力提高了学生正确使用仪器的素质也会提高, 这即提高了教学质量也会减少仪器损坏。

其二通过改进实验条件来减少仪器损坏率。例如直流电桥实验可把直流稳压电源输出电流限定在 0.6 安内, 就可保护在学生出错短路的情况下电阻箱不会烧坏。示波器的使用实验中, 把待测量交流信号峰峰电压值由 30 伏降为 3 伏, 可减少示波器损坏的概率。或改变实验器件参数。如交流电桥实验中, 将待测电感值由 10mL 改为 33mL, 则经常损坏的电感变为很少损坏。

在维修方面的内容也很多。这里介绍笔者体会较深的几点。第一点实验装置是一个整体因此出现故障现象后要整体考虑。如光的偏振实验, 光电流放大器显示数值不稳, 并不是光电流放大器出问题了, 而是氦氖激光器老化输出不稳造成的, 更换光源为寿命长的发光二极管就能解决这个问题。又如光电效应实验中, 测量仪显示光电流不稳, 而往往是光电管老化造成的。再如超声光栅实验中, 超声光栅仪输出突然没了, 这很可能是液槽里的水长时间没更换造成, 这时若更换超声光栅仪则会损坏更多仪器。

第二点使用精密电子清洁剂修理电子仪器往往事半功倍, 如信号源输出交变信号波形跳动、电压不稳, 用该清洁剂喷射电压调节电位器, 一下就好了。又如电阻箱阻值不准, 用清洁剂喷射切换开关进行清洗, 立时就好了。

第三点长春第五光学仪器厂的 WSM-200 迈克尔逊干涉仪有的会出现条纹晃动不稳的故障。检查了所有的紧固螺丝都没消除故障。最后怀疑安装反射镜的悬臂梁过于单薄用合适的螺钉旋入悬臂梁的间隙中, 以加强悬臂梁的刚度, 则故障消除。说明悬臂梁刚度不够导致与外界的干扰发生共振, 引起故障。旋入两颗螺钉后反射镜的微调的灵敏度虽有降低但对使用影响不大。建议该厂今后生产的迈克尔逊干涉仪增加悬臂梁的尺寸, 以提高它的刚度, 这就提高了产品质量。

### 参考文献:

[1] 李长真. 大学物理实验教程[M]. 科学出版社, 2009.

**作者简介:** 吴庚柱(1960-), 男, 武汉大学物理科学与技术学院实验教学中心工程师。

# 电工技术实验和学生能力的培养

郭超修, 杨彦婷

(华东师范大学 物理系, 上海 200241)

**摘要:** 电工技术实验是一门重要的专业基础课, 注重理论联系实际, 不仅仅丰富了学生知识储备和实践操作技能, 同时培养了学生分析问题、解决问题和理论联系实际等科学探究能力, 对其将来学习、工作中遇到的电路设计和实际生活中的电路问题等都有着启发和帮助作用。

**关键词:** 电工技术实验; 师范生; 实验教学

## 1 引言

电工技术及实验是一门重要的专业基础课, 实验是本课程的一个重要实践性教学环节, 主要的任务是将电工技术中的电路理论、基本电工测量仪器仪表和常用的电气设备、元件等应用到实验操作中, 通过实验操作培养学生连接电路、电工测量、故障排除等实验技巧; 掌握常用电工仪器仪表的基本原理及使用方法; 学习数据的采集和处理、各种现象的观察和分析等。这些基本实验技能的训练, 培养其应用基本理论分析问题、解决问题的探究能力和严谨的科学态度, 使学生的专业理论水平和基本的实验技能得到提高。

## 2 基本电工测试技能

电工技术实验不仅仅只是通过实验验证理论原理, 还需要使用基本的电工仪器、仪表测量分析一些实验现象。这些基本的电工测试技能是以熟练使用电工仪器、仪表为基础的。实验中涉及到有中学实验用过的电流表、电压表、多用表和电压源, 也有以前没接触过的电流源和功率表等。

对于已经用过的仪表, 学生不仅仅是要会用, 还要加深对其原理的理解。例如在戴维南定理实验中有一道思考题, “电压表、电流表前后位置对换, 对电压表、电流表的读数有无影响?” 这道思考题主要考察电表的内接和外接对实验结果的影响, 在中学的教学中老师告知同学内接和外接对实验结果会是不同的。但是这里结果并不是如此, 这是因为我们这里使用的是数字电压表和数字电流表, 其内阻是理想情况, 因此电表的位置不影响其测量结果。也就是告诉学生, 任何事情都以事实为依据, 不能想当然地下结论。

而对于以前没有接触过的仪器, 就得需要掌握其原理和使用方法。例如功率表这种多线圈仪表, 使用方法和其他的单线圈仪表有很大区别, 学生要理解它的工作原理才能灵活地使用其进行测量。电路的有功功率和无功功率只能用功率表测量得到。学生熟练掌握功率表的原理及使用方法后, 能设计出多个实验, 例如证明功率三角形关系的实验。

## 3 分析问题、解决问题的能力

电工技术实验的接线都较为复杂, 实验过程中会出现各种各样的问题, 比如电路不能正常运行、实验现象和数据不正确等, 这时学生就需要利用已有的知识一一解决问题。照明电路的安装是学生接触的第一个交流电实验, 很多时候学生接好电路后, 日光灯不能正常工作,

---

**作者简介:** 郭超修(1987-), 女, 广西北海人, 华东师范大学物理系助理工程师, 硕士, 主要从事物理实验教学工作。

此时学生要通过小组讨论、组间讨论和多用表测量等手段一一排除故障。一开始学生可能没有思路,此时教师要进行适当的引导,让学生掌握其技巧。经过一个学期的实验技能锻炼,学生基本已经掌握了线路故障排查技巧,在最后一个常用继电器控制电路实验中有明显的表现,虽然这个实验线路非常复杂,但是学生可以自行判断并解决问题所在。

#### 4 对中学物理实验的改进能力

对于即将走上教育岗位的物理师范生来说,可以把电工技术实验和中学物理实验有机结合,将中学教材中一些实验现象不明显的电学实验在原有基础上做一些改进,譬如将一些器材进行替代(如自感现象实验中用传感器来代替传统的小灯泡等<sup>[1]</sup>),或者换一种设计方案,改善一些原来在中学多年的传统实验,增加电学实验的测量手段,让实验现象更明显更有说服力,更好地帮助学生理解某些物理原理;或者设计一些教材中并未提出的简单有创新的电学小实验,作为学生兴趣知识及能力的拓展;若教学中需要讲解一些抽象的电学概念或日常生活中的一些电学物理现象,对学生思维能力要求较高,师范生可以设计、开发一些有创意的电学实验,使电学实验内容变得丰富多彩与并且与生活实际结合,从而增强学生对物理学习兴趣,探究欲望得到增强;除了电学实验外,利用非电量的电测法还可以对温度、速度、位移、力等非电量进行微小测量(例如用传感器来验证牛顿第三定律)。

#### 5 理论联系实际的能力

电工技术实验是一门与实际生活非常紧密的课程,学生不仅要学习基本的电工仪器、仪表的使用,还需要学习变压器、电动机、电度表等生活中常见的元器件的使用和常用继电器控制电路。这些实验内容丰富了学生的知识技能储备,培养了学生理论联系实际的探究能力,对学生在今后学习、工作中对电路进行设计或改进(如电动机的延时控制电路<sup>[2]</sup>和家用电冰箱电气控制电路<sup>[3]</sup>等)打下了坚实的基础。这几年的物理教材非常重视物理知识在生活中的应用,例如新人教版物理九年级中家庭电路这一节,这就要求师范生熟练掌握理论知识并灵活应用才能很好地对学生进行讲解。此外它对学生理解一些探究性试题起到帮助的作用,比如2009年理科综合能力测试物理部分(宁夏卷)高考题23以风力发电为路灯提供电能为背景信息考查学生运用知识解决实际问题的能力。如果熟悉电磁开关即交流接触器在生活中的简单应用,向学生分析这道试题根本不在话下。

#### 6 结语

电工技术实验作为一门专业基础课,重视学生在发现、提出问题、设计实验、动手实践等方面探究能力的培养,是培养学生科学探究实验能力的一条重要途径。学生通过本课程的学习,理解电工技术课程中的基本原理和掌握常用仪表、仪器的使用,学会分析和设计简单应用电路,联系生产生活。对于物理师范生,将电工技术实验与师范生教学技能有机结合,有利于培养师范生的探究实验教学能力,以更好地适应今后新课改对教师的要求。

#### 参考文献:

- [1] 汤跃明,谢紫娟,张文杰.传感器技术在中学物理实验教学中的应用[J].中国电化教育,2006(11):53-55.
- [2] 秦曾煌.电工学上册 电工技术(第六版)[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [3] 舒信隆,景培书.教师教育技能实训指导手册(物理卷)[M].上海:华东师范大学出版社,2010:194-209.

## Electrician Technology Experiment with the Cultivation of Students' Capability

GUO Chao-xiu, YANG Yan-ting

(Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** The Electrician technology experiment is an important compulsory course, and it focuses on linking teaching theories with practice. The Electrician technology experiment is not only laying stress on enriching students' knowledge reserve and practical operation skills, but also fostering the students' scientific inquiry capacity to analyze and solve problems. Meanwhile, it would bring great help and enlightenment when encountering the circuit problems about circuit design and real situations.

**Key words:** Electrician technology experiment; normal university students; experiments teaching

# 大学物理设计性实验的作用不可小觑

曾乐贵

(装甲兵工程学院 基础部, 北京 100072)

**摘要:** 针对大学物理设计性实验的特点, 突出强调了大学物理设计性实验的重要作用。

**关键词:** 大学物理; 设计性实验; 实验作用

## 1 引言

物理学是研究物质结构、物质运动以及物质间相互作用规律的科学, 物理实验是物理学探索这些规律的唯一途径。物理实验是物理学的基础, 它在物理理论的形成、建立以及发展中都起着非常重要的作用。物理实验是有目的地运用科学仪器, 人为地控制、创造或纯化某种自然过程, 使之按预期的进程发展, 同时在尽可能减少干扰的情况下进行定性的或定量的观测, 以探求该自然过程变化规律的一种科学活动<sup>[1]</sup>。一个优秀的技术人才, 除了要具有厚实的理论知识外, 还必须具有良好的科学实验能力。大学物理实验课程是大学生进行科学实验的开端, 对于培养大学生的科学实验能力有着其它课程无可替代的作用。学生通过做大学物理实验, 不仅能够获得物理实验理论、方法和技能方面的基本训练, 而且能激发学生的探索精神和创造性思维, 提高学生的实践能力和综合素养。做传统物理实验, 学生通常是依据教材上的实验方法和步骤来完成实验, 这种模式对学生掌握实验方法、验证实验结果和加深对理论的理解有较好的效果, 然而, 对于培养学生动手实践能力、独立思考能力、创造性思维能力和勇于探索精神的效果较差。大学物理设计性实验, 改变了传统的实验模式, 能有效弥补传统实验的不足, 更加突出物理实验教学的重要作用。

## 2 何为大学物理设计性实验

大学物理设计性实验, 是指根据给定的实验要求和实验仪器条件, 由学生自己设计实验方案、完成实验操作和数据处理的实践活动。大学物理设计性实验介于基础实验和科学研究实验之间, 它是一种类似科研的实验训练。具体地说, 它是学生在教师的指引下, 针对给定的实验题目或实验要求, 查阅相关文献资料, 建立物理模型, 提出实验原理, 选择最佳实验方案, 确定测量条件, 制定实验步骤, 观察和记录实验现象和数据, 思考并研究实验过程中出现的种种问题, 注重对实验结果进行分析和研究, 提出注意事项, 直至完成实验<sup>[2]</sup>。

通过做大学物理设计性实验, 学生最大限度地发挥了学习主动性, 学生分析、归纳、判断、创新等多种能力得到了充分的锻炼。尽管大学物理设计性实验一般要花费较多的时间和精力, 而且往往要经历一些失败, 但对于培养学生独立从事科学研究工作的能力, 特别是创新能力来说是必不可少的。

## 3 大学物理设计性实验的重要作用

与学生被动做传统物理实验不一样, 大学物理设计性实验靠学生主动完成, 学生的观察能力、文献查阅能力、分析和解决问题的能力 and 创造能力等都能得到较好的训练。它对学生综合能力的培养有着不可低估的重要作用。

---

**作者简介:** 曾乐贵(1978年出生), 男, 湖南邵阳县人, 讲师, 硕士, 研究方向为大学物理实验教学。

### 3.1 大学物理设计性实验能锻炼和提高学生查阅文献资料的能力

做科学研究,必须具备较好的查阅文献资料的能力。做传统实验时,学生基本上不需要查阅文献资料,只需按照书本上的步骤完成实验。与此不同,大学物理设计性实验需要学生自己设计完成,学生不可避免地会遇到各种问题,这就需要通过网络或图书馆查阅相关文献资料,解决遇到的问题。因此,学生查阅文献资料的过程就是一种较好的实践锻炼,通过锻炼,学生查阅文献资料的能力会得到较大的提高。

### 3.2 大学物理设计性实验能充分调动学生学习主动性

完成大学物理设计性实验,进行认真调研,查阅有关文献资料,设计实验方案并论证其可行性,分析实验设计缺陷,解决实验技术难题,操作仪器设备进行测量,这些工作一个都不能少。经过这个过程,能激发学生做实验的兴趣,能充分调动学生学习主动性,学生不再是简单、被动地重现书本上的实验,真正实现从被动学习到主动学习的转换。

### 3.3 大学物理设计性实验能加强学生的动手能力

大学物理设计性实验处处需要学生自己动手,如准备实验仪器设备和材料,协调安排实验时间,设计实验方案,独立操作仪器设备进行测试等等。在实验过程中有时甚至需要反复做实验,才能成功完成实验。因此,从动手准备和安排实验到熟练使用各种仪器设备完成测试,都需要自己动手,从而能大大提高每个学生的动手能力。

### 3.4 大学物理设计性实验能提升学生分析和解决问题的能力

学生在完成大学物理设计性实验的过程中经常会遇到各种各样的问题,例如测量长度可用米尺、游标卡尺、螺旋测微器等,学生需要根据实验要求和测量精度,选择合适的刚好符合要求的实验仪器。此外,学生需要自己观察记录结果和分析处理结果来完成大学物理设计性实验,特别地,在实验结果不理想时需要自己分析原因并修改实验方案,重新做实验才能完成实验。经过这样一个过程,能提升学生分析和解决问题的能力。

### 3.5 大学物理设计性实验能提高学生的合作意识

有些大学物理设计性实验需要以小组形式完成,此时需要小组成员共同努力,设计实验方案并完成实验。在这个过程中,只有团队成员团结协作、相互支持和密切配合,才能成功地完成实验,因此,这个过程强化了学生的团队意识,提高了学生的合作意识。

### 3.6 大学物理设计性实验能提升学生的创新能力

在撰写大学物理设计性实验的方案时,实验的某些环节通常需要体现出巧妙的物理思想和实验技巧,尽可能引用现代科技中得到广泛应用的测试技术和仪器,甚至可以引入微机数据采集系统等现代化测试手段,以及物理学与其它学科相互交叉的新测量技术和数据处理方法。在设计和完成实验的过程中,学生的创新意识得到了较好的触动,创造性思维得到了较好的锻炼,创造性成果得到了较好的体现。因此,大学物理设计性实验能提升学生的创新能力。

## 4 结束语

大学物理设计性实验对于培养学生创新意识、创造性思维,以及独立思考能力、分析和解决问题的能力、合作能力和创新能力有着重要的作用,是培养学生科学素养的最有效途径之一。随着大学物理设计性实验教学的不断发展,它会越来越科学、合理,所以,它在人才培养中会发挥越来越重要的作用。

### 参考文献:

- [1] 刘清华。从哲学的角度看实验在物理学发展中的作用[J]。廊坊师范学院学报(自然科学版), 2010(10): 57-58。
- [2] 余兰山, 吴成霞, 黎鑫。论设计性物理实验教学体系的构建[J]。中国校外教育(下旬刊),

2007(9): 65-66。

## Designing Experiments of University Physics Is Very Important

Zeng le-gui

(Department of Fundamental Courses, The Academy of Armored Forces Engineering,  
Beijing 100072, China)

**Abstract:** According to the characteristics of college physics designing experiments, highlighted the important role of the designing experiments of college physics.

**Key words:** University Physics; designing experiments; role of the experiment

# 物理实验教学培养学生创新能力的探究

——以转动惯量实验为例

张锐波

（浙江大学 城市学院信电分院，浙江 杭州 310015）

**摘要：**本文重点论述了在转动惯量实验教学环节中，如何向学生灌输实验设计思想、原理、逻辑推理、操作技巧与训练以及提高实验测量精度、减小测量误差，依此培养学生创新思维、创新意识、创新精神和创造发明能力，仅此抛砖引玉与读者共勉。

**关键词：**转动惯量；培养；创新人才；物理实验思想；精度；能力

转动惯量实验是一个非常普通的基础性实验，但是，只要仔细琢磨、研究及纵向延伸与横向拓宽，不断地挖掘、剖析其内涵，教学的着眼点从不同层面切入，有利于激发学生兴趣，学生的创新能力就会自然而然地提高。

## 1 培养学生物理实验思想

转动惯量这个实验，首先应该向学生讲解实验系统设计思想，从勾画转动系统受力分析图切入，如图（1）所示。在此基础上，理解该实验系统动力矩和阻力矩的产生机理，以及平动与转动部分的相互联系，导出转动惯量测量表达式。依据牛顿第二定律与转动定律，采用隔离法列方程组

$$mg - T_1 = ma \quad (1)$$

$$rT_2 - M_\mu = J\beta \quad (2)$$

$$-M_\mu = J\beta' \quad (3)$$

$$T_1 = T_2 \quad (4)$$

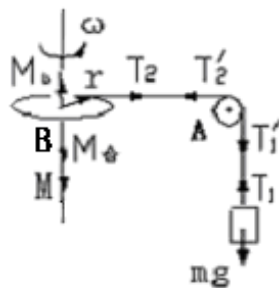


图 1 为转动惯量实验受力分析图

采用该种教学方法非常凑效，验证了物理实验不只是一切通过动手，机械地操作攫取数据，还需要加深对基本概念理解和掌握，诸如列方程时必须根据相关物理量的矢量方向，来确定正、负号。这样做，有利于促使学生自主分析、判断和解决实际问题的能力。

## 2 提升学生实验测量精度

测量园环、园盘转动惯量的测量和验证平行轴定理为转动惯量实验的主要内容，多数同学所测数据与理论值比较其百分误差均低于 10%，少数同学误差较大，大于 10%，甚至极个别同学超过 20%，究其原因可归纳为如下。

**资助课题：**浙江大学城市学院重点实验室资助

**作者简介：**张锐波（1959-），男，山西芮城，副教授，研究方向：大学物理实验技术、创新设计与教学方法研究。



## 2.1 转动轴倾斜引起的误差

实验转动仪底座为三支点装置，由于没有调平标志（玻璃水泡），学生无法判断底座是否水平，即转轴是否铅直，如此会产生与轮轴垂直的水平分力，挤压转动抽，使之磨擦力增大，造成转动不均匀，从而会产生相应测量误差。为了避免由此而产生的测量误差，对学生产生误差较大仪器借用水平尺对底座进行调平，起到非常好的效果，测量精度有了明显提高。

## 2.2 系统误差分析

众所周知，物理实验教课书中，系统误差有四种类型，本实验产生系统误差有两种情况，现就其逐一剖析。

### 1) 理论方法误差

根据（1）至（4）式，推得转动惯量计算公式  $J = \frac{m(g-a)r}{\beta-\beta'}$ ，将转轮半径  $r$  与角加速

度  $\beta$  代入平动与转动联系式得  $a = r\beta \ll g$ ，于是采用公式  $J \approx \frac{mgr}{\beta-\beta'}$  物体转动惯量，

此处忽略了  $a$ ，这样的误差应该属于理论方法误差。

### 2) 仪器误差

若转动惯量测量装置转动轴与几何主轴不重合，围绕旋转主轴的转动惯量就会大于围绕其几何主轴转动惯量，教学过程中，老师一定要让学生明白该差值的存在，理论上讲该误差可采用平行轴定理纠正，这样一个分析过程非常有利于塑造学生创造思维。

## 2.3 传动滑轮带来的误差分析

教师向学生灌输物理实验误差的产生原因与消除误差的方法，最大限度提高实验精度。

1) 通过传动轮 A 为系统施加外力，若调整不好就会产生误差。实验时传动轮（A）槽底应与绕线轮 B 水平，而且应该顺着槽的方向，否则，将会产生向上或向下分力，以及较大摩擦力，使之，施加在系统上的力矩小于外力矩。尽管这样一个结果对实验结果产生误差影响不大而被忽略不计，但是，应该向学生们讲清楚，有利于启迪学生考虑问题的全面性。

2) 传动轮（A）本身的转动，除轮轴处产生摩擦外，传动轮的质量和半径也会对实验结果带来误差，如图（1）隔离出传动轮（A），依转动定律列方程

$$(T'_1 - T'_2)r_0 - M'_\mu = J_0\beta_0 \quad (5)$$

$$-M'_\mu = J_0\beta'_0 \quad (6)$$

设传动轮（A）质量  $m_0$  集中于半径  $r_0$  圆环上，由（5）、（6）式得

$$T'_1 - T'_2 = \frac{J_0}{r_0}(\beta_0 - \beta'_0) = \frac{m_0 r_0^2}{r_0}(\beta_0 - \beta'_0) = m_0 r_0(\beta_0 - \beta'_0) \quad (7)$$

$\beta_0$  和  $\beta'_0$  为转动系统有外力时角加速度与没有外力的角减加速度，（7）式中  $m_0 \neq 0$ 、 $r_0 \neq 0$ 、

$\beta_0 - \beta'_0 \neq 0$ ，因而  $T'_1 \neq T'_2$ ；若要使  $T'_1 \approx T'_2$ ，就必须要求  $m_0$  和  $r_0$  非常小，计算被测转动惯量所带来的误差才能被忽略。

当然，产生系统误差的原因还有挡光与信息传输所产生的误差，在此就不一一剖析了，可以留给学生自己去思考，效果更佳。具体可采用启发式或提问式来开展教学，该教学环节尤为重要。

### 3 培养学生发现分析解决问题的能力

#### 3.1 培养学生分析判断能力

从学生实验所得转动惯量与理论值不符，一位同学测量结果的百分误差竟然高达 56.79%，竟然这样一个结果交给了老师。在老师的指导下，这位学生经过认真分析、检查，才发现角减加速度  $\beta'$  是按正值带入公式计算，从而得出大相径庭的结果（粗大误差）。

#### 3.2 培养学生类比分析问题能力

转动观测测量实验绘制转动系统受力分析图非常重要，实验原理似于验证牛顿第二定律实验思路，只要将平动滑块换成转动系统即可。平动是指系统的合外力，转动是指系统的合外力距；平动是平动系统加速度，转动是指系统的角加速度；平动是指物质质量，转动是指转动系统的转动惯量。同时，所列数学表达式也存在着对应关系；等等诸如此类问题，在教学的过程中，老师一定要善于纵向联系与横向比较，来帮助学生融会贯通。因为在实际科研中，研究人员的灵感和顿悟多数都来源于类比。

### 4 培养学生创新与创造力

#### 4.1 培养学生创造性思维

转动惯量实验对相关参数的测量是采用带有光电门的毫秒计系统，该环节老师不仅要向学生讲解操作过程和测量方法，还应该向学生讲解毫秒计的工作原理。比如，攫取数据是通过挡光来实现的，转动系统转过  $\pi$  挡光一次。在有外力时，每转过  $2\pi$  和  $8\pi$  分别记录时间  $t_1$  和  $t_2$ ，该数据分别是 3 减 1 与 9 减 1，为什么不是 2 减 0 和 8 减 0；而在没有外力时，攫取对应  $2\pi$  和  $8\pi$  的时间  $t'_1$ 、 $t'_2$ ，分别为 23 减 21 与 29 减 21。这样一些问题，一定要启发学生去思考，以此来启迪学生智慧和激发学生创造力。

而角加速度和角减加速度数据攫取则是依据角加速度公式

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2 \quad (8)$$

在  $\theta$  分别取  $2\pi$  和  $8\pi$  时，时间分别取有外力的  $t_1$  和  $t_2$ ，与没有外力的  $t'_1$  和  $t'_2$ ，分别列方程，就可分别解出有外力和没有外力挡光杆挡光  $2\pi$  和  $8\pi$  对应的角加速度  $\beta$  和角减加速度  $\beta'$ 。

再比如毫秒计为什么要设置成“0129”，以及为什么挡光“9~21 次”间作用在系统上的外力必须消失；等等…。看似简单的问题，若留给学生思考，一定会获得一个并不简单的效果。如此组织教学，非常有利于开阔学生视野，进而启发学生智慧与创造思维的形成。

#### 4.2 针对具体问题培养学生创造力

依据厂家设计思想，这个实验只能测圆盘、圆环转动惯量与验证平行轴定理，如何拓展该实验内容，提升学生创造能力。一次实验教学中，我把：“如何测量任意形状物体的转动惯量？”的题目作为课外作业留给学生。一个学生提出了确定质心主轴和固接物体方案，实践证明效果非常之好。这样做非常有利于培养学生分析、解决实际问题的能力。

## 5 结论

看似一个很简单实验，却蕴含着激发学生的创新思维和创造力的诸多知识点，这就要求我们老师要不断地挖掘与汇聚培养学生创新思维的教学方案和教学理念。物理实验教师要时时刻刻用创新的教学方法，不断启迪学生的聪明才智，激发学生的创新意识与创新思维，千方百计地为学生提供创新机会和环节，挖掘学生创造潜力。创新需要从一点一滴作起，看似一个简单的问题也会激发学生的创造火花。其实，一位功名著的科学家，同样需要一点一滴的积累，才能最终实现创造、发明与巨大成就。所以说，大学物理实验教学环节非常重要，每一个实验都会有培养学生能力的诸多闪光点，老师在讲解必须的实验内容外，还应该讲述一些提升与拓展内容，提供给学生的应该是研究和探讨。

### **Physics experiment teaching to cultivate students' innovation ability**

——Taking the rotational inertia experiment as an example

ZHANG Rui-bo

(College of city, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

**Abstract:** This paper focuses on the moment of inertia in the experimental teaching, how to impart the thought, the design principle of logical reasoning, skills training and improve the measurement accuracy, decrease the measurement error, so as to culture the students' of innovative thinking, innovative consciousness, innovative spirit and creative ability, this will only encourage with the reader.

**Key words:** rotational inertia experiment; culture, innovative talents; thought of physical experiment; precision, capability

# 运用专题教学法组织大学物理实验课堂教学

倪晨, 方恺, 汤纯, 何雨华, 陆萍  
(同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 针对卓越计划和拔尖人才的培养目标, 本文从大学物理实验教学的基本要求出发, 结合专题教学的特点与目标、教学过程与方法等方面, 提出将专题教学方法运用于课堂教学组织和内容设计。

**关键词:** 物理实验; 专题教学法; 人才培养

大学物理实验课程是面向全校理工类专业学生开设的公共必修课程, 如何把握好物理实验教学内容以及教学方法和手段, 以提高学生的动手操作能力以及实验方法与技能, 一直以来都是该课程教学改革的核心和重点。教育部在关于卓越计划和拔尖人才培养指导意见中指出, 应大力改革课程体系和教学形式。以强化工程实践能力、工程设计能力与工程创新能力为核心, 重构课程体系和教学内容<sup>[1]</sup>。伴随着网络技术的快速发展, 如翻转课堂(Flipped Classroom)、慕课(MOOCs)、微课程(Microlecture)、主动学习(Active Learning)等一些形式新颖的教学模式和方法正逐渐改变着我们的课堂教学形式。在此背景下, 需要有效的教学方法和手段, 对课堂教学进行重新组织和安排, 符合创新人才和拔尖人才的培养需要, 是大学物理实验课程在转型升级中面临的首要问题。笔者在我校生命与海洋联合培养基地试验班的实验教学中发现, 专题教学法不失为是一种有效的手段, 可以将实验教学中的原本略显松散的结构通过专题的形式组合起来, 形成相对完整的知识结构单元。可较好地解决因实验内容不连贯而导致学生难以理解实验的理论和方法等问题。

## 1 专题教学法

专题教学法<sup>[2]</sup>指将过去以知识体系相关为依据的教学模式转变为以内容对象相关为依据的教学方式。专题式教学法从上世纪 80 年代开始已有研究, 在欧美比较流行, 并在如文史、生物、医学等各种学科中得到广泛的应用<sup>[3-5]</sup>。专题教学法根据教学大纲的基本要求, 按照课程内容的内在思想和逻辑关系对教学内容进行整合、提炼、概括和充实, 形成既有先后连接又相对独立的系列专题, 并围绕着专题确定的教学方案, 相对集中深入的进行教学。由此可见, 专题教学法具有较为自由的思维和设计方式, 课堂教学围绕该专题展开, 具有较强的针对性和实践性, 适合在实验的课堂教学内容进行组织和安排。

大学物理实验课程的一般过程是: 先由教师讲解实验理论知识或学生自学完成实验的预习工作, 明确实验原理和内容, 制定操作步骤。进入实验室通过实验操作完成测量并正确记录实验数据。然后进行分析和讨论, 完成实验报告。其中, 教师讲解实验理论知识和学生操作过程属课堂教学。由于每个实验项目相对独立, 且实验的原理中包含相关的物理理论、测量和数据处理的方法, 还有仪器的设计原理和使用方法等, 知识点多且综合。因此学生仅通过完成几个有限的实验项目很难掌握实验的设计思想和分析方法, 缺乏解决问题的能力。这就使得教学效果大打折扣, 阻碍了创新能力的培养和学生个性的发展。专题教学法的目标则更注重培养学生发现、解决实际问题的能力及创新思维与创新精神的培养。课堂中围绕专题进行讨论, 引导学生在实验中发现问题, 尝试使用新的实验方法解决问题, 验证实验结果的正确性。教学内容紧扣主题, 教学全过程贯穿科学创造式的学习和锻炼, 激发学习的积极性。

## 2 教学过程与方法

专题教学法不是简单地将原有的教学内容组织和划分。需要根据大学物理课程教学的培养目标,以专题作为主线和载体,贯穿于课程之中。往往需要对实验项目作重新设计。教学形式上可分为理论知识型和实验综合型两类。

理论知识型专题适合实验理论课堂的讲解。设计专题时,先应开展实验项目知识点的梳理和改进,以2~4个实验项目作为1个单元,每个重点强调1~2个知识点,知识点内容包括是实验方法、数据处理方法等方面。如杨氏弹性模量的测定实验,基础知识点包括:“胡克定律、杨氏弹性模量、光杠杆镜尺放大法、望远镜调整方法与原理、逐差法、科学绘图要求与训练、长度测量工具训练”。又如气体比热容比 $C_p/C_v$ 的测定实验,包括:“简谐振动与绝热方程、周期及气压的测定方法、质量称衡、累积放大法、长度测量工具训练”等,找到其实验理论或方法的共同点,建立专题,这样学生就会从实验中加深对相关知识的理解,并运用到后续的实验中。例如,我们设置了“放大法实验专题”,请同学们通过网络查找资料,观看中国大学视频公开课(i-Course)网站上的实验课程,找出所有使用放大法的实验项目,在课堂上组织讨论交流。然后再完成上述例子中的两个实验项目,学生就能理解相关的实验思想和方法,并能针对不同的测量对象设计出相对应的实验。又如在“不确定度实验专题”中,我们提出“如何判别实验结果是否正确?”这一问题,提供三个答案供学生进行辨析:①与理论值相符;②多次测量结果一致;③不确定度较小。学生通过不同的实验例子进行辩论后,不仅对不确定度的科学意义有了深刻的理解,也掌握了实验结果正确与否的评判方法。并在实验后开始注重进行数据分析与实验讨论。

实验综合型专题是为培养理工科类学生的工程意识、工程技能、工程设计所设计的系列实验内容,通过这一较为系统的专题实验学习,既能让学生对实验原理、实验方法与手段掌握透彻,还能培养学生独立思考、解决实际问题的能力,进一步激发学生对实验的浓厚兴趣,真正通过实验去研究并理解物理规律。每个实验项目都需要明确其培养目的以及知识内容结构,并确保各项目之间的关联程度以及实验难度梯度。在资源充足的前提下,还可以考虑增加设计性与开放性实验内容,锻炼和检验学生综合运用所学知识的能力。例如我们设计了“硅光电池特性的研究”实验项目作为一个专题性实验项目,项目围绕硅光电池这一新能源材料,设计了一系列的实验项目内容:①硅光电池照度特性实验:学习半导体PN结特性;掌握光伏效应基本原理;掌握模拟电表与数字电表的使用;了解光照度与光电流变化关系。②光的偏振特性实验:了解偏振光的性质和规律;验证马吕斯定律;掌握硅光电池作为光探测器的使用方法。③硅光电池输出特性实验:了解硅光电池的输出特性;掌握最大功率、最佳负载电阻及填充因子 $FF$ 的测量方法。④硅光电池光谱响应特性实验:了解光探测器的光谱响应测量原理;掌握利用光谱仪测量光谱响应的实验方法;测量硅光电池的相对灵敏度。⑤调光电路设计实验:了解PN结偏置特性;研究硅光电池反向偏置状态的伏安特性;设计发光LED的光强随光照变化而同步改变的调光电路。⑥运用Labview进行硅光电池特性的研究:了解虚拟仪器的编程和设计原理;掌握计算机实时测量的实验方法。通过学生完成后的问卷调查反馈信息来看,学生普遍反映对硅光电池有了较为全面的了解,学会了相关特性的测试方法,尤其是了解了硅光电池基本特性后进行的调光电路设计,学生感觉既有趣,又觉得学有所用,很有收获。可以看出,经过专题实验的教学设计,可以让学生更为全面地了解某一物理原理或材料特性,通过开展不同类型的实验,掌握不同的实验方法和技能,并最终具有综合应用、创新设计的能力。起到了较好的实验教学效果。

## 3 结束语

实践证明,专题教学法可以行之有效地将物理实验中的教学内容有机地组合在一起,突

出教学目标和重点。课堂教学中，教师可灵活运用各类教学方法和手段对专题进行探究，充分调动学生对实验学习的兴趣，是提升学生创新能力的途径之一。我们虽然在实验教学工作中对此进行了一些有益的探索，同时也发现这种教学模式在实施时还有一些具体困难，如设备不足、课时不足、师资不足等诸多因素。因此，在课时分配、人员分配、设备分配等方面需要制定更为详细及周全的计划与安排，及时总结教学经验，以期能确保其教学常态化，真正实现个性化、分层次教学。

**参考文献：**

- [1] 教育部。教育部关于实施卓越工程师教育培养计划的若干意见。教高[2011]1号[EB/OL]。  
<http://www.moe.edu.cn>, 2011-1-8。
- [2] 郝宗珍。专题教学法：一种有效的教学方法[J]。广东经济管理学院学报，1999（4）。
- [3] Kevin J. McDermott, Andrew Nafalski, Ozdemir Gol. Project – based Teaching in Engineering Programs [J]. 37th Annual Frontiers in Education Conference, 2007(3).
- [4] 王慧。“专题式”教学在课程教学中的应用探讨[J]。高等理科教育，2007(6)。
- [5] 郝中骥，刘莉。开放式专题教学法在高校理工教学中的应用[J]。宜春学院学报，2009(6)：187-188。

## **Application of Thematic Teaching Methods in College Physics Experiment Course**

Ni chen, Fang Kai, Tang chun, He Yu-Hua, Lu Ping

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Aiming at the outstanding talents training, According to the basic requirements of the college physics experiment course teaching, Combined with the characteristics and objectives of thematic teaching methods, to organize and design classroom teaching.

**Key Words:** physics experiment course; thematic teaching methods; talent training

# 特色物理实验类选修课程对培养 卓越工程技术人才的初步实践

——以中国石油大学(北京)《物理技术与实践》课程教学实践为个案

杨振清, 吴冲, 张国林, 林春丹, 张万松

(中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249)

**摘要:**新时期国家重大能源战略对卓越工程技术人才有了更高的要求,对高校人才培养观念、方法和模式提出了新的挑战。如何培养优秀的石油石化类工程技术人才是摆在石油行业特色高等院校面前的首要问题之一。本文结合我校《物理技术与实践》课程教学的实践情况,探讨了该课程在培养具有石油石化特色的优秀工程技术人才中的模式和重要作用。

**关键词:** 物理技术与实践; 石油石化领域; 工程技术人才;

中国石油大学(北京)地处中国首都,是一所石油特色鲜明,以工为主,理、工、管、文多学科协调发展的全国重点大学,是我国石油石化工业高层次人才培养的主要基地,是“211工程”重点建设和国家985工程“优势学科创新平台”建设的高校之一<sup>[1]</sup>。21世纪以来,随着世界政治、经济、文化发展的国际化和全球化,以及我国改革开放的不断深入,石油类能源消耗不断增加,石油战略的国际化已是大势所趋。我校专业人才的培养始终服务于国家重大能源战略需求。在新形势下如何培养优秀的工程技术人才是摆在石油行业特色高等院校面前的首要问题之一。

工科大学物理涉及力、热、电、磁、光、近现代物理等知识,所讲授的基本概念、基本理论、基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分<sup>[2]</sup>。工科物理实验的构思、方法和技术极广泛地渗透到了各个自然科学学科和工程技术领域。它们与非物理学科自身的实验技术互相结合,互相推动,促进了各学科的完善与进步。在石油和地质工程领域中许多技术手段,如地震探矿、声波测井、光谱法分析物质的化学成分、晶体管的设计制造乃至电路性能的测试、岩石孔隙度和渗透率的研究、原油或油品流动性质的研究等等,实际上都是物理实验在专业领域中的实际应用<sup>[3]</sup>。正是把物理学及其实验方法运用于专业,才使其得到了迅速的发展。

为了探索人才培养模式的多样化,为国家培养基础理论扎实、创新能力强的拔尖石油石化工程人才,为了更好地发挥基础物理在石油石化人才培养中的作用,深化物理课程体系改革,2008年依托我校的北京市科普基地和“翱翔计划”基地实验开设了全校公共选修课程《物理技术与实践》。笔者及课题组成员对本课程从以下几个方面进行了初步探索和实践。

## 1 积极开展创新教育体系的探索

全校21理工专业中,其中有15个专业的本科生必修大学物理和大学物理实验课程。理工专业所开设的专业基础课程中与石油石化特色专业相关的物理课程门数及学分所占比例分别为66.94%和45%<sup>[4]</sup>。特色专业的专业基础课与物理课程可谓是密切相关,但是如何利用物理原理和知识与工程技术专业相结合,如何发挥物理课程在培养优秀工程技术人才中重要作用等问题是当前基础物理课程教学和石油特色教育共同关心的话题。

### 1.1 转变教学观念,设置全新课程体系

针对物理理论课重理论知识的课堂教学,物理实验偏重实验室操作的特点,开设全校公共选修课《物理技术与实践》。该课程既要避免大学物理理论内容和物理实验内容的重复,

又要兼顾和石油石化工程技术领域相结合。根据这个原则,我们设置新的课程体系,具体包括编写教学大纲,精选课程内容(重点选择与特色专业相结合的专题),编写授课讲义和制作视频课件等。突出从源头上积极培养本科生创新意识和创新能力的新思路、新方法和新途径。根据本科生的知识结构和认知水平并结合本校的专业特色,在原有的教学实验室、创新实验室和科普基地的基础上选择专题内容,在授课形式上采用小班上课,选课人数控制在每班50人。授课顺序上打乱大学物理理论课中力、热、电、振动波动、光及近代的顺序,以专题形式进行,例如伯努利原理专题,物体的重心与平衡专题,光学成像与探测专题等。理论和实验同时进行,第一节课是专题内容的理论学习,第二节课为专题内容实验演示和问题讨论及思考。

### 1.2 革新教学方法,推进直观教学

教学过程中采用问答的方式开启学生的积极性以及启发他们的思考。让学生带着问题去学习,正所谓“无问不成学,问则疑,疑则学”。现在的本科生偏爱自由、想象和思考,所以教学以宽松、交流、探讨的形式进行,启发式的兴趣教学方法使学生的学习心态变被动为主动,大大提高了教学质量。突出直观教学,提高学生学习效率。教育心理学认为,让人识别一种东西,所运用的方式不同,所需要的时间也不同,用语言描述比用观看实物或图形要多用一倍以上的时间,这就提示我们在课堂上突出直观教学的重要性。把抽象的物理名词通过演示实验上升到“形”的认识和理解,启发学生思考,诱导丰富的形象思维。特别提醒学生注意观察每一个现象,并要透过现象悟出其中的物理规律及其在生活中和工程中的应用;防止被副现象所迷惑而忽视重要内容。另外,将部分科学和工程技术前沿研究领域的成果或难题转化为教学的专题内容(或专题讨论内容),将创新教育理念和围绕问题组织教学的方法贯穿于本课程的教学全过程。

## 2 课程论文推动研究型教学

我校是石油特色鲜明的工科综合性大学。到目前为止,学校已拥有地质工程、石油工程、油气储运工程、化学工程与工艺等7个教育部特色专业建设点。《物理技术与实践》选修课的学生来源也主要是特色专业的学生。因此,在课程论文的题目选择上,积极引导学生结合自己的专业、爱好和知识背景,从工程领域中基础问题、社会的重大问题甚至是工程技术难点问题或者前沿问题中选择。例如对于我们石油石化行业类的学生,可以启发他们从常规能源、环境等重大问题或者光纤测井等先进技术难题选择适合自己的题目。课程论文不以发表为目标,但整个内容和格式都以发表为标准。尽管单个学生所能做的都只是一个大问题中很微小的一部分。学生在自己的完成课程论文的过程中加深对工程技术领域及社会重大问题的认识,这不仅是培养优秀工程技术人才的好方式,更是一种人文情怀的培育。

课程论文题目的确定一般需要三个步骤:首先是学生根据自己的专业背景、爱好及特点发现感兴趣的现象或问题。其次,就发现的现象或问题进行自己的思考,必要时与授课教师及专业教师交谈,抽象出物理机制、关键词及物理内涵。确定初始化题目。最后,查找文献确保题目的合情合理。在做课程论文的过程中,强调对文献引用的规范。题目完成后进行课程论文答辩,对课程论文进行评判,对存在的问题及时予以纠正,对质量高的课程论文推荐投稿。在学生课程论文的整个过程中,加深学生对物理本质的了解,加强了物理基础课程工程技术领域人才培养的作用。学生的科研意识和科研能力得到了初步训练,是培养优秀的研究型工程技术人才的一个良好的开端。

## 3 演示型实验仪器的制作对培养优秀工程技术人才的作用

《物理技术与实践》课程另外一个重要的实践环节是在教师的指导下进行演示型实验仪器的制作,开发石油石化工程领域中物理演示仪器或者自己感兴趣的物理实验演示仪器。例



如：石油类的石油炼制模型、石油开采磕头机模型、光纤测井演示仪等；非石油类的激光窃听器、超声测距演示仪、太阳能电池、伯努利板演示试验仪等。学生对仪器的制作结合学校的大学生科技创新项目进行。每五个学生为一组，各有分工。我校物理系的北京市科普基地和“翱翔计划”基地实验室为实验研制平台，校团委和物理教学示范中心共同承担仪器的研制经费。学生自己选择实验题目，亲自动手设计或改进演示实验仪器，制作各类物理演示实验仪器。加深了对物理原理的理解，加强对工程技术领域的认识，激发了学生创新欲望，锻炼了学生的动手能力，加强实践环节，把对学生创新意识和创新实践能力的培养融入到课程的教学过程之中。学生们研制出多种优秀的实验仪器和装置，优秀的作品在北京市大学生“挑战杯”、北京市“翱翔计划”、北京市“物理实验竞赛”中多次获奖。其中，学生研究制作的“电动激光李萨如图形演示仪和伯努利综合演示仪”等，受邀参加了第十二届中国北京国际科技产业博览会“首都青年学生科技创新作品展”，作品创意新颖、实用性强，给参观的人们留下了深刻印象，中国教育网还对此进行了报道<sup>[5-6]</sup>。

#### 4 结论

《物理技术与实践》课程是石油石化类特色专业一门很必要的基础课程，该课程与石油工程技术专业的课程有机结合，相互交叉与渗透，突出特色教学和实践，构建良好的创新实践平台，是培养石油石化领域的优秀的工程技术人才的有效途径。我们的改革和实践还处于探索阶段，还存在许多困难和问题，有待于进一步的深入研究。

#### 参考文献：

- [1] 中国石油大学（北京）本科生招生网。<http://jwc.cup.edu.cn/pulic/zsb/index.html/>。
- [2] 杨振清，冯金波，卢贵武，王芳.大学物理（下册）[M]。山东：中国石油大学出版社，2010：170-171。
- [3] 孙为，唐军杰，王爱军，张国林.大学物理实验[M]。山东：中国石油大学出版社，2007：1-4。
- [4] 钟寿仙，张鹏，张万松，卢贵武，赵坤.基础物理课程对石油专业类人才培养初探与实践[J]。内蒙古师范大学学报（教育科学版），2011，24（5）：66-68。
- [5] 中国石油大学（北京）新闻网。<http://web.cup.edu.cn/news/jjxy/25832.htm>。
- [6] 中国教育与科研计算机网。[http://www.edu.cn/xin\\_wen\\_gong\\_gao\\_1114/20090521/t20090521\\_379806.shtml](http://www.edu.cn/xin_wen_gong_gao_1114/20090521/t20090521_379806.shtml)。

# 基于数据挖掘技术在高校教学实践中的应用

姜 芸

（西安交通大学 理学院，陕西 西安 710049）

**摘 要：**数据挖掘的本质就是从已有的信息中发现模式和规律。本文阐述了经典的决策树—ID3 算法，并将该算法应用到高校大学物理实验课程学生成绩评定中，进行数据挖掘的实例分析，从中提取有价值的信息，并对得到的结果进行分析，得出了影响学生成绩的一些原因，为提高高校教学管理水平提供了科学依据。

**关键词：**数据挖掘；决策树；ID3 算法；物理实验；改进与探索

## 1 引言

当今社会，人们利用高速发展的信息技术而产生和收集了大量的数据，在给我们的生活提供很大方便的同时，也带来了一些数据问题，由于积累的数据不断增多，在对数据进行挖掘的过程中对所隐藏的数据知识知道的方法又比较少，使得数据囤积量大爆炸，尽管数据库在技术上不断成熟，可是人们却没有充分的发挥与利用数据库里蕴含的丰富的知识和信息。由于现代社会里数据库的量，在以几何状态不断的生长着，要在数据的汪洋中对信息去粗存精、去伪存真，靠传统方法是不够的，要想高效地管理、组织这些数据并对其进行分析和应用并非是一件易事，这就要求计算机系统能够提供更高层次的数据分析，而数据挖掘则是最有效的方法。数据挖掘（Data Mining）则是知识发现（KDD）的核心部分，它指的是从数据集合中自动抽取隐藏在数据中的那些有用信息的非平凡过程，这些信息的表现形式为：规则、概念、规律及模式等。数据挖掘融合了数据库、人工智能、机器学习、统计学、高性能计算、模式识别、神经网络、数据可视化、信息检索和空间数据分析等多个领域的理论和技术。进入 21 世纪，数据挖掘已经成为一门比较成熟的交叉学科，并且数据挖掘技术也伴随着信息技术的发展日益成熟起来。

## 2 数据挖掘在高校教学实践中的初步应用

在高等学校教学实践中，学生是主体，存在着学生学籍管理、教学仪器管理，以及教师对学生课程管理、成绩管理等各种数据系统。在这些数据库中存储了大量的数据，然而隐藏在这些数据背后的信息一直未得到开发应用。学生是学校的核心，学生的学习成绩作为一种总结性评价，能反映出他们的知识掌握情况和相应知识技能的获得情况，学习成绩是一个加权综合值，它不仅包括书面考试成绩，而且还包括一些人文的考核项目，比如出勤率、课堂表现、各种活动等。学生成绩不仅对学生的学习效果 and 教师的教学效果具有检测作用，而且还能反馈教学活动，反作用于教师的教和学生的学。在诸多高校的教务数据仓库中的学生成绩记录非常庞大，他们对学生成绩的评定分两种：一种是定量评价，一种是定性评价。定量评价也就是我们平时所说的某门课程考了多少分，而定性评价一般分优、良、中、差等四个级别。他们仅仅从单独一门课进行分析，很少关注到学生取得这些成绩背后的影响因素和原因。数据库是从定性的角度分析学生成绩，缺点就是得到的结果不是很精确；而数据仓库是从定量的角度对学生成绩进行分析，能精确的得到各个方面的数据。因此使用数据仓库和数

---

**作者简介：**姜芸（1963—），女，陕西西安人，西安交通大学理学院物理实验中心工程师，主要从事物理实验教学及管理研究及管理工作。

据挖掘技术对学生成绩进行深层的分析,挖掘出隐藏在数据背后的规律或模式,根据挖掘结构提出一些指导性建议,从而更好地指导教师教学,提高教学效率,进而有效地提高学生成绩。

### 3 决策树法中的 ID3 算法

数据挖掘技术主要有集合论法、决策树法、遗传算法、神经网络方法等。决策树法又分为 ID3 算法、CLS 算法、IBLE 算法等。ID3 算法是由 Quinlan 首先提出的,该算法是以信息论为基础,以信息熵和信息增益度为衡量标准,从而实现对数据的归纳分类。

已知有 C 个结果的训练集 S :

$$\text{Entropy}(S) = \sum p(I) \log_2 p(I) \text{ ----- (公式 1)}$$

这里:  $p(I)$  是属于类 I 的 S 的比例。 $\sum$  是对 C 求和。 $\log_2$  以 2 为底的自然对数。

如果所有 S 属于相同的类,熵为 0 (数据分类完毕)。熵的范围是 0 (分类完毕) 到 1 (完全随机)。

注意: S 不但是属性而且也是整个样本集 (这一点刚开始可能有点混淆)。

$$\text{Entropy}(S, A) = \sum (|S_v| / |S|) * \text{Entropy}(S_v) \text{ ----- (公式 2)}$$

这里:  $\sum$  是属性 A 的所有可能的值 v ;

$S_v$  = 属性 A 有 v 值的 S 子集;

$|S_v|$  =  $S_v$  中元素个数;

$|S|$  = S 中元素个数;

$\text{Gain}(S, A)$  是属性 A 在集 S 上的信息增益, 定义为:

$$\text{Gain}(S, A) = \text{Entropy}(S) - \text{Entropy}(S, A) \text{ ----- (公式 3)}$$

$\text{Gain}(S, A)$  是指已知属性 A 的值后导致熵的减少。 $\text{Gain}(S, A)$  越大, 说明选择测试属性 A 对分类提供的信息越多。

### 4 实例分析

通过对大学物理实验课程学生成绩评定的典型实例,说明数据挖掘的步骤及决策树方法在高校教学实践中的应用。

#### 4.1 分析对象

大学物理实验课程基本每学年考核一次,考评由三部分组成:一是课内教学;二是课后实验报告;三是每学年期末考核。整个实验课程主要依据在规定时间内完成的课后实验报告的内容和质量来决定,实验课和期末考核作为较次要的考核内容。上述物理实验教学内容之间的关系,可以建立一个数据模型:学生情况数据库,含学号、性别、实验报告、实验课、期末考核、平均成绩、名次等这些项目。

#### 4.2 已知条件

选择两个班,每班 25 人,两个班 50 人,对学生情况数据库进行如下的量化、转换、清理、集成等处理工作,得到了相应的数据仓库(如表 1 所示),以方便下一步数据挖掘的工作。

表 1 学生情况数据库

学号	性别	实验报告加分	实验课加分	期末考核加分	平均成绩	名次
31	女	0.5	0.5	0.5	91.2	1
27	女	0.5	0.5	0.5	90.7	2
15	男	0.5	0.5	0.5	88.3	3
6	男	0.5	0.2	0	85.6	4

45	女	0.5	0	0	82.8	5
...	...	...	...	...	...	...
3	男	0	0	0	64.1	48
21	女	0	0	0	61.4	49
29	男	0	0	0	60.6	50

学号字段定义为 1—50;

性别字段定义为：男或女;

实验报告加分定义为：0 表示没有通过，0.5 表示通过，1 表示较好;

实验课加分定义为：0 表示基本不上实验课，0.2 表示适当上实验课，0.5 表示按期上实验课;

期末考核加分定义为：0 表示基本不参加期末考核，0.5 表示参加期末考核并取得了较好的成绩;

平均成绩定义为：学习成绩总体情况，字段值为 0-100(%);

名次定义为 1-50，且记录按名次从高到低排列。

### 4.3 数据挖掘

应用 ID3 算法建立相应的决策树，先确定正例个数  $p$  和反例个数  $n$ 。将名次排在前 15 名成绩好的学生定义为正例，后 35 名成绩不好的学生定义为反例，即  $p=15, n=35$ 。

$$I(p, n) = -\frac{15}{50} \log_2 \frac{15}{50} - \frac{35}{50} \log_2 \frac{35}{50} = 0.881$$

$$\begin{aligned} E(\text{实验报告加分}) &= \frac{24}{50} I(p_1, n_1) + \frac{7}{50} I(p_2, n_2) + \frac{19}{50} I(p_3, n_3) \\ &= \frac{24}{50} I(11, 13) + \frac{7}{50} I(4, 3) + \frac{19}{50} I(0, 19) = 0.616 \end{aligned}$$

$$\therefore \text{gain}(\text{实验报告加分}) = I(p, n) - E(\text{实加}) = 0.881 - 0.616 = 0.265$$

$$\text{同理, gain}(\text{实验课加分}) = I(p, n) - E(\text{课加}) = 0.881 - 0.801 = 0.08$$

$$\text{gain}(\text{期末考核加分}) = I(p, n) - E(\text{测加}) = 0.881 - 0.879 = 0.002$$

通过计算可知，实验报告加分具有最大的信息增益，故将实验报告加分选为根节点并向下扩展，最终生成的决策树，如图 1 所示。

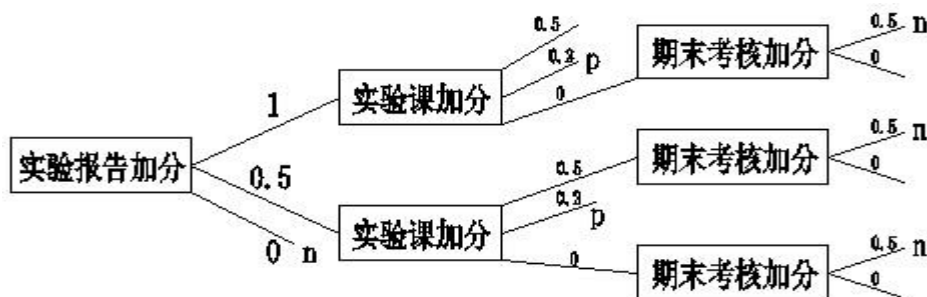


图 1 成绩分析决策树

### 4.4 结论分析

从上图 1 决策树，通过分析，可以得到以下结论：

1) 学生上完实验课后，如按期且独立保质保量完成实验报告，成绩均较好。

2) 学生实验报告完成的较好的，也就是在实验课上动手能力较强，善于思考和分析，可以看出他们在实验的基础上较为重视归纳和总结，均没有过重的课内实验压力，其中课内

实验课安排适度的学生学习成绩也好。

3) 对于刚通过实验报告测评的学生, 情况就显得较为复杂, 要视具体情况而定, 一方面学生的大作业、课内实验、期末考核安排合理时学习成绩也好, 另一方面, 如果学生经常不参加课内实验或不参加期末考核时, 也会影响到他们的学习成绩, 造成学习成绩不好。

根据表 1 和图 1, 对学生情况数据库所建决策树进行分析, 可以初步判别: 实验报告、实验课、期末考核是相辅相成的, 互相影响和制约的, 一般而言, 学习成绩较好的学生, 其实验课和期末考核也是积极参加者。

这样, 教师就可以针对不同的学生, 对学生进行事先辅导, 使教学内容在时间上得到延伸, 学生能够提前预习和掌握实验教学内容, 这样, 就可以减轻学生在实验课上的压力, 既紧张又轻松地完成预期实验。同时, 也要看到, 如果仅重视上实验课和参加期末考核而不重视实验报告同样也会影响到自身的学习成绩。对于大学物理实验这门课程, 学习成绩好的学生, 他们的上进心、责任心也都相对较强, 能够很好地处理上述三者之间的关系; 反之, 对自己约束力较差、经常不上课或不认真完成作业的学生, 学习成绩自然就较差。

## 5 数据挖掘技术的进一步改进与探索

随着越来越多的业务需求被不断开拓, 除上述在高等学校大学物理实验教学实践中的应用外, 数据挖掘技术已成功地应用于商业、医学、科学研究等领域, 均有不少成功的应用案例。多种理论与方法的合理整合是大多数研究者采用的有效技术, 以下是未来比较重要的数据挖掘发展趋势:

1) 数据挖掘语言的标准化描述: 标准的数据挖掘语言将有助于数据挖掘的系统化开发。改进多个数据挖掘系统和功能间的互操作, 促进其在企业和社会中的使用。

2) 寻求数据挖掘过程中的可视化方法: 可视化要求已经成为数据挖掘系统中必不可少的技术。通过人机界面可以在发现知识的过程中进行很好的人机交互。数据的可视化起到了推动人们主动进行知识发现的作用。

3) 与特定数据存储类型的适应问题: 根据不同的数据存储类型的特点, 进行针对性的研究是目前流行以及将来一段时间必须面对的问题。

4) 网络与分布式环境下的 KDD 问题: 随着 internet 不断发展, 网络资源日渐丰富, 这就需要独立的技术人员各自独立地处理分离数据库的工作。因此, 考虑适应分布式与网络环境的关系, 技术及系统将是数据挖掘中一个最为重要和繁荣的子领域。

5) 应用的探索: 随着数据挖掘的日益普遍, 其应用范围也日益扩大, 如生物医学、电信业、零售业等领域。由于数据挖掘在处理特定应用问题时存在局限性, 因此, 目前的研究趋势是开发针对于特定应用的数据挖掘系统。

6) 数据挖掘与数据库系统以及 web 数据库系统的集成: 数据库系统和 web 数据库已经成为信息处理系统的主流。数据挖掘系统的理想体系结构是与数据库和数据仓库系统的紧密结合。

## 6 结束语

数据挖掘技术作为一种新兴的数据分析技术, 经过了十几年的充实和发展, 到目前为止已经成功地运用在各个不同的领域。伴随着科学技术的不断发展和信息量的海量增加, 如依靠传统的方法要在庞大的数据库中找到具有科学决策的信息也是非常困难的, 数据挖掘技术就是从大量的数据中发现有用的知识和线索, 借助于数据挖掘本身的技术去挖掘蕴藏在数据库中的客观规律, 从而为科学合理的决策提供有力的支持。将数据挖掘技术引入到高校教学实践中, 一是发展的必然, 二是有助于在日常教学管理中不断获得有规律的信息, 为学校管理层提供决策依据, 从而不断提高教学质量。本文通过对大学物理实验课程学生成绩评定的

实例分析，简述了数据挖掘技术在分析影响学生学习成绩因素中的重要意义，其目的就是推广数据挖掘技术在高校教学实践中的应用，使数据挖掘技术在高校得到进一步的发展。

**参考文献：**

- [1] 魏萍萍，王翠茹，王保义等。数据挖掘技术及其在高校教学系统中的应用[J]。计算机工程，2003，29(11)：78-89。
- [2] 谭旭，王丽珍，卓明。利用决策树发掘分类规则的算法研究[J]。云南大学学报，2000，22(6)：415-419。
- [3] 朱迪茨。实用数据挖掘[M]。北京：电子工业出版社，2004：77-79。
- [4] 路延。数据挖掘技术在高等学校教学中的应用研究[J]。科技教育，2013，(13)：201。

## **Application of data mining in university teaching practices**

JIANG Yun

(School of science, XI'AN Jiao Tong University, XI'AN 710049, China)

**Abstract:** Finding patterns and regulations from the existential data is the essence of data mining. This paper expounds the classical method-Decision Tree Id3,and this method has been put into the data mining of a application example of higher educational students' grades of college physical experiments. The useful information retrieved can help teaching staff to analyze the results obtained, so as to get the other causes that influence the students' grades, and also provides a scientific basis for college teaching management.

**Key words:** Data mining; Decision tree; ID3 algorithm; Physical experiments; Improvement and exploration

# 第二部分

近代物理与综合实验





# 探究微波在波导中传输时膜片对驻波比的影响

郭 劫, 罗 举, 张志华, 杜 艾, 王晓栋, 方 恺, 赫 丽  
(同济大学 物理科学与工程学院 近代物理实验室, 上海 200092)

**摘 要:** 本文通过测定微波在波导中固定频率, 匹配负载时的传导, 通过改变膜片的特性, 使形成的行驻波发生改变, 在实验的基础上研究了影响行驻波的驻波比的因素。

**关键字:** 驻波比; 感性膜片; 容性膜片

## 1 引言

早在 1933 年, 人们就在实验中发现空心金属管可以用来传输能量, 二次大战期间, 微波技术得到空前发展, 其重要标志是雷达的发明。微波工程设计中, 很多复杂情况最终要通过微波测量来解决。微波在波导中传播, 有行驻波, 行波和驻波三种状态, 不同工作状态在于终端负载的不同情况, 测量驻波比成为一种很重要的手段。在测量匹配负载加膜片时会形成行驻波, 驻波比会因为膜片材料不同而发生相应的改变。本论文选用了不同的膜片(铝片, 铜片, 锡片)进行测量, 从而探究影响驻波比的主要因素。

## 2 实验原理

对于理想的均匀矩形波导系统, 在其中传输的主模是  $TE_{10}$  模, 由于终端负载失配, 波导中有反射波存在, 波导系统中会呈现驻波分布状态。在波导终端负载阻抗不同的情况下驻波分布也会发生改变。实验中, 我们主要是改变膜片的特性, 使得等效阻抗发生一定的改变, 我们可以利用测量线在终端接不同负载时, 测量线各处对应检波电流的值, 描绘出驻波分布特性图, 根据公式  $S = \sqrt{I_{\max}/I_{\min}}$  计算驻波比,  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别是驻波波幅点和波节点检波电流值。

## 3 实验探究

行驻波是微波波导的一种工作状态, 我们将信号源, 测量部分, 以及指示部分相连接, 当一定频率的微波进入矩形波导, 当我们匹配负载, 并加入相应的膜片, 就会形成相应的行驻波。我们通过探针, 测量波导宽边正中壁开口电流的分布, 利用公式  $S = \sqrt{I_{\max}/I_{\min}}$ , 求得驻波比大小, 然后分析影响驻波比大小的因素。

### 3.1 不同材料对驻波比大小的影响

我们在测量匹配负载加膜片时会形成行驻波, 驻波比会因为膜片材料不同而发生相应的改变。我们分别使用了铝片, 铜片, 锡片进行测量, 得出以下的结果。

将信号的工作频率调整为 9550MHZ, 终端匹配负载, 依次加入铜, 铝, 锡材料感性、容性膜片, 移动探针位置, 测定相应位置  $d$  处的电流值, 利用电流值计算驻波比, 如表 1 所示。

**资助项目:** 同济大学教学改革研究与建设项目; 同济大学精品实验项目

**作者简介:** 郭 劫 (1991-), 男, 同济大学物理科学与工程学院 2010 级本科生。

**通讯作者:** 张志华 (1977-), 女, 副教授, 从事凝聚态物理方面研究和大学物理教学工作。

表 1 不同材料感性、容性膜片平均电流极值及驻波比

膜片	材料	最大电流平均值 (微安)	最小电流平均值 (微安)	驻波比
感性膜片	铜	1000	390	1.6013
	铝	973.3	415	1.5315
	锡	953.3	305	1.7680
容性膜片	铜	936.67	600	1.2494
	铝	940	510	1.3576
	锡	950	540	1.3264

从表 1 中可以看出，感性膜片中锡材料驻波比最大，为 1.7680，铝材料驻波比最小，为 1.5315。这是由于材料不同使膜片周围磁力线密度改变，从而影响驻波比。而容性膜片中铜的驻波比更小，为 1.2494，铝材料驻波比最大，为 1.3576。这则是因为铜容性片形成等效电容更小，从而驻波比更小。

### 3.2 探究感性膜片宽度对驻波比的影响

我们在测量匹配负载加膜片时会形成行驻波，驻波比会因为感性膜片的宽度不同而发生相应的改变。匹配负载的高度为 1.034cm，实验中感性膜片高度也是 1.034cm，宽度分别为 1.972cm，1.584cm，1.388cm，1.088cm 进行测量，得出以下结果。

将信号的工作频率调整为 9550MHZ，终端匹配负载，依次加入四组感性膜片，移动探针位置，测定相应位置 d 处的电流值，利用电流值计算驻波比。表 2 显示了感性膜片不同开口宽度平均电流极值驻波比及膜片等效电纳。

表 2 感性膜片不同开口宽度平均电流极值驻波比及膜片等效电纳

膜片开口宽度	最大平均电流	最小平均电流	驻波比	膜片等效电纳
1.972cm	955 微安	785 微安	1.1030	0.515
1.584cm	953.3 微安	305 微安	1.7680	2.807
1.388cm	940 微安	157.5 微安	2.4430	5.114
1.088cm	940 微安	30 微安	5.5979	11.745

从表 2 可以看出，其中膜片等效电纳的测量依照公式：式中  $\alpha$  为匹配负载， $\alpha'$  为开口宽度，不难看出，感性膜片，产生磁场，随着等效电纳增大，驻波比也在增大然而实验中数据组数过少，我们不能定量确定他们之间关系。但我们可以根据表 2 中数据得出膜片等效电纳和驻波比关系图，如图 1 所示。

$$\tilde{B} = -\frac{\lambda_p}{a} \cot^2\left(\frac{\pi\alpha'}{2a}\right)$$

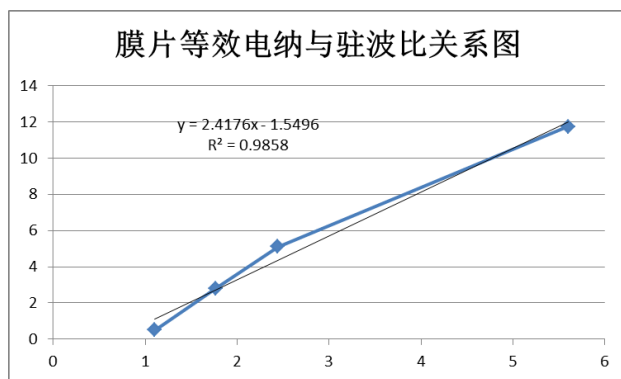


图 1 感性膜片等效电纳与驻波比关系图

### 3.3 探究容性膜片高度对驻波比的影响

我们在测量匹配负载加膜片时会形成行驻波，驻波比会因为容性膜片的高度不同而发生相应的改变。匹配负载的宽度为 2.300cm，实验中容性膜片宽度也是 2.300cm，高度分别为 0.818cm，0.612cm，0.418cm，0.2288cm 进行测量，得出以下结果。

将信号的工作频率调整为 9550MHZ，终端匹配负载，依次加入四组容性膜片，移动探针位置，测定相应位置 d 处的电流值，利用电流值计算驻波比。如表 3 所示。

表 3 容性膜片不同开口高度平均电流极值驻波比及膜片等效电纳

膜片开口高度	最大平均电流	最小平均电流	驻波比	膜片等效电纳
0.818cm	961.7 微安	795 微安	1.0998	0.0099
0.612cm	950 微安	540 微安	1.3264	0.0402
0.408cm	940 微安	260 微安	1.9014	0.0985
0.228cm	966.7 微安	180 微安	2.3174	0.1960

由表 3 可以知道，其中膜片等效电纳的测量依照公式：式中 b 为匹配负载，b' 为开口宽度，不难看出，容性膜片，产生电场，随着等效电纳增大，驻波比也在增大。然而实验中数据组数过少，我们不能定量确定他们之间的关系。我们可以根据表 3 的数据，做出膜片等效电纳和驻波比关系图，如图 2 所示。

$$\tilde{B} = \frac{4b}{\lambda_p} \ln \left[ \csc \left( \frac{\pi b'}{2b} \right) \right]$$

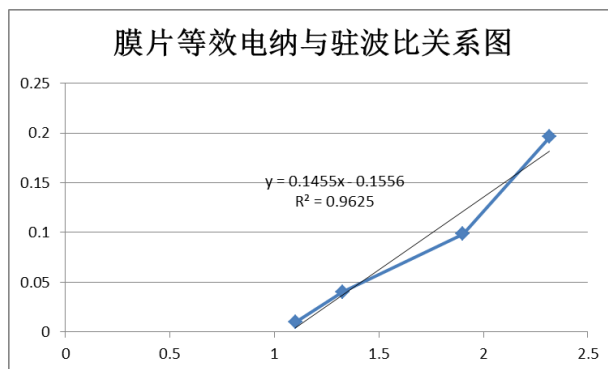


图 2 容性膜片等效电纳与驻波比关系图

### 3.4 探究微波可透射膜片厚度对驻波比的影响

我们知道微波不能穿透金属，但是可以穿透塑料膜以及纸张，我们分别改变纸张层的厚度，以及塑料膜的厚度，使之透射与反射的微波发生改变，从而改变驻波比。

将信号的工作频率调整为 9550MHZ，终端匹配负载，依次加入 1, 2, 4, 8, 16 和 32 层纸，移动探针位置，测定相应位置 d 处的电流值，利用电流值计算驻波比，如表 4 所示。

表 4 不同厚度可透射纸膜片平均电流极值及驻波比

层数	厚度/cm	最大平均电流	最小平均电流	驻波比
1	0.008	975	910	1.0351
2	0.016	986.7	822.5	1.0953
4	0.032	935	690	1.1641
8	0.060	840	392.5	1.4629
16	0.134	831.7	232.5	1.8913
32	0.266	993.3	157.5	2.5114

由表 4 中的数据，可以得出纸张厚度与驻波比关系图，由六组数据得到厚度与驻波比的关系近似为线性，所以我们认为驻波比与可透膜厚度呈线性关系，如图 3 所示。

将信号的工作频率调整为 9550MHZ，终端匹配负载，依次加，2, 4, 8, 16 和 32 层塑料膜，移动探针位置，测定相应位置 d 处的电流值，利用电流值计算驻波比。如表 5 所示。

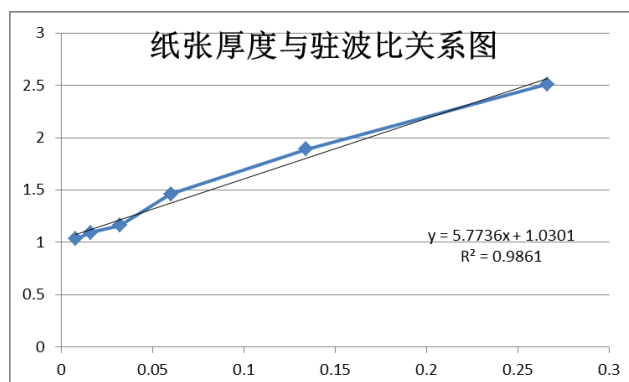


图 3 可透射纸膜片厚度与驻波比关系图

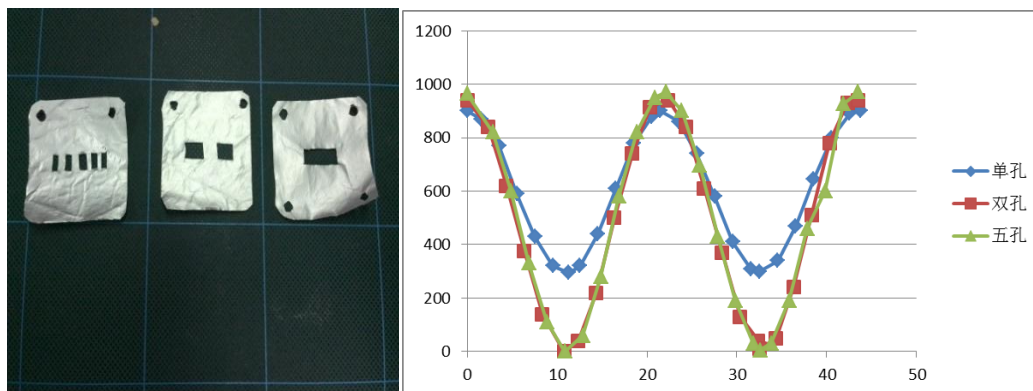
表 5 不同厚度可透射塑料膜平均电流极值及驻波比

层数	最大平均电流	最小平均电流	驻波比
2	960	940	1.0106
4	990	935	1.0290
8	995	920	1.0400
16	960	840	1.0690
32	985	820	1.0960

分析表 5 中的数据，由于微波对塑料的穿透效果很好，所以塑料材料的情况所测驻波比大小全部小与 1.1，基本上可以近似看作行波，但是可以看出随着塑料膜厚度的增加，驻波比也在缓慢增大。根据上面的实验结果，我们可以认为，随着可透射材料厚度的增加，微波的透射率下降，反射率增加，而依照驻波比公式  $S=(1 + R_p)/(1 - R_p)$ ，随着  $R_p$  的增加，驻波比会增大，这与我们所做的结果相吻合。

### 3.5 探究多开口膜片影响驻波比的因素

我们所用的膜片是单开口或多开口的膜片在同样开口面积的情况下，驻波比是否会发生变化，我们分别测量单孔，双孔及五孔膜片时的驻波比。图 4 显示了多开口膜片及其驻波分布特性图，其中（a）为开口膜片形状，（b）驻波分布特性图。将信号的工作频率调整为 9550MHZ，终端匹配负载，依次加入三组膜片，移动探针位置，测定相应位置 d 处的电流值，利用电流值计算驻波比，如表 6 所示。



(a) 开口膜片形状 (b) 驻波分布特性图

图 4 多开口膜片及其驻波分布特性图

表 6 不同开口膜片平均电流极值及驻波比

开口	最大平均电流	最小平均电流	驻波比
单孔	900	297	1.7393
双孔	940	5	13.7113
五孔	968.3	2.5	19.6808

根据表 6 中的数据，由于膜片开口高度相同，总面积相同，我们认为所有膜片容性是相同的，然而，随着开孔数的增多，相当于将电感进行了并联，感抗值减少，电纳只增加，上文中我们已经得出随着电纳值的增加驻波比也会增大，因此，我们可以解释当开口增多时，驻波比增大。

## 4 结语

我们通过测定微波在波导中固定频率，匹配负责的时传导，通过改变膜片的特性，是形成的行驻波发生改变，影响驻波比的主要因素是膜片的反射率，而影响反射率的因素，对于可透射膜片，主要因素是膜片厚度，驻波比随厚度的增加而增大，对于不可透射的金属膜片，主要因素是膜片的电纳值，驻波比随电纳值的增大而增大。金属膜片当膜片开口宽度与波导及匹配负载宽度一致时，体现的是电容性，膜片的电纳值取决与等效电容值，当膜片的开口高度与波导以及负载高度一致时，体现电感性，膜片的电纳值取决于等效电感。

### 参考文献：

- [1] 杜焕民. 声学基础[M]. 3 版. 南京大学出版社, 2012: 156-157.
- [2] 徐金平. 非理想金属感性膜片的等效阻抗[J]. 微波学报, 1992 (3): 38-43.
- [3] 近代物理实验讲义[Z]. 同济大学物理实验中心, 2013: 185-188.

## Explore the effect of diaphragm on standing-wave ratio in microwave transmission in the waveguide

Guo Jie, Luo Ju, Zhang Zhi-hua, Du Ai, Fang Kai, He Li

(Lab of Modern Physics, School of Physical Science and Engineering Tongji University,  
Shanghai 200092, China )

**Abstract:** In this paper we explore the effect of diaphragm on standing-wave ratio by changing the characteristic of the diaphragm, which lead to the change of forming the standing wave when investigating the microwave transmission in a waveguide in the same frequency. The influence factors of standing-wave ratio were also studied on the basis of the experiment.

**Key word:** standing-wave ratio; inductive film; capacitive film

# 蒙特卡罗模拟塑料晶体探测宇宙线 $\mu$ 子的测量

杨通智, 陈 星

(浙江大学 物理系, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 利用修正的海平面 Gaisser 公式模拟天然  $\mu$  子与探测器作用的真实情况, 利用 VS-2010 编译器编制 MC 模拟软件。对于停留在闪烁体中  $\mu$  子的数目, 本软件运行结果与 Geant4 软件运行结果非常接近。对于进入探测器中  $\mu$  子数目: 本软件运行结果大大小于 Geant4 软件运行结果, 停留事例率提高一个数量级。软件运行时间大大缩短, 效率得以提高。

**关键字:** 海平面 Gaisser 公式; 舍选抽样法;  $\mu$  子停留事例率

## 1 引言

宇宙射线  $\mu$  子测量通常是采用延迟符合法测量它的寿命<sup>[1,2,3]</sup>, 根据测量得到的  $\mu$  子寿命值来判断检测到的信号是否是  $\mu$  子。由于大气层的阻挡, 大部分粒子不能到达地面。 $\mu$  子穿透力强, 到达地面的宇宙射线中 80% 都是  $\mu$  子。现在地下实验室, 例如日本的超级神冈探测器, KamLAND, CHOOZ 等等<sup>[1, 3]</sup>, 积累了大量的地下  $\mu$  子实验数据。但是地面上的  $\mu$  子实验数据不多。许多文献中模拟所使用的  $\mu$  子公式都是原始的 Gaisser 公式, 这对于大能量  $\mu$  子地下实验是可以的, 但是对于地面实验, 必须考虑低能粒子。因此需要对 Gaisser 公式进行修正。现在开展  $\mu$  子衰变寿命等实验, 探测的是同一  $\mu$  子的到达与衰变信号。因此只需考虑  $\mu$  子进入并停留在探测器塑料晶体中衰变的信号计数。根据 Bethe-Bloch 计算知道<sup>[2,4,5,10]</sup>: 当塑料晶体尺寸  $\leq 4.7\text{m}$  时, 只需考虑能量  $\leq 1\text{Gev}$  的  $\mu$  子。那些能量  $\geq 1\text{Gev}$  进入的  $\mu$  子都穿过塑料晶体, 对测量  $\mu$  子衰变寿命没有帮助。因此只需考虑能量  $\leq 1\text{Gev}$  的  $\mu$  子能量与通量的关系。用这些  $\mu$  子模拟它与探测器的相互作用。得到停留在闪烁体中  $\mu$  数目和停留事例率, 通过对探测器的模拟, 可以为  $\mu$  子衰变寿命实验提供理论依据。我们用 VC++ 语言编写的蒙特卡罗模拟程序。很好模拟自然  $\mu$  子与探测器作用的真实情况。停留在闪烁体中  $\mu$  数目, 本软件运行结果与 Geant4 软件运行结果非常接近。进入样品中  $\mu$  子数目本软件与 Geant4 软件运行结果<sup>[2]</sup>相比大大少于, 停留事例率提高一个数量级。软件运行时间大大缩短, 抽样效率得以提高。

## 2 模拟物理模型

### 2.1 $\mu$ 子与塑料晶体探测器物质作用的计算

几百 Gev 以下的  $\mu$  子与物质相互作用能量损失主要为电离损失,  $\mu$  子与塑料晶体电离能量损失的公式可用 Bethe-Bloch 公式<sup>[4]</sup>:

$$-\frac{dE}{dx_1} = kz^2 \frac{Z}{A\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \text{Log} \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} \right) - \beta^2 \right]$$

$$\beta = \frac{v}{c}, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, k = 0.30705 (\text{MeV} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^2), T_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma \frac{m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M}\right)^2}, \quad (1)$$

$$h = \beta\gamma$$

**作者简介:** 杨通智(1992—), 男, 浙江大学物理学系 2011 级本科生。

**指导教师:** 陈 星(1962—), 男, 浙江杭州人, 浙江大学物理学系高级实验师, 从事光学、原子结构、核物理等近代物理实验教学与研究。

(1)式中:  $N$  为阿伏伽德罗常数,  $A$  为靶原子的原子质量,  $\beta$  为是入射带电粒子的相对论速度,  $Z$  为靶原子的电荷数,  $z$  为入射粒子的电荷数,  $I$  为介质原子的平均电离能,  $I=10Z(\text{ev})$ ,  $M$  为入射粒子的静止质量。停留在实验室探测器塑料晶体的  $\mu$  子能量可用 Bethe-Bloch 公式计算,  $\mu$  子在探测器塑料晶体能量损失至  $\mu$  子静止能量  $0.105658\text{GeV}$  时,  $\mu$  子就停留在探测器塑料晶体中, 衰变成电子、电子中微子和渺子中微子。动能  $E_k = m_0c^2(\sqrt{1+h^2} - 1)$ 。当  $\mu$  子动能为  $h=10(0.851116\text{GeV})$  时,  $\mu$  子能量为  $0.956774\text{GeV} < 1\text{GeV}$ , 在塑料晶体 (主要成分是苯乙烯  $\text{C}_8\text{H}_8$ ) 射程为  $4.2\text{m}$  左右。一般实验室由于考虑成本问题, 一般不会用这么大的塑料晶体探测器。我们实验室探测器塑料晶体规格:  $40 \times 20 \times 5 (\text{cm}^3)$ 。可以用修正的 Gaisser 公式作为海平面  $\mu$  子概率分布密度函数, 产生一定能量分布的随机数模拟  $\leq 1\text{Gve}$  的  $\mu$  子进入塑料晶体探测器的能量损失情况。

## 2.2 模拟的海平面 $\mu$ 模型

大气层  $\mu$  子概率分布密度函数为修正的双微分流强分布 Gaisser 公式<sup>[1,6]</sup>

$$\frac{dN_{\mu 0}}{dE_{\mu 0}d\Omega} = A \frac{0.14E_{\mu 0}^{-\gamma}}{\text{cm}^2 \text{srsGev}} \times \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1.1\bar{E}_{\mu 0} \cos \bar{\theta}}{115}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1\bar{E}_{\mu 0} \cos \bar{\theta}}{850}} + r_c \right\} \quad (2)$$

$E_{\mu 0}$  为在海平面上测得的  $\mu$  子能量,  $\bar{E}_{\mu 0}$  为在大气层之上测得的  $\mu$  子能量。 $\bar{\theta}$  表示大气层之上粒子入射方向与法线方向的夹角。 $\theta$  为海平面的天顶角,  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi = -d\cos\theta d\phi$ 。

$$\cos \bar{\theta} = \sqrt{\frac{x^2 + p_1^2 + p_2x^{p_3} + p_4x^{p_5}}{1 + p_1^2 + p_2 + p_4}} \quad (3)$$

$$x = \cos \theta$$

使用 MUSIC 宇宙线模拟程序<sup>[1-3]</sup>, 模拟确定的各常数值分别

$$p_1 = 0.102573, p_2 = -0.068287, p_3 = 0.958633,$$

$$p_4 = 0.0407253, p_5 = 0.817285$$

$\gamma = 2.70$ ,  $A = 1$ ,  $E_{\mu 0} = \bar{E}_{\mu 0}$ ,  $r_c = 0$ , 此情况对于  $\frac{100}{\cos \bar{\theta}} < E_{\mu 0} < 10^6 \text{Gev}$  就是原始的 Gaisser 公式<sup>[1]</sup>

$$\frac{dN_{\mu 0}}{dE_{\mu 0}d\Omega} = \frac{0.14E_{\mu 0}^{-2.7}}{\text{cm}^2 \text{srsGev}} \times \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1.1E_{\mu 0} \cos \theta}{115}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1E_{\mu 0} \cos \theta}{850}} + r_c \right\} \quad (4)$$

对于较低的能量  $\frac{1}{\cos \bar{\theta}} < E_{\mu 0} \leq \frac{100}{\cos \bar{\theta}} \text{Gev}$ , 需要对 Gaisser 公式进行如下修正:

$$r_c = 10^{-4} \quad (5)$$

$$\bar{E}_{\mu 0} = E_{\mu 0} + 2.06 \times 10^{-3} \left( \frac{950}{\cos \bar{\theta}} - 90 \right) \text{Gev} \quad (6)$$

$$A = 1.1 \left( \frac{90\sqrt{\cos \theta + 0.001}}{1030} \right)^{4.5 / (\bar{E}_{\mu 0} \cos \bar{\theta})} \quad (7)$$



公式(6)中,  $2.06 \times 10^{-3}$  表示在 50Gev 时, 单位能损 ( $\text{Gev}/(\text{g} \cdot \text{cm}^2)$ )。950 表示大气层的质量厚度 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ),  $\frac{950}{\cos \bar{\theta}}$  表示  $\mu$  子走的倾斜距离,  $90 (\text{g}/\text{cm}^2)$  表示  $\mu$  子的平均作用长度, 即是初级粒子从进入大气层开始到产生  $\mu$  子时, 初级粒子走过的距离。A 叫做比例因子, 其形式非常重要, 注意 A 中能量为  $\bar{E}_{\mu 0}$ , 而不是  $E_{\mu 0}$ 。

当  $E_{\mu 0} < (1 / \cos \bar{\theta}) \text{Gev}$  时, 需要再次修正。

$$E_{\mu 0} \rightarrow \frac{3E_{\mu 0} + 7 \sec \bar{\theta}}{10} \quad (8)$$

此时只需要在计算(2), (5),(6),(7)式之前将(8)式代入即可。(8)式是为了拟合实验数据得到的经验公式。

根据 2,5,6,7,8 式做出  $\mu$  子通量与能量的关系做出图 1。从图 1 可以看出当能量小于 1Gev 时, 与图 2 Super-K 等实验数据一样。通量几乎是平的。

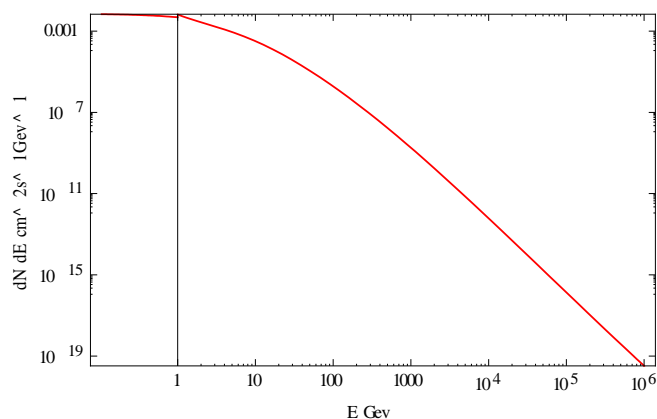


图 1  $\mu$  子通量与能量的关系 (每个能量值已包含整个半球对天顶角积分)

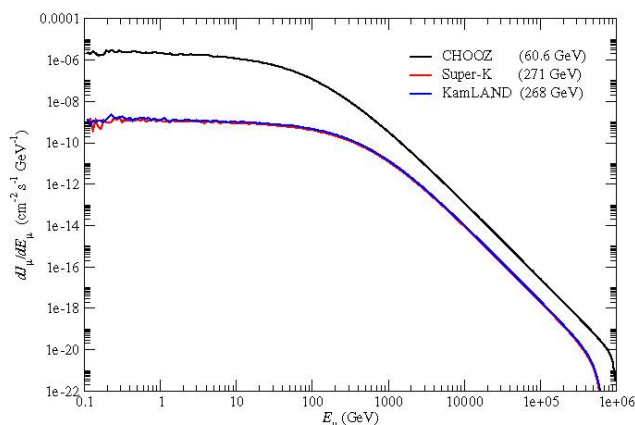


图 2 plots the cosmic muon energy distributions at Super-K, KamLAND, and CHOOZ. (每个能量值已包含整个半球对天顶角积分)

### 3 蒙特卡罗随机抽样方法

#### 3.1 直接抽样方法<sup>[7]</sup>

可以将  $dN/dE \cos \theta$  看成是未归一化的二维概率密度分布函数, 但是由于二维概率密度

分布积分过于复杂，不能直接得到解析的分布原函数，因此不适合用直接抽样法。

### 3.2 舍选抽样法

基本步骤：

- 1) 找出概率密度函数  $f(x)$  在自变量区间  $(a,b)$  之间的最大值  $M$ ;
- 2) 产生两个均匀的 0—1 的随机数  $r1=rand(), r2=rand()$ ;
- 3)  $x=a+r1*(b-a)$ ;
- 4) 比较  $M*r2$  与  $f(x)$  的大小，若  $M*r2 \leq f(x)$ ，则选取  $x$  作为一个随机数点；若  $M*r2 > f(x)$ ，则重复(2)。

反复执行(2)(3)(4)就可以产生足够多的粒子数,此方法很容易推广到二维情况。

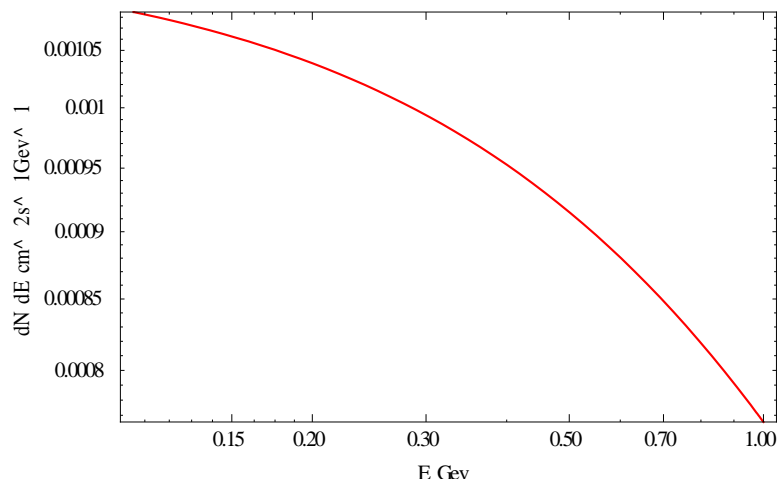


图 3  $\mu$  子  $\leq 1\text{GeV}$  的能量与通量的关系（每个能量值已包含整个半球对天顶角积分，即能量  $E_{\mu 0}$  单微分流强分布）

根据  $\mu$  子在塑料晶体中的射程,只需考虑  $\mu$  子  $\leq 1\text{GeV}$  的能量与通量的关系。为获得按 Gaisser 公式复杂函数形势分布的随机数，选用舍选抽样法；步骤如下：

- 1) 找出二维自变量  $E \in [0.105658, 1], \cos\theta \in [0, 1]$  范围内概率分布函数的最大值  $M$ ;
- 2) 产生三个均匀的 0—1 的随机数  $r1=rand(), r2=rand(), r3=rand()$ ;
- 3)  $\cos\theta=r1, E=(1-0.105658)*r2+0.105658$ ;
- 4) 比较  $M*r3$  与  $f(\cos\theta, E)$  的大小，若  $M*r3 \leq f(\cos\theta, E)$ ，则选取  $(\cos\theta, E)$  作为一个随机数点；若  $M*r3 > f(\cos\theta, E)$ ，则重复(2)。

据此，可以产生一定时间下，天顶角与能量对应通量的随机数。

由图 4 也可以看出能量在  $(0.105658, 1 \text{ GeV})$  之间时，通量基本上相同。因此根据式(2)函数所做舍选抽样结果与图 2 Super-K 等实验数据  $(0.105658, 1 \text{ GeV})$  之间那段通量几乎是平的曲线相吻合。

### 3.3 抽样效率

对概率密度在天顶角余弦值  $\cos\theta \in (0, 1), E \in (0.105658, 1)$  上的二重积分为 0.000810255。易验证概率密度在  $\cos\theta=1$  且  $E=1$  时最大，为 0.00461681，此时总体积为  $0.00461681 * (1-0) * (1-0.105658) = 0.0041294$ ；因而抽样效率为  $\varepsilon=0.000810255/0.0041294*100\%=19.62\%$ ；因而大约每发射 5 个粒子，我们可以选出一个符合条件的粒子。

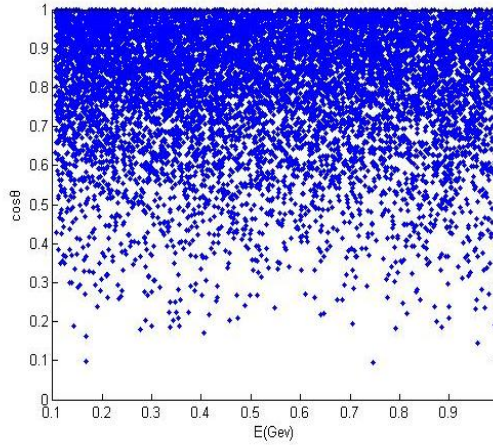


图4 发射 10000 个 muon 子

#### 4 μ子射向塑料晶体的模拟

构筑 μ子从球面射向探测器塑料晶体模型,如图5,半球面球心与长方体探测器底面中心重合,长方体塑料晶体,长 a, 宽 b, 高 c (单位: cm),要使半球面全部覆盖长方体,球面半径 R 的平方必须大于  $(a^2 + b^2 + c^2)/4$  平方厘米。

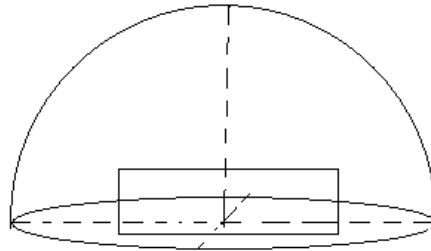


图5 μ子从球面射向塑料晶体探测器

##### 4.1 程序计算的步骤

1) 计算 μ子 (0, 1 GeV) 之间通量 J。计算图三  $\leq 1\text{GeV}$  面积并对整个立体角积分<sup>[1,3]</sup>

$$J = \int_{\Omega} \frac{dN_{\mu 0}}{dE_{\mu 0} d\Omega} = 0.00509098 \text{ (cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{GeV}^{-1}\text{)}$$

从而 1 小时之内小于 1Gev 的 μ子数为:

$$0.00509098 \times 60 \times 60 \times R^2 = 18.3275R^2 \quad (9)$$

此即为一小时之内发射的 μ子数, R 为选取的球面半径。

2) 用上面介绍的舍选抽样法抽样出一个符合分布的 μ子,得到相应随机点(E, cosθ)。

3) 初始 μ子位于球面上任意一点 A(X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>)(等概率, 随机生成 θ<sub>1</sub>, φ<sub>1</sub>)

$$\begin{cases} X_0 = R \sin \theta_1 \cos \phi_1 \\ Y_0 = R \sin \theta_1 \sin \phi_1 \\ Z_0 = R \cos \theta_1 \end{cases}$$

4) 让  $\mu$  子从球面初始位置  $A(X_0, Y_0, Z_0)$ ，并以步骤(二)中抽样出来的天顶角  $\theta$ ，随机的方位角  $\phi$ ，步骤(二)中抽样出来的能量  $E$  朝探测器方向发射。粒子运动过程的位置表达式为：

$$\begin{cases} X_1 = X_0 - \delta d \sin \theta \cos \phi \\ Y_1 = Y_0 - \delta d \sin \theta \sin \phi \\ Z_1 = Z_0 - \delta d \cos \theta \end{cases}$$

$\delta d$  为  $\mu$  子运动的步长。如果粒子位置满足条件  $X_1 \leq a/2$ ， $Y_1 \leq b/2$  并且  $Z_1 \leq c/2$  认为粒子进入探测器中，统计进入探测器的粒子数。

粒子进入探测器后，开始损失能量。根据 Bethe-Bloch 公式，用变步长辛普森求积分的方法求出当动能减为 0 时，粒子的射程  $L$ 。

$$\begin{cases} X_1 = X_0 - L \sin \theta \cos \phi \\ Y_1 = Y_0 - L \sin \theta \sin \phi \\ Z_1 = Z_0 - L \cos \theta \end{cases}$$

5) 判断  $\mu$  子是否进入探测器中判据？ $\mu$  子是否停留在探测器的中判据？

如果： $(X_1 \leq a/2) \&\&(Y_1 \leq b/2) \&\&(Z_1 \leq c/2)$  则进入探测器的  $\mu$  子数  $N_1$  增加 1。

如果： $(X_1 \leq a/2) \&\&(Y_1 \leq b/2) \&\&(Z_1 \leq c/2) \&\&(E \leq 0.105658 \text{ GeV})$  则进入探测器的  $\mu$  子损失至  $\mu$  子静止能量时停留在探测器的粒子数  $N_2$  增加 1；

重复执行 2),3),4)，直到发射完毕所有的粒子数。

6) 由于蒙特卡罗方法的随机性，还需要独立重复上面所有步骤 10 次，最后求平均。

#### 4.2 MC 模拟程序流程图

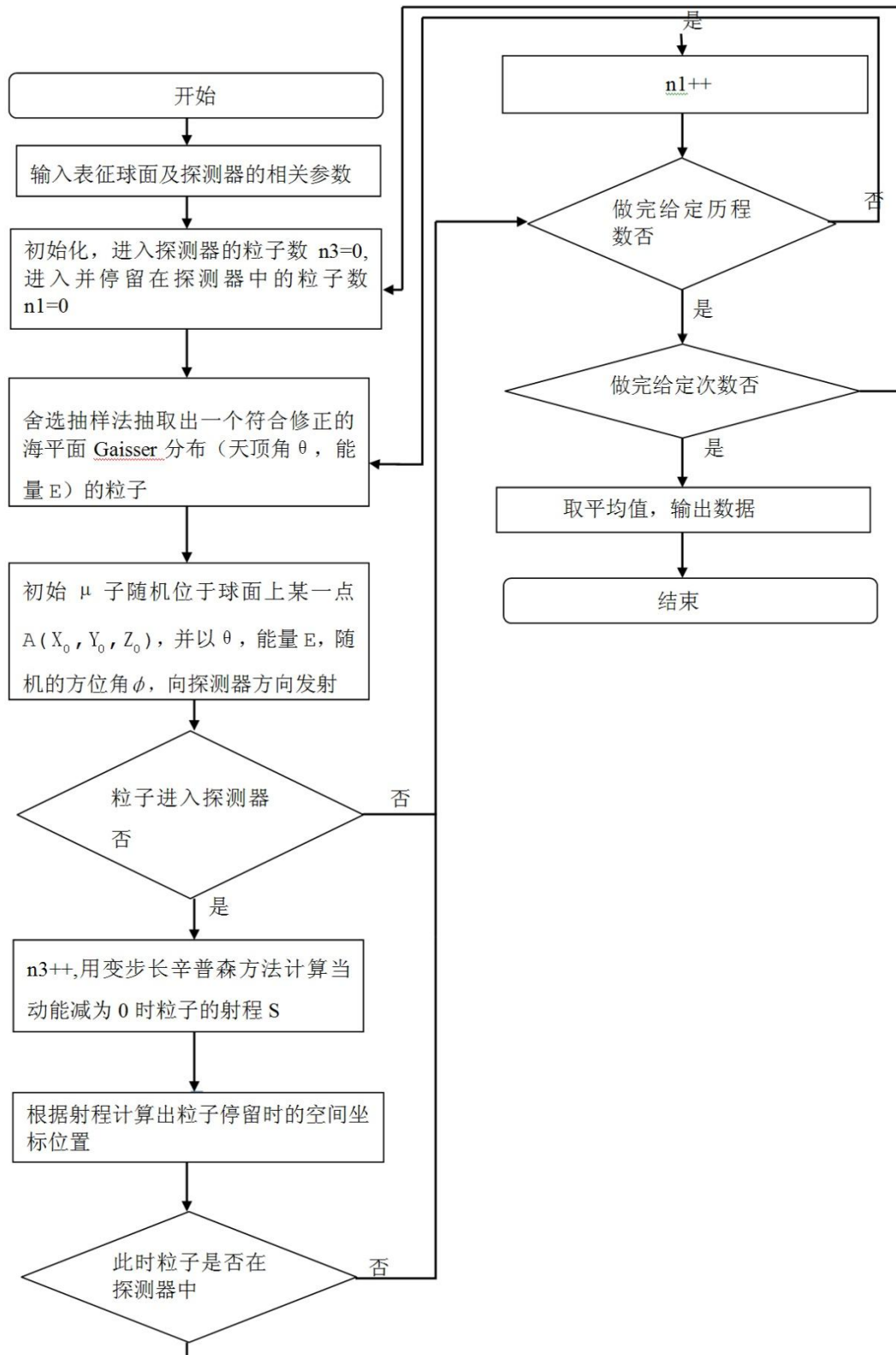


图 6 模拟程序流程图

### 4.3 料晶体探测器模拟结果与讨论

不同的球面半径发射不同的粒子，由公式（7）计算。半径越大，发射的粒子数越多，没有进入探测器的粒子数也越多。假设由不同的球面半径发射粒子，停留在探测器里面的粒

子数基本相同，且停留在探测器里面的粒子数就是我们所需要的结果。

表 1 塑料晶体样品 CJ259-400\*200\*5(产品编号 10-K-47)参数<sup>[2,4]</sup>

样品	密度 g/cm <sup>3</sup>	尺寸 cm <sup>3</sup>	主要成分
1	1.06	40*20*5	苯 乙 烯 C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>
2		30*15*15	
3		10*10*20	
4		15*15*20	
5		20*20*20	

模拟自然条件下经历 1 小时的情况。

```

输入所做的平均次数:
10
输入组成靶物质的元素的核电荷数z1 z2
以及此化合物一个分子中分别含有的原子个数m1 m2
例如化合物C8H8 应该输入 6 1 8 8
6 1 8 8
请输入靶物质的密度(g/cm^3),及分子质量(A1):
1.06 104
请输入探测器的尺寸 长, 宽, 高(单位: cm 长宽面朝上):
40 20 5
请输入球面半径(单位:cm,可以不是整数),但是必须大于等于23cm
73.8666
自然条件下,在一定时间内会有一些的粒子数经过球面,请输入你想输入的时间(单位:h,可以是小数)
1
所发射的粒子数为100000
输入精度:
0.001
进入探测器的粒子数为2146
沉积在探测器中的粒子数为93
进入探测器后又逸出的粒子数为2052
程序运行时间为39.190000 s
    
```

图 7 样品 1 运行情况（发射 100000 个  $\mu$  子）

由表 2，可以看出，每一次发射粒子停留在探测器里面的粒子数、停留事例率偏差都不大。这些偏差是由于蒙特卡罗方法本身的随机性，因此我们建立的模型是正确的，自然条件下，经历 1 小时，停留在我们的探测器的粒子数平均为：95 个；平均停留事例率为 4.363%。

表 2 样品 1 不同球面半径 R，模拟自然条件下经历 1 小时运行结果和  $\mu$  子平均停留事例率<sup>[2,4]</sup>

球面半径(R) 单位: cm	发射粒子数	进入探测器的粒子数	停留在探测器的粒子数	停留事例率
40.0000	29325	2237	93	4.157%
60.0000	65980	2166	94	4.340%
73.8666	100000	2146	93	4.334%
80.0000	117297	2154	96	4.457%
90.0000	148453	2138	94	4.397%
100, 0000	183276	2158	97	4.495%

```

输入所做的平均次数:
10

输入组成靶物质的元素的核电荷数z1 z2
以及此化合物一个分子中分别含有的原子个数n1 n2
例如化合物C8H8 应该输入 6 1 8 8
6 1 8 8

请输入靶物质的密度(g/cm^3),及分子质量(M1):
1.06 104

请输入探测器的尺寸 长, 宽, 高<单位: cm 长宽面朝上>:
30 15 15

请输入球面半径<单位:cm,可以不是整数>,但是必须大于等于19cm
73.8666

自然条件下,在一定时间内会有一定的粒子数经过球面,请输入你想输入的时间<单位:h,可以是小数>:
1

所发射的粒子数为100000

输入精度:
0.001

进入探测器的粒子数为1697
沉积在探测器中的粒子数为116
进入探测器后又逸出的粒子数为1581

程序运行时间为24.390000 s
    
```

图 8 样品 2 运行情况（发射 100000 个  $\mu$  子）

表 3 样品 2、3、4、5、6 停留样品中  $\mu$  数目本软件运行结果与 Geant4 软件运行结果比较（发射 100000 个  $\mu$  子）<sup>[2,4]</sup>

样品		本软件	Geant4 软件
样品 2	停留在闪烁体中 $\mu$ 数目	116	114
样品 3		42	49
样品 4		73	70
样品 5		121	117

表 4 样品 2、3、4、5、6 进入样品中  $\mu$  数目本软件运行结果与 Geant4 软件运行结果比较（发射 100000 个  $\mu$  子）。停留事例率 K /hour %

样品		本软件	K /hour %	Geant4 软件	K /hour %
样品 2	进入探测器的粒子	1703	6.811%	20198	0.5644%
样品 3		897	6.752%	7117	0.6885%
样品 4		1096	6.660%	13114	0.5338%
样品 5		1669	7.250%	20198	0.5703%

从表 3 看到，停留样品中  $\mu$  数目本软件运行结果与 Geant4 软件运行结果非常接近。表 4 看出：进入样品中  $\mu$  数目本软件与 Geant4 软件运行结果相比大大少于，停留事例率提高一个数量级。原因是本软件根据 Bethe-Bloch 公式计算表明塑料晶体尺寸  $\leq 4.7\text{m}$  左右时，只需考虑能量  $\leq 1\text{GeV}$  的  $\mu$  子。软件运行时间大大缩短，抽样效率可以提高。

模拟与实验相对照，验证程序的正确性。验证完毕后，就可以利用程序，停留样品中  $\mu$  数目本改变探测器尺寸，找出最佳探测器尺寸

## 5 结束语

$\mu$  子寿命测量虽然已经有好几种可行方案<sup>[2,4,8,9]</sup>。实验数据与真实情况是否符合？用蒙特卡罗方法模拟产生随机  $\mu$  子方法。可以指导方案改进。使实验数据分布和实际的  $\mu$  子分布相吻合。

参考文献:

- [1] Alfred Tang and Glenn Horton-Smith Muon simulations for Super-Kamiokande, KamLAND, CHOOZ, Phys. Rev. D74, 2006,053007.
- [2] 吕治严, 李澄, 吴雨生。宇宙线  $\mu$  轻子寿命测量实验和电子学设计[J]。核电子学与探测技术, 2010, 30(1): 96-100。
- [3] T K Gaisser, T Stanev. Phys. Lett.B, 2004, 592: 228.
- [4] 吕治严。宇宙线  $\mu$  子寿命测量实验及电子学设计[D]。合肥: 中科大近代物理系, 2009。
- [5] 汪晓莲, 李澄, 邵明, 等。粒子探测技术。合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009。
- [6] 谭新建, 冯朝阳, 谢一冈, 等。宇宙线  $\mu$  用于反应堆燃料元件成像的尝试性模拟研究[J]。原子能科学技术, 2010, 44(3): 344-347。
- [7] 任少军, 桑文斌, 金玮, 等。CdZnTe 核探测器的蒙特卡罗模拟的初步研究[J]。高能物理与核物理, 2004, 28(2): 191~195。
- [8] 林延畅, 陈少敏, 高原宁, 等。 $\mu$  子寿命测量与高能物理实验创造性人才的培养[J]。实验技术与管理, 2008, 25(9): 19。
- [9] 程敏熙, 符合测量实验方法研究[J]。大学物理, 2008, 21(6): 28。
- [10] 车彦明, 陈拓, 陈星。 $\alpha$  粒子能损法精确测量膜厚[J]。物理实验, 2010, 30(12): 24~27。

## Monte carlo simulation of plastic crystal detection of cosmic ray muons measurement

Yang Tong-Zhi, Chen Xing

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The sea level correction formula to simulate the real situation Gaisser child and probe the role of natural  $\mu$ , using VS-2010 Compiler preparation of MC simulation software. For the number of stay in the scintillator  $\mu$  son, the software operating results and operating results are very close Geant4 software. For entering the number of sub-detectors  $\mu$ : This software is much less than the results Geant4 software operating results, the rate stays case an order of magnitude. Software running time is shortened, the efficiency can be improved.

**Key words:** sea Gaisser formula; Choose sampling method;  $\mu$  Stay case rate



# 光子计数器在液芯光纤谱仪中的应用

陆国会, 卢杰

(吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 将光子计数器应用于液芯光纤光谱仪中, 改善了信噪比, 提高了拉曼谱的测试灵敏度, 降低了仪器的成本和体积。在拉曼光谱的测试中取得了理想的效果。

**关键词:** 光子计数器; 液芯光纤谱仪; 拉曼光谱

## 1 引言

在光谱测试仪器中光信号提取是仪器研制的重点和难点, 应根据信号的强弱选择相应的探测器件及探测方法。而其中弱光信号的处理则要求更高。弱光信号很容易被环境和探测器及电路的噪声所掩盖, 因此需要有从噪声中提取, 恢复和放大信号的技术措施。通常的噪声是随机的, 分布在很宽的频谱范围内。它们的频谱分布和信号的频谱分布不相重叠, 也没有同步关系。因此可以采用压缩通频带和信号多次同步取样积累的技术, 可以明显改善信噪比。一般采用锁相放大技术, 取样积分器, 光子计数器技术。而当光功率为  $10^{-17}\text{W}$  时, 光子通量约为 100 个光子/秒<sup>(1)</sup>, 这比普通的光电倍增管的噪声还要低, 即使采用弱光调制, 用锁相放大器来提取信号也难以实现, 而光子计数器由于采用分立的光子产生的电脉冲来测定光通量, 由此倍受人们的青睐。我们把这一技术应用于液芯光纤谱仪中收到了良好的效果。

## 2 液芯光纤谱仪

液芯光纤谱仪是应用于液态或溶于液态的物质的拉曼谱的测试。液芯光纤是将待测样品注入极细的空心光纤内, 然后将激发光耦合入光纤内, 形成光波导。这种方法具有信号强度高, 信噪比高及使用样品数量少的特点, 在测试拉曼光谱是具有极大的优越性, 倍受人们的关注。一般在测试普通拉曼光谱时可以提高光谱强度 103 数量级<sup>(2)</sup>, 如采用共振拉曼或受激拉曼则可以提高 106~109 数量级<sup>(3)</sup>。该仪器与普通的光纤光谱仪具有本质的区别, 一般的光纤光谱仪是将光纤作为传光介质, 而该仪器所用的光纤具有信号增强及样品池的双重作用, 特点鲜明。该仪器有光源, 液芯光纤, 光耦合器, 光栅单色仪, 光子计数器及计算机控制等部分组成, 其结构图如下:

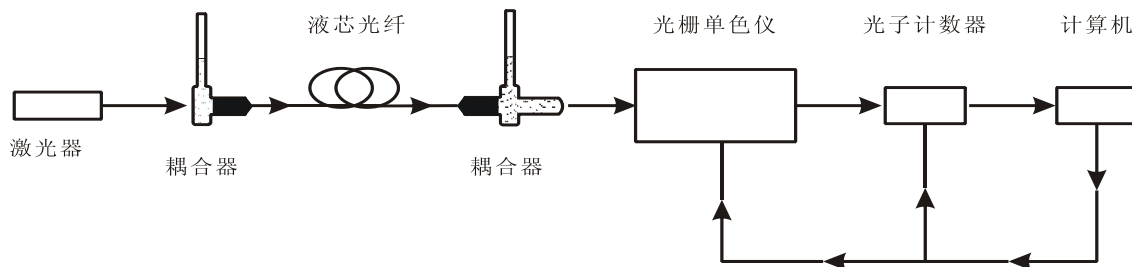


图1 液芯光纤光谱仪原理图

## 3 光子计数器

光子计数器是测量弱光的一种最灵敏的方法之一。首先, 它是通过分立光子产生的电脉冲来测定光量, 因此系统的灵敏度高, 信噪比较高, 由于采用电脉冲计数技术, 降低了对供

电电源的要求,从而提高了系统的稳定性。其次,排除了直流漏电和输出零漂等原因造成的测量误差。光子计数器的输出可以直接送计数卡供计算机采集数据。

### 3.1 工作原理

光子计数技术一般用与测量小于  $10^{-14}$  连续弱光信号,假如我们测试的拉曼光谱的强度是  $10^{-14}$ W,其激发光的波长为 532nm,那么它发射的光子速率为

$$n = \frac{10^{-14}}{h\nu} = \frac{10^{-14} \times \lambda}{hc} = \frac{10^{-14} \times 532 \times 10^{-9}}{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 2.7 \times 10^4 (\text{个/秒})$$

其中:  $\nu$  为光波频率,  $\lambda$  为波长,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速。以下为其原理图 2:

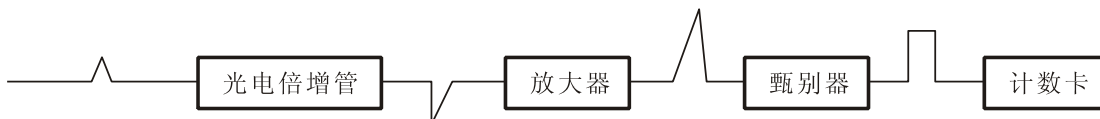


图 2 光电计数器信号处理原理

当  $n$  个光子照射到光电阴极上,如光电阴极的量子效率为  $\eta$  那么会发射  $\eta \times n$  个分立的光电子。每个光电子被电子倍增极放大,到达阳极的电子数可达  $10^5 \sim 10^7$  个,这些电子构成宽度 5~10nm 输出脉冲,它的幅值按中间值计算为:

$$I = \frac{Q}{T} = \frac{10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{10 \times 10^{-9}} = 16 \times 10^{-6} (A)$$

把幅值经放大器放大,甄别器比较后就可以为计数卡计数。

实际上,光电倍增管的输出端除了光子形成的脉冲外还有其他的几种脉冲,(1)光电阴极发射的热电子噪声,它和光电子的一样,经倍增极放大,形成幅值相同的电脉冲。(2)各倍增极发射的热电子脉冲,它的幅值小于光电子脉冲的幅值。而只计那些光电子和阴极热电子的脉冲。为了从光子和热电子发射的脉冲总数中分离出光子数,通常采用冷却光电倍增管和选取低噪声的光电倍增管的方法。

### 3.2 光电倍增管的挑选

我们选择了北京滨松光电有限责任公司生产的 CR110 型光电倍增管,它的特点是铯钨光阴极,硼硅玻壳,II 极倍增,端窗型,高灵敏度,高稳定性,低暗噪声,光电疲劳特性小,300~650nm 光谱响应,其光谱响应曲线和灵敏度见下图:

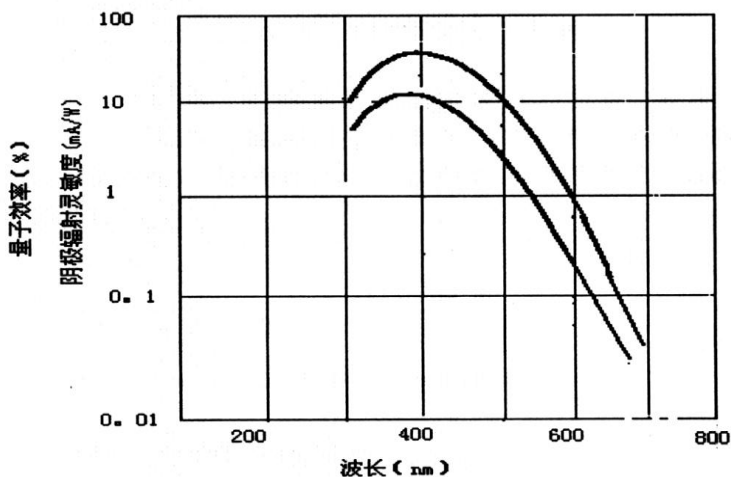


图 3 典型光谱响应曲线

我们测试的拉曼谱位于可见波段 500~600nm，因此完全满足设计要求。

### 3.3 放大器和甄别器的选择

放大器采用 AD8032，它是一个双运放，放大倍数大于 100 倍，频宽 80MHz，甄别器采用 Max902EPD，它是高速，低功耗，对于 100mV 的弱输入信号也能够工作，而且波形稳定，工作可靠。甄别器选择比较电压正好能够抑制倍增极的热电子噪声，而能够让光电子的脉冲和光阴极的热电子脉冲通过，而光阴极的热电子脉冲已通过光电倍增管的冷却和挑选得以解决，计算机则可通过 PCL839 计数卡实现单位时间的光电子脉冲计数（光谱）的记录而完成数据的采集。

光子计数器由于使用的器件比较少，电路简单，因此可以明显减少仪器的体积及制造的成本，这对液芯光纤谱仪的商品化及推向市场非常有利。

## 4 拉曼光谱的实际测试

我们采用光子计数技术完成了液芯光纤拉曼谱仪的信号接收与采集，保证了该仪器的成功研制。以下是我们测试的一条苯的拉曼光谱曲线，其中有些弱的振动谱线也能够测试出来。

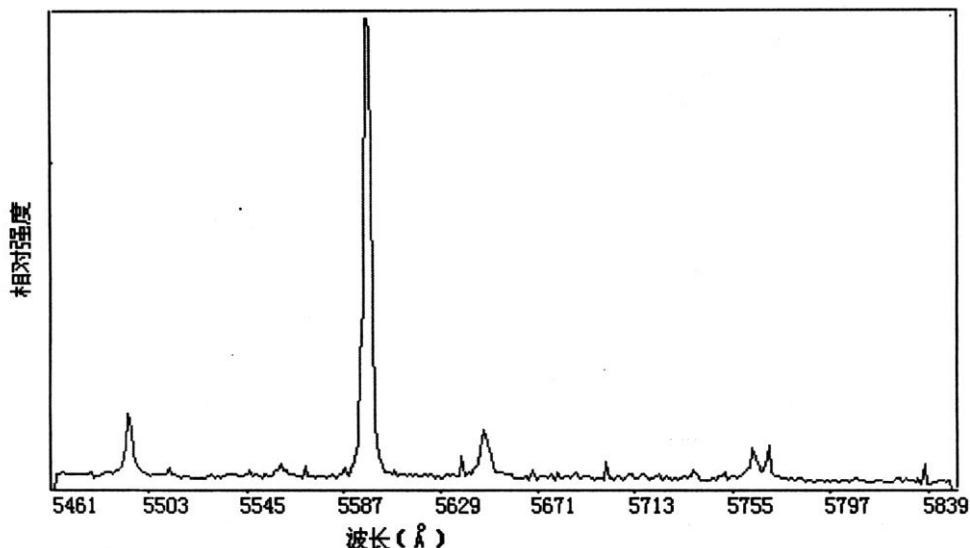


图 4 C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> 的拉曼光谱图

## 5 结论

我们设计的光子计数器，能够满足测试拉曼谱的要求，光电倍增管的灵敏度与测试拉曼谱达到最佳的匹配，放大器与甄别器能够满足频率特性，对弱的谱线也能够测试出来，效果比较理想。该系统如能在光电倍增管冷却及放大器性能等方面得以改进，则可以广泛用于其他的弱光信号的测试中。

### 参考文献：

- [1] 光电技术. 缪家鼎, 等. 99-100.
- [2] Li Zuo, Wei et al. Chinese Physics Letter, 1993, 10(10): 409.
- [3] Li Zuo, Wei et al, Spectroscopy Letter, 2001, 34(5): 569.

## Photon counting applied to Raman Spectrometer of core optics fiber

LU Guo-Hui, LU Jie

(Physics department, Jilin University, ChangChun 130021, China)

**Abstract:** Photon counting is applied to the spectrometer of Raman spectrum of core fiber, which improves the signal-to-noise ratio and decreases the volume of spectrometer and cost. The result of testing is very good.

**Key words:** photon counting; Raman spectrometer of core fiber; Raman spectrum

# $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ 射线铅的吸收系数测量实验的数据拟合法

张国强, 边 纪, 方 恺, 张志华, 杜 艾, 赫 丽

(同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092)

**摘 要:** 本文介绍了一种计算  $^{60}\text{Co}$  的  $\gamma$  射线物质吸收系数的新方法。利用 NaI(Tl) 闪烁晶体探测器测量  $^{60}\text{Co}$  元素放射的 1.17 MeV 和 1.33 MeV 两种  $\gamma$  射线的初始强度比, 通过数据拟合法和分别测量法两种方法测定了铅片对两种  $\gamma$  射线各自的吸收系数, 并分别将两种测量单能射线吸收系数的方法得出的结果同标准吸收系数进行了比较, 新的数据拟合法优于原来的分别测量法。

**关键词:** 数据拟合法; 吸收系数;  $^{60}\text{Co}$ ;  $\gamma$  射线

## 1 引言

$\gamma$  射线吸收系数的测定实验是《近代物理实验》课程里的实验内容, 实验内容包括利用 NaI(Tl) 闪烁晶体探测器测定  $^{137}\text{Cs}$  的能量为 0.661 MeV 的  $\gamma$  射线以及  $^{60}\text{Co}$  的能量为 1.17 MeV 和 1.33 MeV 的  $\gamma$  射线吸收系数<sup>[1-3]</sup>。其中, NaI(Tl) 闪烁晶体探测器得到的  $^{137}\text{Cs}$  能谱中只有一个全能峰, 数据处理时扣除能谱图的本底后, 利用相应公式通过最小二乘法进行数据拟合就可以获得吸收系数。 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线包含能量为 1.17 MeV 和 1.33 MeV 射线, 相应的在 NaI(Tl) 闪烁晶体探测器得到的  $^{60}\text{Co}$  能谱中就有两个全能峰。教材中介绍了两种数据处理的方法: 第一种方法是分别测量法: 分别取 1.17 MeV 和 1.33 MeV 射线的全能峰进行计算, 获得两种射线各自的吸收系数。这种方法中, 由于两种射线的能量相差不大, 全能峰的谱线相互重叠, NaI(Tl) 闪烁探测器对  $\gamma$  射线很灵敏, 造成本底计数比较高, 无法准确地扣除本底, 难以准确获得两个全能峰各自的吸收系数。第二种方法是整体测量法: 将两个全能峰作为一个整体来处理, 测量能量为 1.25 MeV 的综合峰。这种方法虽然解决了由于全能峰能谱相互交叠的问题, 但无法单独确定两种能量峰的吸收系数。

我们基于以上两种方法, 找到了一种新的数据处理方式, 既可以分别测定  $^{60}\text{Co}$  1.17 MeV 和 1.33 MeV 的  $\gamma$  射线吸收系数, 同时又可以成功避免由于全能峰交叠带来的本地扣除的问题。在新的方法中, 首先测定  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线中两种不同能量射线的强度比; 然后测定整体射线吸收系数与铅片的厚度之间的关系; 再通过数据拟合, 就可以求得两种射线各自的吸收系数。利用这种新的方法测得的吸收系数, 其相对误差小于原有的实验方法获得的结果。

## 2 实验原理

### 2.1 NaI(Tl) 闪烁晶体探测器工作原理

NaI(Tl) 闪烁晶体探测器由闪烁体、光电倍增管和相应的电子仪器三部分组成<sup>[3]</sup>。探测器的前端是 NaI 闪烁晶体, 当射线进入闪烁体时产生次级电子, 使闪烁体分子电离和激发, 退激发时产生大量光子。当闪烁光子入射到光电倍增管阴极上, 由于光电效应就会产生光电子。光电子受极间电场加速和聚焦, 在各级打拿极上发生倍增, 最后被阳极收集后产生电流脉冲。

### 2.2 $\gamma$ 射线的物质吸收系数

$\gamma$  跃迁可定义为核由高激发态到较低的激发态, 而原子序数和质量数均保持不变的退激发过程。 $\gamma$  射线与物质的相互作用在单次事件中便能导致完全的吸收或散射。我们研究的对象为窄束  $\gamma$  射线, 不考虑散射成分, 并可认为窄束  $\gamma$  射线穿透物质时能量不变, 而强度逐渐减弱。

$\gamma$  射线强度随厚度的衰减服从指数规律<sup>[4]</sup>，即：

$$I = I_0 e^{-ux} = I_0 e^{-uR/\rho} \quad (1)$$

上式中， $I_0$ 、 $I$  分别为穿过物质前后  $\gamma$  射线强度， $x$  是物质厚度， $u$  是该物质线性吸收系数。为了消除密度影响，引入质量厚度  $R = \rho x$  来表示吸收体厚度，其中  $\rho$  为物质的密度。由于在相同实验条件下，某一时刻计数率  $N$  总与该时刻的  $\gamma$  射线强度  $I$  成正比，则

$$N = N_0 e^{-uR/\rho} \quad (2)$$

则吸收系数  $u$  为

$$u = -\frac{\rho}{R} \ln \frac{N}{N_0} \quad (3)$$

这种求吸收系数的方法可应用于计算具有单一能量的  $\gamma$  射线（如  $^{137}\text{Cs}$  放射源发出的  $\gamma$  射线）的吸收系数。

$^{60}\text{Co}$  放射源发出的  $\gamma$  射线包含能量为 1.17MeV 的射线 1 和能量为 1.33MeV 的射线 2，利用（2）式可得：

$$N_0 e^{-ux} = N_0 \alpha e^{-u_1 x} + N_0 (1 - \alpha) e^{-u_2 x} \quad (4)$$

其中， $u_1$ 、 $u_2$  分别为该材料对单能射线 1、射线 2 的吸收系数， $\alpha$  与  $1 - \alpha$  分别为射线 1、射线 2 的初始射线强度与总强度之比。由（4）式得：

$$u = \frac{\ln[\alpha e^{-u_1 x} + (1 - \alpha) e^{-u_2 x}]}{-x} \quad (5)$$

其中

$$\alpha = \frac{I_{10}}{I_0} = \frac{N_{10}}{N_0} \quad (6)$$

可以通过测定初始时两种射线强度确定  $\alpha$ 。

显然，这时的吸收系数  $u$  与物质厚度  $x$  有关。测定了  $u$  和  $x$  之间的关系后，就可以利用数值拟合的方法，确定两种射线各自的吸收系数  $u_1$  和  $u_2$ 。

### 3 实验内容和数据处理

#### 3.1 实验内容

本实验中，实验装置和器材包括：① $\gamma$ 放射源 $^{60}\text{Co}$ （强度 $\approx 1.5$ 微居里）；②200 mAl窗NaI(Tl)闪烁探头；③Pb吸收片若干。实验调节和测量步骤包括：1) 调整实验装置，使放射源、准直孔、闪烁探测器的中心位于一条直线上；2) 在闪烁探测器和放射源之间加上0、1、2……片已知质量厚度的吸收片，进行定时测量，并保存实验谱图；3) 计算所要研究的光电峰净面积 $A_i$ ， $A_i$ 对应公式中的 $I_i$ 、 $N_i$ ，其值为总面积 $A_g$ 和本底 $A_b$ 的差值；4) 分别用数据拟合法和原来的分别测量法计算两种射线的吸收系数，与两种射线的标准吸收系数进行比较。

#### 3.2 数据处理方法

本实验中，数据处理的关键是双峰净面积的确定。如图 1 所示，分别测量法测量  $^{60}\text{Co}$

的双能射线吸收系数时， $A_1$  和  $A_2$  分别为全能峰 1 和峰 2 的净面积， $A_a$  和  $A_b$  为相应的本底。数据拟合法确定的测量  $^{60}\text{Co}$  的双能射线吸收系数时，总的净面积为全能峰 1 和峰 2 的净面积之和，总的本底为全能峰 1 和峰 2 的本底之和。

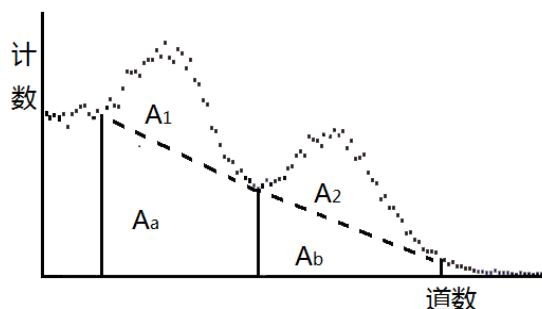


图 1  $\text{Co}$  源双峰本底示意图<sup>[3]</sup>

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 确定 1.17MeV 射线强度与总射线强度比值 $\alpha$

在放射源和 NaI (TI) 单晶  $\gamma$  闪烁晶体探测器之间不放置铅板时，测得  $^{60}\text{Co}$  的能量为 1.17MeV 和 1.33MeV 的两种  $\gamma$  射线的综合峰的净面积  $N_0=5330$ ，其中能量为 1.17MeV 的  $\gamma$  射线的全能峰的净面积  $N_{10}=2658$ ，则 1.17MeV 射线强度与总射线强度比值  $\alpha$  为：

$$\alpha = \frac{N_{10}}{N_0} = \frac{2658}{5330} = 0.498 \quad (7)$$

由 (7) 计算结果表明： $^{60}\text{Co}$  放射的初始射线中，能量为 1.17MeV 的  $\gamma$  射线强度与总的射线强度比值  $\alpha$  为 0.498。实际上， $^{60}\text{Co}$  经过一次  $\beta$  衰变成为处在 2.5MeV 激发态的  $^{60}\text{Ni}$ ， $^{60}\text{Ni}$  的激发态的寿命极短，它放出能量分别为 1.17MeV 和 1.33MeV 的两种  $\gamma$  射线而跃迁到基态<sup>[5]</sup>。

### 4.2 用数据拟合法确定 $\gamma$ 射线单能射线吸收系数

表 1 确定总吸收系数  $u$  与铅块厚度  $x$  之间关系

铅厚度 $x$ (cm)	总面积 $N_0$	净面积 $N_1$	$u(\text{cm}^{-1})$
0	14614	5330	-----
0.3976	12594	4059	0.685
0.7880	9481	3040	0.713
1.1832	7561	2196	0.750
1.5746	5271	1850	0.672

利用公式 (5)，通过 Mathematica 计算软件的 FindFit 函数做数值拟合，得 1.17MeV 射线的吸收系数  $u_1$  和 1.33MeV 射线的吸收系数  $u_2$ ：

$$u_1 = 0.736\text{cm}^{-1} \quad u_2 = 0.675\text{cm}^{-1}$$

通过数据拟合的结果可知，铅元素对 1.17MeV 射线的吸收系数大于 1.33MeV 射线的吸收系数。

### 4.3 用分别测量法确定 $\gamma$ 射线单能吸收系数

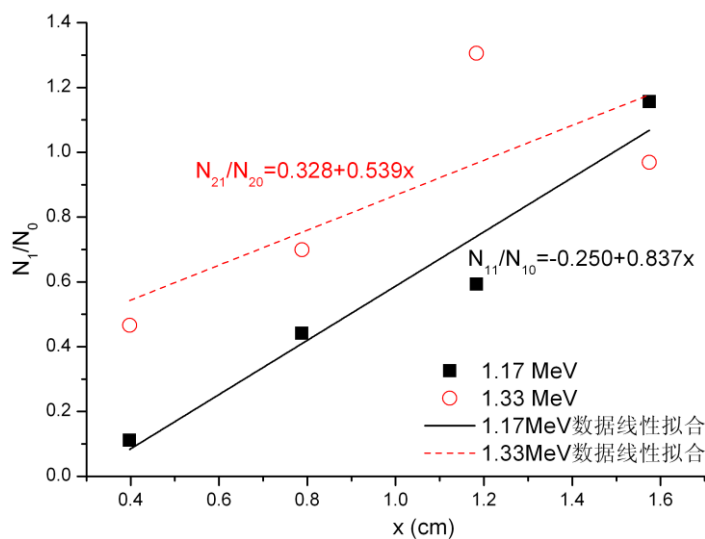


图2 铅片厚度与  $N_1/N_0$  关系

利用公式(1),通过最小二乘法拟合数据并作图2。由图2可知,随着铅块厚度的增加,两种能量射线的强度都在变弱。从图2中可以得到能量为1.17MeV和1.33MeV射线的吸收系数  $u_1'$ 、 $u_2'$  分别为  $0.837\text{cm}^{-1}$  和  $0.539\text{cm}^{-1}$ 。

### 4.4 比较两种方法测量结果

由参考文献[6]中提供的  $\gamma$  射线的能量  $E$  (MeV) 和吸收系数  $u$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) 的关系  $(E, u)$ , 分别是  $(0.5, 1.640)$ 、 $(1.0, 0.776)$ 、 $(1.5, 0.581)$  和  $(2.0, 0.518)$  [6]。利用 Mathematica 软件 FinFit 函数进行拟合,可得能量  $E$  和吸收系数  $u$  之间的关系为

$$u(E) = 537.879 \cdot e^{-0.306(E+3.994)^2} + 0.553 \quad (8)$$

由公式(8)作图,可得图3中的  $u_1$  曲线,并分别用  $u_2$  和  $u_3$  标注出拟合法和分别测量法得到的  $\gamma$  射线的吸收系数。根据此式即可计算出1.17MeV和1.33MeV  $\gamma$  射线吸收系数分别为  $0.707$  和  $0.642\text{cm}^{-1}$ 。以此作为吸收系数  $u$  的标准值。

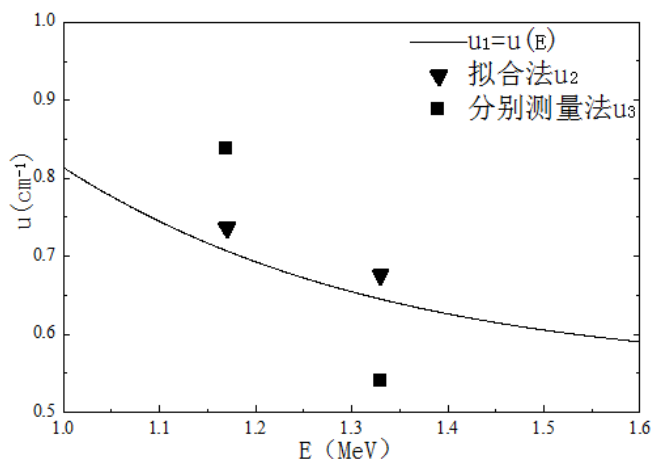


图3  $\gamma$  射线吸收系数与能量的关系

将用拟合法、分别测量法获得的结果与标准值相比较,由表2可知,数据拟合法得出的结果误差较小,与分别测量相比有显著的优点。



表2 比较两种方法测量  $u_1$  和  $u_2$  的误差<sup>[6]</sup>

$\gamma$ 射线能量 (MeV)	标准值	拟合法	拟合法	分别测量	分别测量法
	$u(\text{cm}^{-1})$	$u(\text{cm}^{-1})$	百分差	法 $u(\text{cm}^{-1})$	百分差
1.17	0.707	0.736	4%	0.837	18%
1.33	0.642	0.675	5%	0.540	16%

## 5 结论

本文提出了一种计算  $\gamma$  射线物质吸收系数的新方法。通过用两种方法分别测量铅对 1.17MeV 和 1.33MeV 两种  $^{60}\text{Co}\gamma$  射线的吸收系数并与标准值进行对比发现，数值拟合法测得  $u_1$  和  $u_2$  值相对误差远小于分别测量所得的值。由此可以看出，对于测量含多种能量谱线的  $\gamma$  射线中各个能量射线的吸收系数来说，数值拟合法是一种全新的方式。

### 参考文献:

- [1] 谢筱翊, 陈玲燕. 相对论效应实验中的数据处理[J]. 物理实验, 1990, 10 (2): 51~54.
- [2] 陈玲燕, 顾牡, 秦树基, 等. 相对论效应实验谱仪的系列教学实验[J]. 物理实验, 2000, 20 (3): 3~5.
- [3] 同济大学物理实验中心. 近代物理实验讲义, 2013: 78~98.
- [4] 黄新民, 解挺. 材料分析测试方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 8.
- [5] 杨福家. 原子物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 356~356.
- [6] 刘克桓. 物理教师手册[M]. 北京: 人民教育出版社, 1998: 980~981.

## Data fitting method in $\gamma$ -ray of $^{60}\text{Co}$ plumbous absorption coefficient

ZHANG Guo-qiang, BIAN Ji, FANG Kai, ZHANG Zhi-hua, DU Ai, HE Li

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This paper introduces that NaI (Tl) scintillation crystal detector measured the original strength specific value of  $^{60}\text{Co}$  1.17MeV and 1.33MeV gamma rays. By data fitting and respective measuring two methods to measures each plumbous absorption coefficient of 1.17MeV and 1.33 MeV gamma rays. Comparing the results with standard absorption coefficients, and the data fitting method is much better than the respective measuring.

**Key words:** data fitting; absorption coefficient; gamma rays

# 量子纠缠实验中 SPDC 光谱分布的计算分析与实验研究

孙文博, 王合英, 陈宜保, 陈宏  
(清华大学 物理系, 北京 100084)

**摘要:**在量子纠缠教学实验中,学生对纠缠光子产生机制及所处光场分布特征不甚了解,而造成实验过程中纠缠点定位调节具有盲目性、低效性。针对这一问题,本文在理论上详细分析了该教学实验中用于纠缠光子对产生的 II 类自发参量下转换 (SPDC) 光场光谱分布特征,通过数值模拟给出 403nm 连续激光光源通过 BBO 晶体产生的 II 类 SPDC 光场信号光分布曲线。据此设计了 SPDC 过程产生的 806nm 光子分布测量实验,实验结果与模拟结果相一致。

**关键词:** 量子纠缠; 双光子纠缠源; 自发参量下转换; 二类相位匹配; 光谱分布

## 1 引言

量子纠缠实验作为本科生基础训练实验,在清华大学近代物理实验室已开课 5 年有余<sup>[1, 2]</sup>,在教学实践中,受到学生好评。但我们发现在学生的实验过程中极易出现对纠缠光子产生机制及所处光场分布特征不甚了解,而造成实验过程中纠缠点定位调节具有盲目性、低效性的情况。这一方面降低了学生成功搭建高品质纠缠源的可能,延长了课内教学所需时间,另一方面也阻碍了学生对实验中所体现的物理概念、物理规律的理解,使学生更难于对整个实验设计理念有很好的把握。针对这一情况,本文详细分析实验中纠缠光子所在光场的光谱分布特征,并作相应数值模拟,以期给实验教学带来裨益。

量子纠缠概念于 1935 年分别由 Schrödinger 及 Einstein, Podolsky 和 Rosen 在质疑量子力学完备性时首先提出<sup>[3, 4]</sup>。量子纠缠是指某个量子系统的多个子系统之间存在非定域、非经典的强关联,它描述了子系统间不可分离的特性<sup>[5]</sup>。

自发参量下转换 (Spontaneous parametric down-conversion, SPDC) 是单色泵浦光和量子真空噪声在非线性介质中相互作用产生的一种非经典光场,每一个入射光子以一定概率自发分裂为能量较低的两个光子。SPDC 产生的光子对具有时间、偏振、频率等方面的纠缠特性,具有从泵浦光频率到晶格共振频率的宽光谱分布特征,在量子信息和量子计算等方面具有重要应用潜质。二十世纪六七十年代, Louisell 和 Klyshko 等人首先从理论上预言了 SPDC 现象<sup>[6, 7]</sup>。1970 年, Burnham 和 Weinberg 在光子计数实验中首先发现了 SPDC 光场<sup>[8]</sup>。本文采用 403nm 连续激光泵浦非线性 BBO 晶体,产生 II 类 ( $e=0+e$ ) SPDC 过程,根据相位匹配条件详细计算分析了所产生的光场的光谱特征和分布情况,并进行了数值模拟。最后,设计了相应实验对数值模拟结果进行了实验验证,并取得了与数值模拟一致的结果。

## 2 II 类 SPDC 光场特征的理论分析

SPDC 是一种二阶非线性过程,在 II 类 SPDC 过程中,泵浦光 ( $e$  光) 在非线性晶体中自发分裂成一对正交偏振态的下转换光子 (一个  $o$  光和一个  $e$  光), 本文中的 II 类 SPDC 过程如图 1 所示。

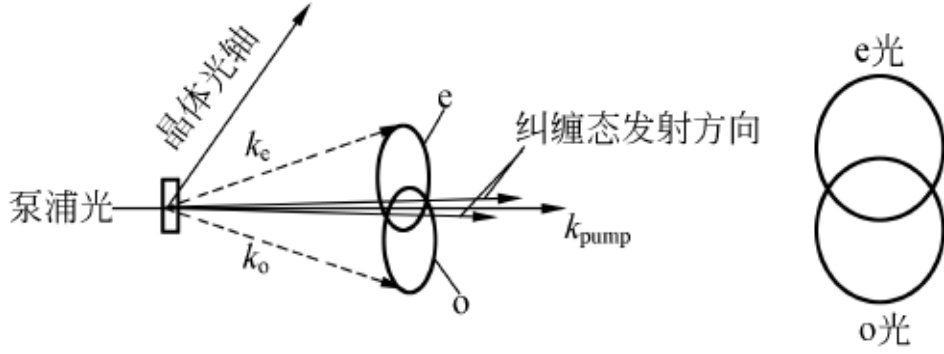


图 1 自发参量下转换原理图

在非线性晶体中,量子噪声的方向是无规则的,要产生 SPDC 过程必须满足动量守恒和能量守恒关系<sup>[9,10]</sup>,即所谓的相位匹配条件.即

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{K}_s + \mathbf{K}_i \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{K}$  是光子波矢,  $\omega$  是光子频率, 下标 p、s 和 i 分别表示泵浦光、信号光和空闲光。在本文所述范围内, 只讨论 II 类相位匹配下转换, 所以信号光与空闲光分别为 e 光和 o 光, 为使讨论更加清晰明确, 将 (1) (2) 式变换为

$$\omega_p = \omega_e + \omega_o \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{K}_e + \mathbf{K}_o \quad (4)$$

由折射定律可知

$$n=c/v \quad (5)$$

其中  $n$  为介质折射率,  $c$  为真空中光速,  $v$  为介质中光速。而在介质中, 光子波长与频率满足公式

$$v=\lambda f=\lambda\frac{\omega}{2\pi} \quad (6)$$

其中  $v$  仍为介质中光速,  $\omega$  是光子频率,  $\lambda$  为光子在介质中的波长。

综合 (3) (5) (6) 式, 可得

$$\lambda_o = \frac{\lambda_e \lambda_p}{\lambda_e - \lambda_p} \quad (7)$$

## 2.1 光轴与泵浦光所确定的平面内的计算分析

首先我们分析由泵浦光与光轴所确定的平面内的情况, 如图 2 所示。

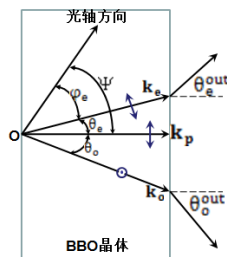


图 2 平面内 II 类相位匹配情况示意图

图 2 中,  $O$  为泵浦光进入晶体的入射点, 并如图标示光轴方向,  $\mathbf{K}_p$  为泵浦光波矢, 二者所确定的平面与纸面重合,  $\mathbf{K}_e$  为信号光波矢,  $\mathbf{K}_o$  为空闲光波矢。其中  $\mathbf{K}_p$  和  $\mathbf{K}_e$  的偏振方向位

于纸面内并垂直于自身传播方向，为 e 光， $\mathbf{K}_o$  的偏振方向垂直于纸面，为 o 光。 $\theta_e$  和  $\theta_o$  分别为晶体内  $\mathbf{K}_e$  和  $\mathbf{K}_o$  与泵浦光  $\mathbf{K}_p$  的夹角， $\varphi_e$  为  $\mathbf{K}_e$  与晶体光轴的夹角，另定义泵浦光入射角  $\Psi$  为

$$\Psi = \varphi_e + \theta_e \quad (8)$$

$\theta_e^{\text{out}}$  和  $\theta_o^{\text{out}}$  分别为信号光和空闲光出射到晶体外之后与  $\mathbf{K}_p$  的夹角。

由（4）式，结合图 2 中的描述，我们可以得到

$$k_e \cos \theta_e + k_o \cos \theta_o = k_p \quad (9)$$

$$k_e \sin \theta_e = k_o \sin \theta_o \quad (10)$$

晶体折射率  $n_o(\lambda_o)$  和  $n_e(\lambda_e)$  可以由 Sellmeier 方程给出。对于我们实验中所用的 BBO 晶体，有如下公式

$$n_o(\lambda_o) = \sqrt{2.7359 + \frac{0.01878}{\lambda_o^2 - 0.01822} - 0.01354\lambda_o^2} \quad (11)$$

$$n_e(\lambda_e) = \sqrt{2.3753 + \frac{0.01224}{\lambda_e^2 - 0.01667} - 0.01516\lambda_e^2} \quad (12)$$

由于 e 光折射率还与角度  $\varphi_e$  相关，故我们定义 e 光的有效折射率[11]

$$n_{\text{eff}}(\lambda_e, \varphi_e) = \left[ \frac{\cos^2 \varphi_e}{n_o^2(\lambda_e)} + \frac{\sin^2 \varphi_e}{n_e^2(\lambda_e)} \right]^{-1/2} \quad (13)$$

由波矢在晶体中的物理学定义，我们可以得到

$$k_p(\lambda_p, \Psi) = \frac{2\pi n_{\text{eff}}(\lambda_p, \Psi)}{\lambda_p}, k_e(\lambda_e, \varphi_e) = \frac{2\pi n_{\text{eff}}(\lambda_e, \varphi_e)}{\lambda_e}, k_o(\lambda_o) = \frac{2\pi n_o(\lambda_o)}{\lambda_o} \quad (14)$$

将方程(10)整理可得

$$k_o(\lambda_o) \cos \theta_o = \sqrt{k_o^2(\lambda_o) - k_e^2(\lambda_e, \varphi_e) \sin^2 \theta_e} \quad (15)$$

然后将(15)(14)代入(9)可得

$$\frac{2\pi n_{\text{eff}}(\lambda_e, \varphi_e)}{\lambda_e} \cos \theta_e + \sqrt{\left[ \frac{2\pi n_o(\lambda_o)}{\lambda_o} \right]^2 - \left[ \frac{2\pi n_{\text{eff}}(\lambda_e, \varphi_e)}{\lambda_e} \right]^2 \sin^2 \theta_e} = \frac{2\pi n_{\text{eff}}(\lambda_p, \Psi)}{\lambda_p} \quad (16)$$

最后综合看(7)(8)(16), 由于在给定实验条件下,  $\lambda_p$  和  $\Psi$  为确定值, 我们不难发现  $\theta_e$  是  $\lambda_e$  的单变量函数。

更进一步，由折射定律，我们可以求出 e 光和 o 光出射到晶体外的角度表达式

$$\theta_e^{\text{out}} = \sin^{-1}(n_{\text{eff}}(\lambda_e, \varphi_e) \sin \theta_e) \quad (17)$$

$$\theta_o^{\text{out}} = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_o}{\lambda_e} n_{\text{eff}}(\lambda_e, \varphi_e) \sin \theta_e\right) \quad (18)$$

由（17）（18）式，我们可以看到晶体外 e 光和 o 光的出射角度仅取决于  $\lambda_e$ ，于是我们可以设计实验，验证出射角度与出射光波长的关系。

## 2.2 立体空间中光场情况的计算分析

在空间中，考虑三维情况，各波长与出射角度的关系十分复杂，而我们的量子纠缠实验仅关注频率简并情况，故这里我们仅讨论  $\lambda_e = \lambda_o$  的情况。我们研究如图 3 所示出射情况。

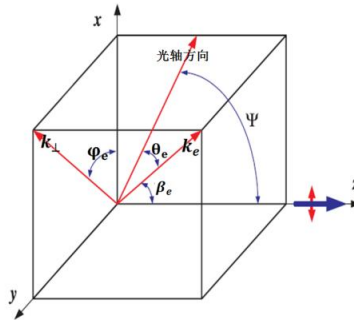


图 3 空间中 II 类相位匹配三维情况示意图

如图 3 中所示，我们定义泵浦光传播方向为 Z 轴，晶体光轴与泵浦光共同确定的平面为 XZ 平面，二者夹角为  $\Psi$ 。某一出射光  $\mathbf{K}_e$  如图中方向，其与 Z 轴夹角  $\beta_e$ ，与光轴夹角  $\theta_e$ ，在 XY 平面内投影为  $\mathbf{K}_\perp$ ， $\mathbf{K}_\perp$  与 X 轴夹角为  $\varphi_e$ 。

由相位匹配条件，可得

$$k_{ez} + k_{oz} = k_p \quad (19)$$

由空间几何关系，可得

$$k_{ez}^2 + k_\perp^2 = k_e^2, \quad k_{oz}^2 + k_\perp^2 = k_o^2 \quad (20)$$

由 (19) (20) 可解得

$$k_p = \sqrt{k_e^2 - k_\perp^2} + \sqrt{k_o^2 - k_\perp^2} \quad (21)$$

由 (14) 式的波矢定义可知在这部分讨论中， $k_\perp$  与  $k_e$  是  $\lambda_e$  和  $\theta_e$  的函数。于是由图 3 几何关系，可得

$$\beta_e(\lambda_e, \theta_e) = \sin^{-1}\left(\frac{k_\perp(\lambda_e, \theta_e)}{k_e(\lambda_e, \theta_e)}\right) \quad (22)$$

如图 4 所示，由立体几何基础知识有如下公式

$$\cos\theta = \cos\alpha\cos\alpha' + \cos\beta\cos\beta' + \cos\gamma\cos\gamma' \quad (23)$$

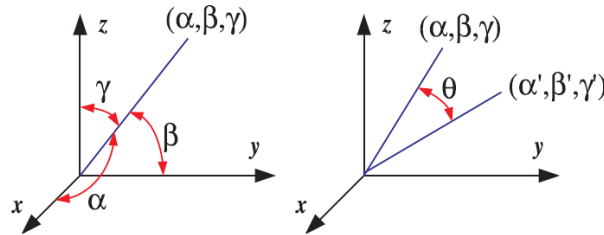


图 4 立体几何角度关系公式示意图

将 (23) 应用于图 3 情况，可得

$$\cos\theta_e = \cos\Psi\cos\beta_e + \sin\Psi\sin\beta_e\cos\varphi_e \quad (24)$$

最后应用折射定律，我们可以得到 e 光出射到晶体外后与泵浦光的夹角表达式

$$\beta_e^{out} = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_e k_\perp(\lambda_e, \theta_e)}{2\pi}\right), \beta_o^{out} = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_o k_\perp(\lambda_e, \theta_e)}{2\pi}\right) \quad (25)$$

由以上讨论可以看出，只要给定一个  $\varphi_e$ ，我们可以通过 (14) (21) (22) (24) 计算得到相应的  $\theta_e$  数值，进而计算  $k_\perp$ ，最终应用 (25) 得到出射角度数值。

由相位匹配条件  $\mathbf{K}_p = \mathbf{K}_e + \mathbf{K}_o$  并结合图 3 坐标系可知， $\mathbf{K}_e$  和  $\mathbf{K}_o$  在 XY 平面内的投影满足原点对称关系，于是可如上讨论  $\mathbf{K}_e$  的方法相应讨论  $\mathbf{K}_o$ 。

### 3 以本实验设备参数为基础的光场光谱数值模拟

以下是频率简并情况下的三维情况数值模拟。

按照我们的实验设备情况，设定  $\Psi=42.8$  度， $\lambda_p=403\text{nm}$ ，应用 mathematica 软件进行数值模拟，得到模拟结果如图 5 所示。

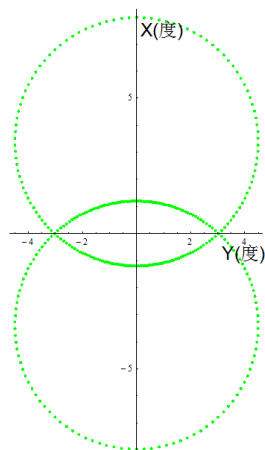


图5 806nm 出射光分布图模拟结果

图中横轴和纵轴分别为图3中所示出射光在y和x方向上的分离角度,并且上圆环为e光,下圆环为o光,两环交点即为量子纠缠实验中需要精密定位接收的偏振纠缠点,由模拟结果可见此点恰在YZ面内,且理清纠缠点分开的角度数值对量子纠缠实验的方案设计和教学过程中的操作细节都有重大意义,从图中我们可以看到此角度约为3度,与我们的设计光路方案吻合。

#### 4 实验与结果分析

实验系统图如图6所示。

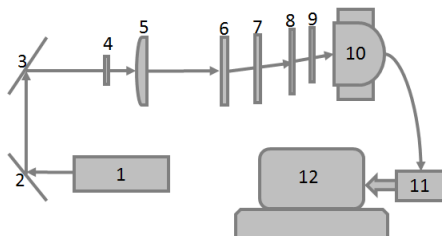


图6 实验装置图

图中1为403nm激光器,出射光为竖直偏振,2、3为可见光反射镜,4为消杂散光光阑,5为聚焦透镜,6为光轴与入射光夹角42.8度的BBO晶体,7为截止波长650nm的长通滤光片,8为10nm宽中心波长805nm的窄带滤光片,9为偏振片,10为光子定位接收器(包括较大行程的二维平移台和单模光纤准直器),11为雪崩管单光子计数器,12为电子学系统和计算机系统。

实验中由1发射的竖直偏振泵浦光经反射镜2和3反射以调整到所需传播方向,再经过4消除大部分不必要的杂散光干扰,通过5聚焦到BBO晶体6上产生SPDC光环,出射光经7借以消除绝大部分403nm的泵浦光残余光,而我们关注的806nm光则有90%得以通过,再经过8进行波长筛选得到我们所关注的SPDC出射光波段的光,通过9可以检查采集到的光的偏振情况,从而确定是o光还是e光,由10,11,12进行空间定位接收,将计数率最大的空间位置标记下来,得到以下数据图。

实验采集到的数据图如图7所示。

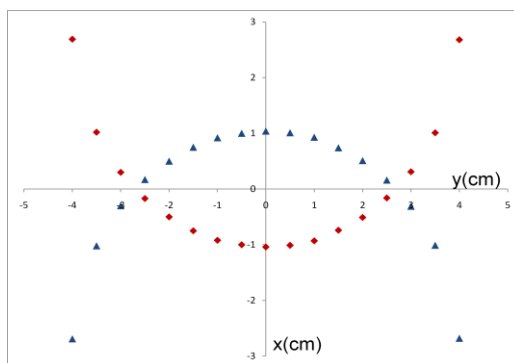


图7 实验采集到的数据图

对数据结果的说明与分析:

图7中菱形符号所示为e光输出,三角符号所示为o光输出,平移台数据精度0.01cm。

由于平移台直接读取的数据只能是长度数据,故实验数据图两坐标轴采用长度为数据单位。图中数据仅有两个圆环的靠近YZ平面的部分,是由于平移台行程和准直器可调角度所限。图中5和7之间距离为约50cm,通过换算并与数值模拟结果比较,有较好一致性,其间微小的偏差来源于平移台和准直器的精度误差和窄带滤波片具有一定的波长通过宽度。

对比图5和图7,可以看出实验结果与理论模拟结果较好吻合。通过上述理论模拟和SPDC光场局部分布实测,学生对BBO晶体产生自发参量下转换的物理原理和量子纠缠态产生原理有深刻的理解,从而对量子力学基本原理和非线性光学理论有更多的认识和感悟;通过将实测参数曲线与理论模型相比较,使学生真正理解纠缠点定位的核心技术,甚至每一步细节操作的物理含义和设计目的。应用实验中实测的光场分布数据指导实验调节过程,使纠缠点空间定位过程更加有序快捷,有据可依,易于学生接受领悟,并大幅度减少学生实验所需时间,提高仪器使用效率。同时纠缠源搭建作为各项研究型题目(如量子密钥分发、量子纯化等)的技术源头,提高纠缠源搭建的效率和质量,无疑会给其他研究题目的顺利完成奠定基础,对“拓展式、探究式”实验教学的开展提供裨益。

总之,SPDC光场结构的理论分析与实验测量,通过数值模拟曲线与实验结果相对照,使学生能够通过直观实验过程与数据结果理解复杂的非线性光学和量子光学原理,做到使不可见的光子分布数据化,抽象原理可视化的设计理念,同时也体现了实验验证理论、理论指导实践的辩证关系。

## 5 结束语

本文将量子纠缠实验中的下转换光场进行了详细的计算分析,进而对计算结果进行了数值模拟和实验验证,模拟结果与实验结果具有较好的一致性。通过本文的分析模拟和实验探究将SPDC光场的光谱特征详细的展现给了学生,并使纠缠点空间位置所在表现明确。从而有助于学生在实验学习过程中理解量子纠缠实验的物理原理、实验方案细节安排,并对实验操作给与了定向的指导。

## 参考文献:

- [1] 王合英, 孙文博, 陈宜保, 等。光子纠缠态的制备和测量实验[J]. 物理实验, 2009, 29(3): 1-5。
- [2] 孙文博, 王合英, 陈宜保, 等。用光子纠缠源验证Bell不等式[J]. 物理实验, 2010, 30(12): 1-54。
- [3] Schrödinger E. Die gegenwärtige situation in der quantenmechanik [J]. Naturwissenschaften,

- 1935, 23: 807-823.
- [4] Schrödinger E. Discussion of probability relations between separated systems [J]. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1935, 31: 555-562.
- [5] Bohm D. Quantum theory [M]. New York: Prentice-Hall, Inc. , 1951.
- [6] Klyshko D N. Utilization of vacuum fluctuations as an optical brightness standard [J]. Sov.J. Quantum Electron., 1977, 7(5): 591-595.
- [7] Louisell W H, Yariv A, Siegman R L, et al. Quantum fluctuations and noise in parametric processes[J]. Phys. Rev. A, 1961, 124: 1646-1654.
- [8] Burnham D C, Weinberg D L. Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs [J]. Phys. Rev. Lett., 1970, 25:84-87.
- [9] 李锋铭, 王树峰, 龚旗煌。利用圆锥辐射优化飞秒荧光光谱的光学参量放大[J]。光谱学与光谱分析, 2011, 31 (5): 1283-1285.
- [10] 卢宗贵, 刘红军, 景峰, 等。基于自发参量下转换产生参量荧光的光谱分布特性理论分析[J]。物理学报, 2009, 58 (7): 4689-4696。
- [11] Born M, Wolf E. 1975 Principles of optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference, and Diffraction of Light (Oxford: Pergamon).

## Calculation and Experimentation of SPDC Light Spectrum Distribution in Quantum Entanglement Experiment

Sun Wen-bo, Wang He-ying, Chen Yi-bao, Chen Hong  
(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Since the students may not comprehend well the creation mechanism of photon entanglement and light field distribution in the quantum entanglement experiment, it is likely to lead them being blind and inefficient in the adjustment of the location of the entanglement points. In order to enhance the understanding of the physics behind, we therefore analyze the property of the SPDC (spontaneous parametric downward conversion) light spectrum distribution created in detail, making the SPDC light signal distribution curve generated by the 403 nm continuous pump laser source in the given type II BBO crystal by numerical simulation, and designing a photon (of the wavelength of 806nm, created by SPDC) distribution measurement. We get the agreement between the experimental results and the simulation.

**Key words:** Quantum entanglement; Two-photon entanglement source; SPDC; Type-II phase matching; Spectrum distribution



# 用二极管激光测量气体分子的高分辨吸收光谱

娄秀涛, 武东城

(哈尔滨工业大学 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 介绍了基于波长可调谐二极管激光光源的气体吸收光谱测量原理, 展示了空气中氧气分子吸收光谱的测量装置和测量方法。实验系统构建成本低、操作简单, 可丰富近代物理实验课程内容。

**关键词:** 激光二极管; 气体; 吸收光谱

## 1 引言

与光谱学有关的内容在大学物理的光学部分中占有一定的比重, 这也相应的反映在了大学物理实验, 特别是近代物理实验中, 例如: 氢原子光谱、塞曼效应, 光谱仪测定介质吸收谱等<sup>[1]</sup>。其中, 国内开展有关吸收光谱测量实验的高校在教学中大多采用两种实验方案: 一种是在光源部位通过单色仪对其出射波长进行选择性调控来实现吸收光谱的测量<sup>[1-4]</sup>; 另一种是在光探测环节通过光栅光谱仪对不同波长的透过光进行分光来实现摄谱<sup>[5,6]</sup>。这两种方案在本质上都是采用宽谱带光源结合分光装置来测量吸收光谱, 整套系统的体积较大、成本较高, 并且其光谱分辨率最佳值一般在 0.1nm 量级, 仅适用于测量具有宽谱带吸收的固态或液态物质。

另一种有别于采用分光装置的吸收光谱测量方案是使用具有窄带发射谱的可调谐激光光源, 最典型的就是二极管激光器<sup>[7,8]</sup>。本文介绍一种基于低成本、小体积、波长可调谐的二极管激光(LD)光源的吸收光谱测量实验方案, 光谱分辨率好于 0.001nm, 可用于测量气体小分子的高分辨吸收光谱。实验中的被测气体为实验室内空气中的氧气, 这使得实验的开展变得简单易行。

## 2 实验原理

气体分子的吸收光谱是通过电流驱动 LD 的波长(频率)扫过被测气体的吸收谱峰来获得的。其所依据的核心原理是比尔-朗伯定律<sup>[9]</sup>, 它表明经过均匀气体介质吸收前的初始光强  $I_0$  和吸收后透射光强  $I_t$  之间呈 e 指数关系:

$$I_t = I_0 \exp[-S\phi(\nu)NL] \quad (1)$$

式中:  $S$  为吸收线强 (cm/molecule), 可以通过诸如 HITRAN 等光谱数据库<sup>[10]</sup>查得;  $N$  为分子数密度 (molecule/cm<sup>3</sup>);  $L$  为吸收路径长度 (cm)。 $\phi(\nu)$  为积分面积归一化的吸收线型表达式 (cm), 一般是描述分子碰撞展宽的洛伦兹线型和描述多普勒展宽的高斯线型的卷积结果。

分子之间的碰撞会导致能级寿命的缩短, 而根据海森堡不确定关系, 能级寿命的缩短将

**基金项目:** 国家自然科学基金(61008027); 黑龙江省高等教育教学改革项目(JG2012010151); “985 工程”本科生教学建设项目(HITJG2014008)

**作者简介:** 娄秀涛(1982-), 男, 山东东阿人, 哈尔滨工业大学物理系讲师, 主要从事大学物理和大学物理实验的教学工作以及激光光谱学领域的科研工作。

导致谱线宽度的增加。分子间的碰撞程度越大，则谱线展宽效应越大。一般气体在常压情况下，碰撞展宽占主要优势，此时吸收谱线可近似由洛伦兹线型描述：

$$\phi_c(\nu) = \frac{\Delta\nu_c / 2\pi}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_c / 2)^2} \quad (2)$$

式中的  $\Delta\nu_c$  是谱线的半高全峰宽（FWHM）。

在小吸收情形下，即当  $S\phi(\nu)NL \ll 1$  时，公式（1）可近似为：

$$1 - I_t / I_0 = S\phi(\nu)NL \quad (3)$$

由公式（3）可见，对于一定的气体分子来说，其  $S$  和  $\phi(\nu)$  是一定的，吸收信号的幅度  $A = 1 - I_t / I_0$  与气体浓度  $N$  和吸收长度  $L$  成正比。改变  $N$  和改变  $L$  是等效的。因此，我们在本实验中选择空气中的氧气分子为研究对象，其浓度一般为 21%，通过改变吸收光程来等效气体浓度的变化，这便大大降低了实验操作的难度。

### 3 实验装置

采用 LD 测量氧气吸收光谱的实验装置如图 1 所示。LD 光源为垂直表面发射型（VCSEL），其标称中心波长在 763 nm 附近。VCSEL 型 LD 的优点是功耗低、波长调谐范围宽。LD 的驱动器由电流驱动和温度驱动两部分组成。LD 波长通过电流驱动器（Thorlabs, LDC200）控制，电流精度为 1  $\mu$ A。为了获得稳定的波长输出，LD 的工作温度由温度控制器（Thorlabs, TED200）稳定在室温 25.52  $^{\circ}$ C，温度控制精度为 0.01  $^{\circ}$ C。信号发生器产生 16 Hz 的锯齿波输入到电流驱动器的模式输入端对 LD 的输出波长实施周期性调谐。信号发生器产生的同步 TTL 信号作为数据采集的触发信号输入到数据采集卡（AdlinkTech, DAQ-2010）中。LD 发射的激光经过空气后由硅光电二极管探测器接收，可通过移动探测器来改变其与 LD 光源的间距，进而改变吸收信号的大小。探测器产生的电流信号经由负载电阻转换为电压信号后由数据采集卡采集。数据采集卡通过 PCI 接口将数字信号传送到计算机中，然后由基于 LabVIEW 编写的程序对数字信号进行分析与记录。

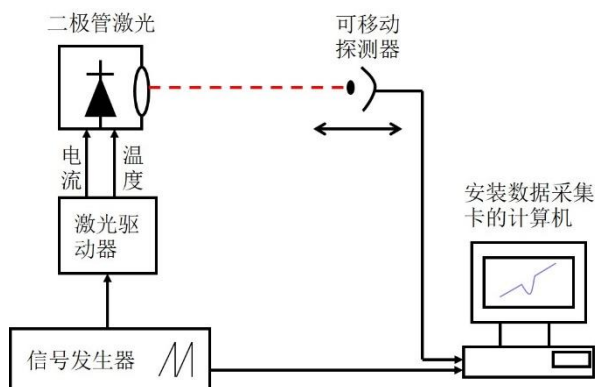


图 1 基于 LD 的氧气吸收光谱测量装置

### 4 实验结果与分析

图 2 给出了 5 s 平均后 60 cm 空气中氧气分子的吸收信号，其中横坐标为一个周期 62.5 ms 内的采样点标号。图 2 (a) 中的实线是探测器输出的电压信号，它对应公式（1）中的  $I_t$ ；而虚斜线为拟合得到的未吸收时的原始光强信号。图 2 (b) 给出了根据图 2 (a) 中的测量

信号处理得到的吸收信号，并用公式（2）所描述的洛伦兹线型对该信号实施了最佳拟合。

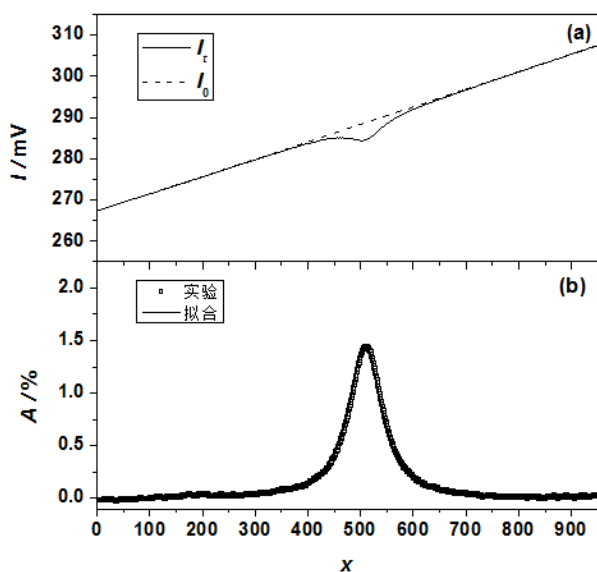


图 2 氧气分子的原始吸收信号和数据处理后的吸收信号

为了准确获取当前吸收谱线的波长信息，我们根据 HITRAN 数据库提供的光谱参数在 763 nm 附近模拟了 40 cm 空气中氧分子的吸收信号，并一一与实验数据做了比对，最终确认本实验所测量得到的吸收谱线为 P 分支的 P13 吸收线，其波长  $\lambda$  为 764.74 nm。图 3 给出了模拟和实验数据的比对结果，可见二者具有很高的一致性。

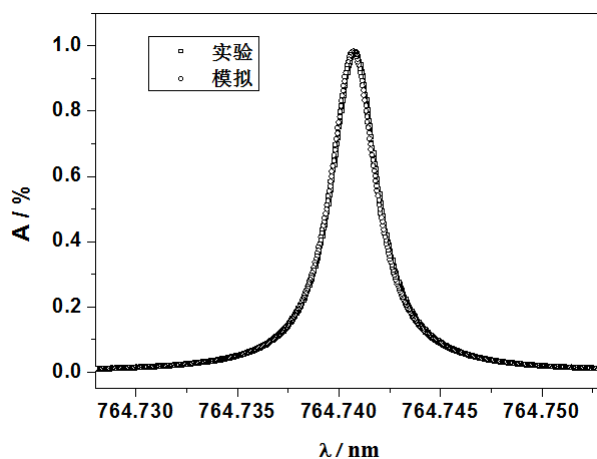


图 3 实验测量与理论模拟的氧气分子吸收光谱对比

为了验证公式（3）所给出的吸收幅度与气体浓度和吸收长度间的正比关系，实验中在 140 cm 范围内改变探测器和激光光源间的间距  $D$ ，测量了 7 种不同吸收长度的氧气分子吸收光谱，如图 4 所示。图 5 给出了图 4 中的 7 条吸收光谱的幅值与吸收长度间的正比例关系，测量误差棒由于误差数值小而未显见。线性拟合分析得到二者的线性相关系数  $R$  大于 0.999，充分验证了在小吸收情形下公式（3）的适用性。

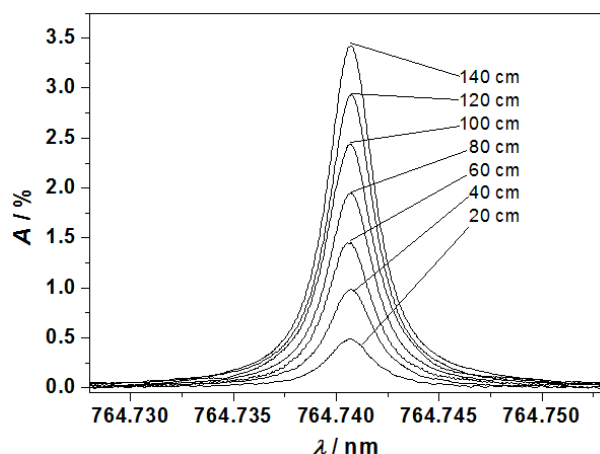


图4 不同吸收长度的氧气分子吸收光谱

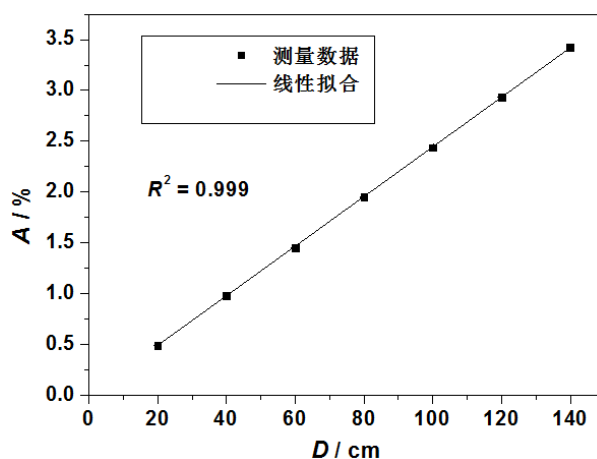


图5 氧气分子吸收信号幅度与吸收长度的正比例关系

## 5 结束语

本文介绍了利用波长可调谐的二极管激光实现空气中氧气分子高分辨吸收光谱测量的原理、装置和方法。实验结果与理论模拟结果具有高度的一致性，并且验证了在小吸收情形下吸收光谱的幅值与吸收长度成正比关系。整套实验系统的构建成本低，便于同时提供多套系统来提高学生亲自动手操作的比例，从而提高学生学习的积极性和主动性。本实验是对当前国内大学近代物理实验中吸收光谱部分的拓展，对于大学生了解和学习基于可调谐激光光源的近代光谱测量手段具有很好的启发意义。

## 参考文献:

- [1] 耿完楨, 赵海发, 金恩培, 等。大学物理实验[M]。哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2008。
- [2] 霍剑青, 吴泳华, 尹民, 等。大学物理实验(第四册)。北京: 高等教育出版社, 2005。
- [3] 周殿清。基础物理实验。北京: 科学出版社, 2009。
- [4] 李端勇, 张昱。大学物理实验(提高篇)。北京: 科学出版社, 2012。
- [5] 韩忠。近现代物理实验。北京: 机械工业出版社, 2012。
- [6] 周晓明。大学物理实验。广州: 华南理工大学出版社, 2012。
- [7] 胡险峰。用激光二极管自混合干涉测量距离[J]。物理实验, 2013, 33(1): 26-29。

- [8] Lou Xiu-Tao, Somesfalean G, Chen Bin, et al. Simultaneous detection of multiple-gas species by correlation spectroscopy using a multimode diode laser [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(11), 1749-1751.
- [9] Werle P. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors. *Spectrochim. Acta, Part A*, 1998, 54, 197-236.
- [10] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 2009, 110: 533-572.

## High-resolution absorption spectroscopy of gas molecules using diode lasers

LOU Xiu-Tao, WU Dong-Cheng

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The principle of gas absorption spectroscopy by using wavelength tunable diode lasers was introduced. The experimental setup and method for measuring oxygen absorption spectra in the open air were also presented. The experimental system is cost efficient and ease to use, thus having potentials to enrich the contents of the course of modern physics experiments.

**Key words:** laser diode; gas; absorption spectroscopy

# 一种基于非线性晶体参量下转换的纠缠光子实验

夏慧枝, 陈 凯

(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027)

**摘 要:** 以 BELL 不等式的推广—CHSH 不等式为理论基础, 测量纠缠源产生的偏振纠缠光子对, 验证其是否破坏 CHSH 不等式, 进而证明纠缠光子的产生, 衡量纠缠源的性能。

**关键词:** BELL 不等式; 非线性晶体; 参量下转换; 纠缠光子

## 1 实验原理

当光子通过某些非线性晶体时, 会有一定几率发生一个我们称之为参量下转换的非线性过程<sup>[1]</sup>。在参量下转换的过程中, 进入非线性晶体 (例如 BBO 晶体,  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, 低温相紫外非线性晶体, 具有倍频效应和双折射效应) 的一个光子就会劈裂为两个光子, 其中一个光子我们称之为信号光 (signal), 记作 s, 另一个光子称之为闲频光 (idle), 记作 i。两个光子的极化方向互相垂直。

纠缠光子的量子态为:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle|V\rangle + e^{i\alpha}|V\rangle|H\rangle)$$

如何证明两光子处于极化纠缠状态? 如何衡量纠缠源产生纠缠光子对的性能?

1964 年, Bell 从局域隐变量理论<sup>[2]</sup>推导出一个不等式<sup>[3]</sup>。不等式指出, 基于隐变数和定域实在论的任何理论都会使不等式成立, 而量子力学却预言 BELL 不等式的破坏。在本系统中采用 BELL 不等式的推广——CHSH 不等式来衡量产生的纠缠光子对的质量。

CHSH 不等式<sup>[4]</sup>(Clauser-Horne-Shimony-Holt)考虑到关联测量实验中的一些失误或误差因素, 比如对 A(B)测量仪器设备有时可能失效, 这时按实验规定, 仪器装置给出对 A(B)的测量值为零; 再比如, 制备出的 EPR 对可能不纯, 因此同时沿同一方向测量 A 和 B 的自旋关联并不严格等。

以如下极化纠缠态为例, 说明一下 CHSH 不等式。

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_A|V\rangle_B - |V\rangle_A|H\rangle_B)$$

光子A和光子B分别传输到类空分离的两个观察者Alice和Bob。之后Alice和Bob分别对各自的光子进行测量。他们每人都有两种测量方法 (相应于两种基矢)。每一种测量方法可以分辨互为正交的两个态 (通常采用 $|H\rangle$ 和 $|V\rangle$ 或者 $|+45^\circ\rangle$ 和 $|-45^\circ\rangle$ )。如果设Alice的一种

测量方法可以分辨量子态 $|\theta_1\rangle$ 和 $|\theta_1^\perp\rangle$  (极化与 $\theta_1$ 垂直的量子态), 另外一种测量方法可以分

辨量子态 $|\theta_1'\rangle$ 和 $|\theta_1'^\perp\rangle$  (极化与 $\theta_1'$ 垂直的量子态), Bob的一种测量方法可以分辨量子态

$|\theta_2\rangle$ 和 $|\theta_2^\perp\rangle$  (极化与 $\theta_2$ 垂直的量子态), 另外一种测量方法可以分辨量子态 $|\theta_2'\rangle$ 和 $|\theta_2'^\perp\rangle$

(极化与 $\theta_2'$ 垂直的量子态)。Alice和Bob进行大量的这种测量, 每个人都随机的选择各自两

种测量方法中的一种进行测量。

将Alice和Bob的测量结果之间的关联系数定义为：

$$E(\theta_1, \theta_2) = \frac{C(\theta_1, \theta_2) + C(\theta_1^\perp, \theta_2^\perp) - C(\theta_1, \theta_2^\perp) - C(\theta_1^\perp, \theta_2)}{C(\theta_1, \theta_2) + C(\theta_1^\perp, \theta_2^\perp) + C(\theta_1, \theta_2^\perp) + C(\theta_1^\perp, \theta_2)}$$

$C(\theta_1, \theta_2)$  为Alice取测量极化角度  $\theta_1$ ，Bob取极化片角度  $\theta_2$  时的符合事例数。

理论上对EPR-Bell态有：

$$|\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_A |V\rangle_B + |V\rangle_A |H\rangle_B), \quad C(\theta_1, \theta_2) = \sin^2(\theta_1 + \theta_2);$$

$$|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_A |V\rangle_B - |V\rangle_A |H\rangle_B), \quad C(\theta_1, \theta_2) = \sin^2(\theta_1 - \theta_2);$$

$$|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_A |H\rangle_B + |V\rangle_A |V\rangle_B), \quad C(\theta_1, \theta_2) = \cos^2(\theta_1 - \theta_2);$$

$$|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_A |H\rangle_B - |V\rangle_A |V\rangle_B), \quad C(\theta_1, \theta_2) = \cos^2(\theta_1 + \theta_2)$$

定义的Bell量S可表示为：

$$S = E(\theta_1, \theta_2) + E(\theta_1', \theta_2) + E(\theta_1, \theta_2') - E(\theta_1', \theta_2')$$

局域实在论对S值的预言是：  $|S| \leq 2$ ，而量子力学对S值的预言则是：  $|S| = 2\sqrt{2}$ 。

迄今为止的实验都是支持量子力学的预言，但都明显破坏Bell不等式，同时也说明量子纠缠是不能用局域实在论的观点来解释的。

对于Bell态：

$$|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_A |H\rangle_B + |V\rangle_A |V\rangle_B)$$

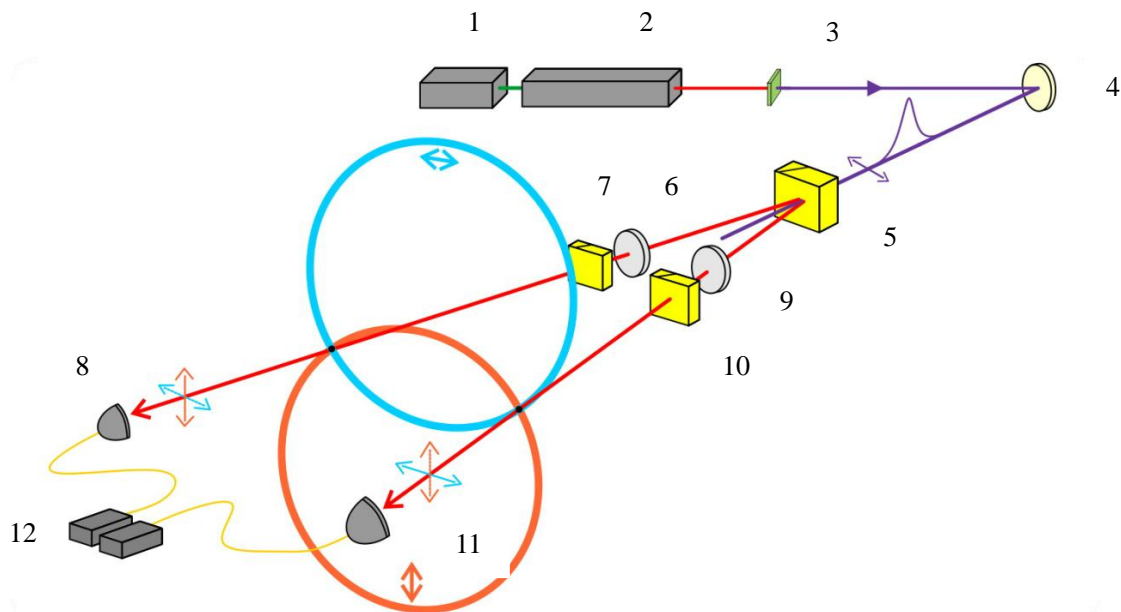
当取如下值时，  $\theta_1 = 0^\circ$ ，  $\theta_1' = 45^\circ$ ，  $\theta_2 = 22.5^\circ$ ，  $\theta_2' = -22.5^\circ$ ，CHSH不等式达到最大破坏，即  $|S| = 2\sqrt{2}$ 。

对于Bell态：

$$|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_A |H\rangle_B - |V\rangle_A |V\rangle_B)$$

当取如下值时，  $\theta_1 = 0^\circ$ ，  $\theta_1' = 45^\circ$ ，  $\theta_2 = -22.5^\circ$ ，  $\theta_2' = 22.5^\circ$ ，CHSH不等式达到最大破坏，即  $|S| = 2\sqrt{2}$ 。

实验装置如图1所示，焦距为300mm的透镜将激光器出射激光器聚焦至BBO晶体中心。晶体的非线性过程产生的纠缠光子对分别经过半波片和补偿晶体进行补偿，消除两光子之间的横向侧移和纵向时间差。最后，由耦合器收集具有较高保真度的纠缠光子，并由光纤传输至单光子探测和符合计数系统测量。图示中，透镜3和BBO晶体5之间的距离为300mm。



1 电流功率控制模块 2 激光器 3 透镜 4 反射镜 5 BBO 晶体 6 半波片 7 BBO 晶体  
8 耦合器 9 半波片 10 BBO 晶体 11 耦合器 12 单光子探测&符合计数系统

图 1 纠缠源实验装置

## 2 极化关联曲线

极化关联曲线本质上就是对于纠缠双方用不同的基矢测量所反应出来的关联性质。Alice 和 Bob 双方一方固定测量一个极化方向，而另一方测量 0 到 360° 各个值的符合计数的关系。典型的两条极化关联曲线是 Alice 分别选定 H (0°) 和 + (45°)，Bob 测量 0° 到 360° 所得到的曲线。Alice 分别选择测量角度为 0° 和 45° 时得到的关联曲线的极大值和极小值的比值即为我们之前所说的选 H/V 或者 +/- 基矢的对比度。下图是实时采集数据绘制的极化关联曲线图。图示中，横坐标显示检偏角度，纵坐标显示每秒统计的实时符合事例数。红色线表示：纠缠源其中一路在 0° 方向检偏，另一路在横坐标所示角度检偏所采集的符合事例数。绿色线表示：纠缠源其中一路在 45° 方向检偏，另一路在横坐标所示角度检偏所采集的符合事例数。

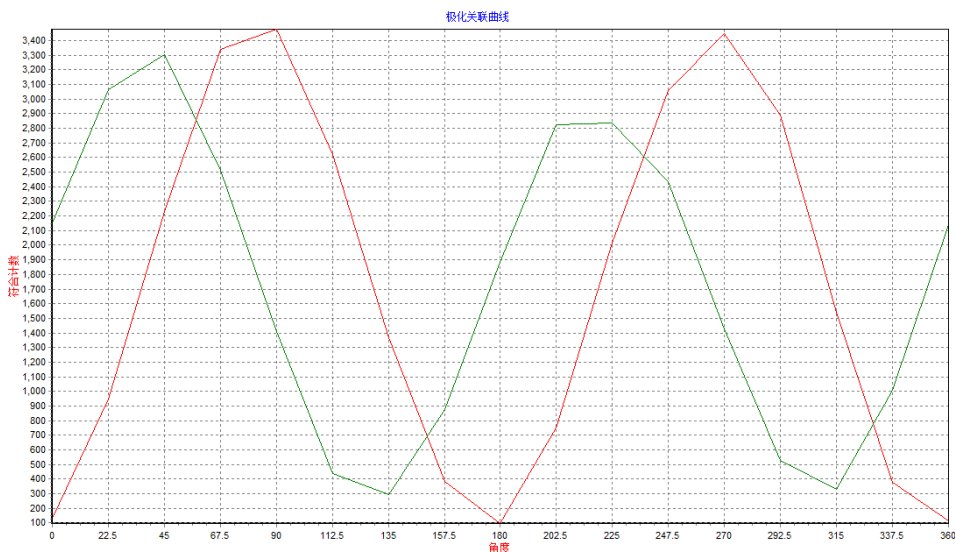


图 3 极化关联曲线



光子计数采集数据记录如表 1 所示：

表 1 纠缠光源测量符合对比度

1 路计数	2 路计数	符合计数	电流功率控制模块示数	泵浦光功率
13 万	14 万	13000	081	50mw
1 号极化片旋转角度(标定: 118°)	2 号极化片旋转角度(标定: 119°)	符合计数	对比度	
118°	119°	46	HV 对比度: (2675+2264)/(46+26) =68:1	
118°	209°	2675		
28°	209°	26		
28°	119°	2264		
163°	164°	2844	+-对比度: (2844+1936)/(244+221) =10:1	
163°	74°	244		
73°	74°	1936		
73°	164°	221		

### 3 CHSH 不等式破坏实验

量子力学预言，对于最大纠缠态，当纠缠双方分别取如下测量角度时：

$$\theta_1 = 0^\circ \quad \theta_1' = 45^\circ \quad \theta_2 = 22.5^\circ \quad \theta_2' = -22.5^\circ$$

$$\theta_1^\perp = 90^\circ \quad \theta_1^{\perp'} = -45^\circ \quad \theta_2^\perp = 112.5^\circ \quad \theta_2^{\perp'} = 67.5^\circ$$

CHSH不等式达到最大破坏，即  $S = 2\sqrt{2}$ 。Bell不等式破坏实验在实际中操作，就是进行如下16个符合测量。

表 2 Bell 不等式

Bell不等式				
	-22.5	67.5	22.5	112.5
-45				
45				
0				
90				

左上，左下，右上，右下的四个格子分别作为一组。分组方式如表格彩色底纹所示，不同颜色表示不同组。

每一组我们都可以根据四个符合值得到一个关联函数 E

$$E(\theta_1, \theta_2) = \frac{C(\theta_1, \theta_2) + C(\theta_1^\perp, \theta_2^\perp) - C(\theta_1, \theta_2^\perp) - C(\theta_1^\perp, \theta_2)}{C(\theta_1, \theta_2) + C(\theta_1^\perp, \theta_2^\perp) + C(\theta_1, \theta_2^\perp) + C(\theta_1^\perp, \theta_2)}$$

最后通过四个关联函数，我们就可以计算出 S 值：

$$S = E(\theta_1, \theta_2) + E(\theta_1', \theta_2) + E(\theta_1, \theta_2') - E(\theta_1', \theta_2')$$

并判定是否违背 CHSH 不等式

$$|S| \leq 2$$

实验采集的测量符合事例数分析计算结果如下：

表 3 不等式数据采集和计算结果

Bell不等式				
	-22.5	67.5	22.5	112.5
-45	2789	1017	425	3004
45	965	2647	3139	444
0	386	3323	896	2525
90	3101	297	2621	809

左上	<input type="text" value="0.466"/>	右上	<input type="text" value="-0.752"/>	<input type="button" value="计算S值"/>
左下	<input type="text" value="-0.808"/>	右下	<input type="text" value="-0.5022624"/>	<input type="text" value="2.527821063"/>

计算结果为：S=2.53。S>2，违反 CHSH 不等式，证实产生的光子对具有非局域关联性。

参考文献：

[1] Hong C K, et al. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference [J]. Phys Rev Lett, 1987, 59: 2044-2046.

[2] Bohm D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables, I and II [J]. Phys. Rev., 1952, 85(2): 166-179, 180-193.

[3] Bell J S. Speakable and unspeakable in quantum mechanics [M]. London: Cambridge University Press, 1987.

[4] Clauser J F, Horne M A, Shimony A, et al. Proposed experiment to test local hidden-variable theories[J]. Phys. Rev. Lett., 1969, 23: 880-884.

[5] R J Glauber. “The quantum theory of optical coherence.” Physical Review, 130(6): 2529.

[6] P A M Dirac. “The principle of quantum mechanics.” Oxford. Clarendon Press.

[7] C K Hong, Z Y Ou, L Mandel. Phys. Rev. Lett. 1987,59, 2044

[8] D N Klyshko. “Two-photon Light: Influence of filtration and a new possible EPR experiment.” Physics Letters A 128(3, 4): 133-137.

## Entangled photons experiment based on parameter down-conversion of nonlinear crystal

Xia Huizhi, Xia Kai Chen

(University of science and technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** theoretically based on CHSH inequality (derivation of BELL inequality ), measure polarized entangled photon pairs, verify whether the break CHSH inequality, and then prove that the generation of entangled photons, the performance of the measure of entanglement source.

**Keywords:** BELL inequality; nonlinear crystal; parameter down-conversion; entangled photons

# 一种基于 BB84 协议的量子保密通信实验方法

许穆岚, 刘乃乐

(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 基于 BB84—量子保密通信协议, 利用光子的偏振态传输信息。发送方和接收方用量子信道来传输量子态, 同时双方通过一条公共经典信道比较测量基矢和其他信息交流, 进而两边同时安全地获得和共享一份相同的密钥。

**关键词:** BB84; 偏振态; 量子信道; 测量基矢; 量子密钥

BB84 协议是 Charles H. Bennett 与 Gilles Brassard 1984 年提出的描述如何利用光子的偏振态来传输信息的量子密钥分发协议<sup>[5][6]</sup>。BB84 协议选用水平垂直方向“+”和  $\pm 45^\circ$  方向“×”作为制备量子偏振态的两个基矢: 水平偏振 ( $0^\circ$ ) 记作  $|\rightarrow\rangle$ , 垂直偏振 ( $90^\circ$ ) 记作  $|\uparrow\rangle$ ,  $45^\circ$  偏振记作  $|\nearrow\rangle$ , 和  $135^\circ$  偏振记作  $|\searrow\rangle$ 。于是 Alice 随机产生一个比特 (0 或 1) 并同时随机选择其中一个基 (“+”或“×”) 来制备出量子状态, 如表格所示:

表 1 量子态制备

随机产生一个比特		随即选择基
0	1	
$\uparrow$	$\rightarrow$	+
$\nearrow$	$\searrow$	×

Alice 把这个光子通过量子信道 (光纤光路) 传送给 Bob, Bob 紧接着测量接收到的光子的量子态。然而 Bob 并不知道 Alice 制备量子状态时选择了哪种基, 只得随机选择基 (“+”或“×”) 来测量。比如选择基“+”来测量  $|\uparrow\rangle$ , 会以 100% 的概率得到  $|\uparrow\rangle$ , 但是选择基“+”来测量  $|\nearrow\rangle$ , 结果是随机的, 会以 50% 的概率得到  $|\rightarrow\rangle$ , 或以 50% 的概率得到  $|\uparrow\rangle$ , 于是原始状态的信息丢失了 (不能彻底分辨原本状态是  $|\uparrow\rangle$  还是  $|\nearrow\rangle$ )。

表 2 量子通信基矢比对

Alice 产生随机比特	0	1	1	0	1	0	0	1
Alice 随机选择基	+	+	×	+	×	×	×	+
Alice 光子偏振态	$\uparrow$	$\rightarrow$	$\searrow$	$\uparrow$	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\rightarrow$
Bob 随机选择测量基	+	×	×	×	+	×	+	+
Bob 测得光子偏振态	$\uparrow$	$\nearrow$	$\searrow$	$\nearrow$	$\rightarrow$	$\nearrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$
在公共信道中对比基								
共有的密钥	0	丢弃	1	丢弃	丢弃	0	丢弃	1

Bob 记录每个他测量接收光子所选的基和测量结果。最后与 Alice 通过公共经典信道进行交互: Alice 公布制备每个光子时所选择的基, Bob 与之对比所选择的基, 舍弃那些双方选择了不同的基的比特 (50%), 剩下的比特还原为他们共有的密钥, 完成密钥分发。其中, Alice 和 Bob 可以拿出他们密钥的一部分, 然后相互对比来检查是否有第三方 Eve 窃听。Eavesdropper 为了获得光子偏振信息而作的测量, 会导致对比密钥时发现错误: 例如对于一般的 PNS 攻击, Eve 有 50% 的概率会选择与 Alice 不同的基去测量光子, 同时测量导

致光子偏振态改变；此时 Bob 再测量这个光子将有 50% 的概率测出与 Alice“同基矢异偏振”的结果；Alice 和 Bob 对比密钥看是否一致，从而发现有窃听者 Eve 的存在（Eve 的介入导致 25% 错误率）。当对比的密钥发现 Eve 窃听，则此此分发的密钥就被舍弃，并选择别的量子信道重新建立一次密钥分发过程。

量子通信光路如图1所示。光路调好后，观察成码率，错误率。成码率在3~5kbps较好；错误率要求低于5%，且系统匹配帧计数为1024。如果错误率过高，则要重新调整发射方手动偏振控制器重新校准制备的HV+-四种偏振态，再调整接收方手动偏振控制器，提高HV或+-的对比度。

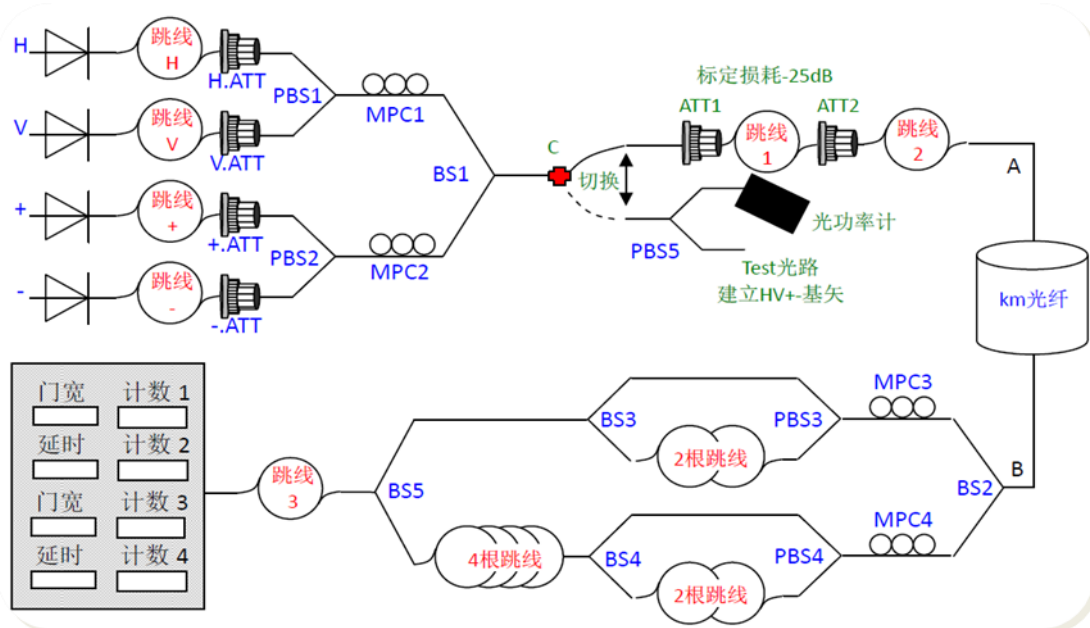


图 1 量子通信光路原理图

表3 仪器参数

	BB84 协议	单位
尺寸(类型 1)	1000×618×10	mm <sup>3</sup>
尺寸(类型 2)	470×349×211	mm <sup>3</sup>
光纤长度*	1	km
光纤衰减	<5	dB

看系统加密解密效果：当一段时间密钥分发后，KEY总量会增加到一定数量。加密是通过密钥和信息按bit异或运算得到的，有多少信息，就要多少密钥。而解密则是用相同的密钥再次和异或运算后的信息进行异或运算。等到密钥足够，我们可以测试一张图片。例如我们要加密一个144kb的图片，等到key剩余量超过144kb后，我们在Bob端测试图片选选项卡中选择“加密图片”并发送加密图片到Alice端，而在Alice端测试图片选选项卡中就可以点显示解密后的加密图片。可以看出解密后的图片有许多斑斑点点，这正和5%的错误率相符合，错误率越低，噪声斑点越少，如果加入纠错等技术手段，就可以彻底解决错误率问题。

图2显示为量子通信实验结果，本次实验的成码率为2.821kbps，错误率为2.48%。密钥统计一栏中，截止实验截图时间内，密钥生成总量为81.05K，传送右方显示的加密图片消耗

的密钥量为24.13K。图片显示清晰，噪声斑点较少，与2.48%的错误率相符合。



图 2 量子通信实验结果例图

### 参考文献:

- [1] Hong C K, et al. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference [J]. Phys Rev Lett, 1987, 59: 2044-2046.
- [2] Bennett C H, G Brassard. The IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, Bangalore, India, (IEEE, New York): 175-179.
- [3] Bennett C H, and G. Brassard. "Quantum public key distribution system," IBM Tech. Discl. Bull. 28, 3153-3163.
- [4] R J Glauber. "The quantum theory of optical coherence." Physical Review 130(6): 2529.
- [5] P A M Dirac. "The principle of quantum mechanics." Oxford. Clarendon Press.
- [6] C K Hong, Z Y Ou, L Mandel. Phys. Rev. Lett. 1987, 59, 2044.

## An experimental method based on the BB84 protocol of quantum secret communication

Xu Mu-lan, Liu Nai-le

(University of science and technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** based on the BB84 quantum secret communication protocol, using photon polarization transfer information. Sender and receiver with quantum channel to transport quantum state, at the same time the two sides through a public classical comparative measurement base vector channel and other exchanges of information, thus both sides obtain and share a key of safely.

**Key words:** BB84; quantum channel; polarization; measurement vector; quantum key

## 一种基于关联光子对的双缝量子成像实验

杨青, 陈凯

(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 利用下转换产生光子之间的关联性, 将其中一束作为参考臂, 另一束作为物臂, 观察双缝量子成像。

**关键词:** 鬼成像; 关联光子对; 非局域特性; 杨氏双缝干涉

1993年, 巴西科学家通过纠缠光源符合计数成像, 使原本由于退相干而消失的杨氏干涉条纹重新呈现。自此这种具有非局域特性的量子成像的研究便迅速开展开来。

量子成像又称“鬼成像”, 不同于常规的直接记录成像方式。它采用一个单像素点探测器收集透过物体的光, 而用另一个单光子探测器在非物空间探测光强分布, 通过提取具有关联性质的强度信息完成对物体的非局域成像。这种有悖于常规思维的成像方式, 不仅成像不受光路扰动影响, 而且成像的分辨率可以超越衍射极限, 也可以对低于奈奎斯特采样率情况扫描成像。量子成像的这些特点吸引了大量的相关深入研究, 促进了多个科学领域的发展, 并且产生了广阔的应用前景<sup>[11]</sup>。

基于“双光子干涉”的量子解释<sup>[12]</sup>: 对于杨氏双缝干涉实验, 当传播路径信息不可知时, 光子路径信息以概率幅的形式来叠加, 从而才出现干涉现象; 当试图通过测量来确定路径时, 干涉就会消失(费曼路径选择)。基于纠缠源的量子成像是通过符合测量来提取物体的信息, 而符合测量手段恰好消除了关联光子对的路径信息(量子橡皮), 即发生干涉现象。

如图1, 对一对纠缠光子符合测量, 当D2探测到光子时, D1探测到的另一光子无法确定传播路径, 符合计数是概率幅叠加(干涉)的结果。

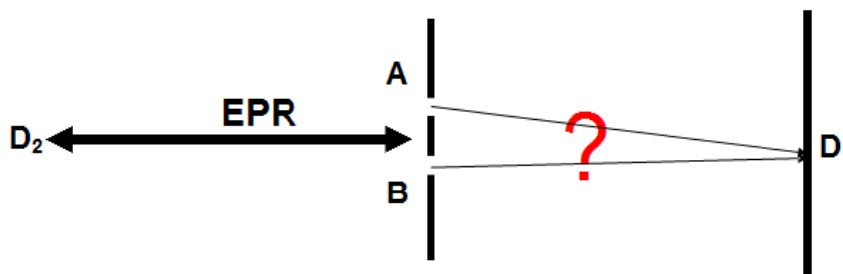


图1 双缝干涉

N.Klyshko提出“Advanced wave”理论<sup>[13]</sup>, 该理论提供了一个唯象解释: 以探测器D1作为“点光源”发光, 光束传播至参量下转换晶体, 把下转换晶体表面看作“平面镜”, 光束经该平面镜反射后, 传播至扫描平面, 最终被探测器接受。该唯象解释可以很好的解释基于纠缠光源的非局域成像。

本架构下的量子成像实验即是利用这对相互关联的光子对符合测量, 完成对物体的非局域成像。如本实验的具体实现过程就是, 在信号光一路(物臂)放置一成像透镜, 物体(如双缝)置于透镜之后, 于是透过物体的光子被耦合器收集到固定的点探测器中。而在闲置光一路(参考臂)的某一个平面上通过符合计数的方法进行横向扫描探测。物体或扫描平面到成像透镜的距离 $Z_0$ ,  $Z_1+Z_2$ 和透镜焦距 $f$ , 满足高斯透镜成像公式:

$$\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_1 + z_2} = \frac{1}{f}$$

成像放大倍数： $(z_1 + z_2) / z_0$ 。

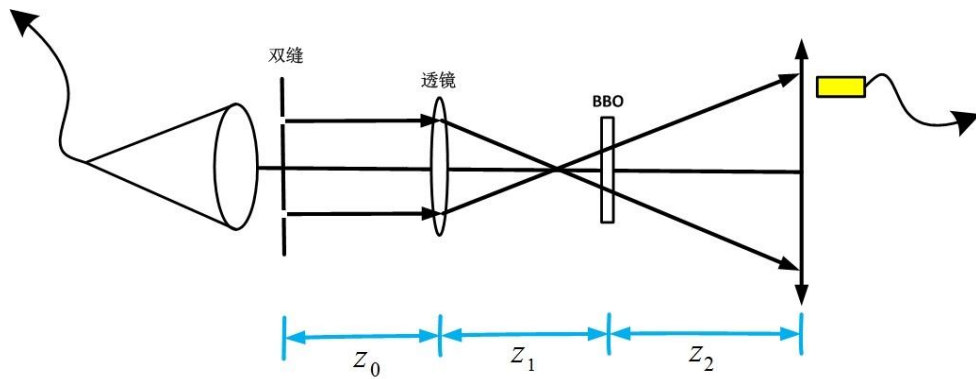
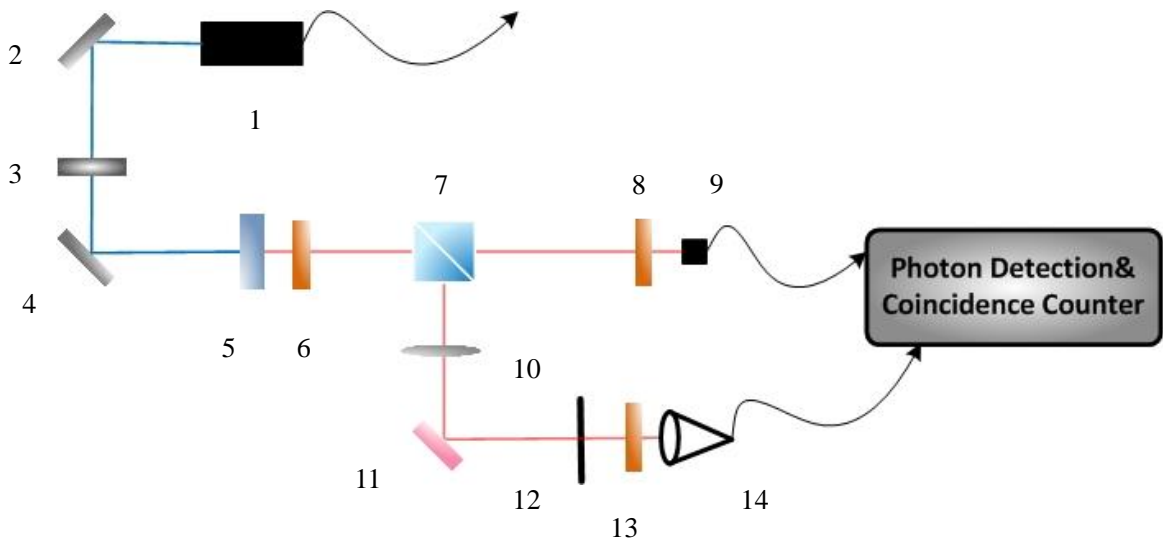


图2 双缝量子成像

实验装置：



1 激光器、反射镜、3 滤波片、4 反射镜 5BBO 晶体、6 滤波片、7 偏振分光棱镜、8 滤波片、9 多模光纤扫描、10 透镜、11 反射镜、12 双缝、13 滤波片 14 单模光纤耦合

图3 双缝量子成像光路图

本实验利用参量下转换过程产生的关联光子对，通过成像透镜对双缝进行量子几何成像。具体光学过程是：405nm激光泵浦非线性晶体BBO，通过参量下转换方式产生偏振方向相互垂直的关联光子对。关联光子对经过偏振分光棱镜分束，水平偏振方向的光子耦合到多模光纤中，垂直偏振方向的光子经过透镜和双缝后耦合到单模光纤中。在参考臂上，闲置光子强度分布则被多模光纤横向探测扫描。两臂的探测结果通过符合计数器符合测量，绘出符合曲线即得到物体的量子几何成像。



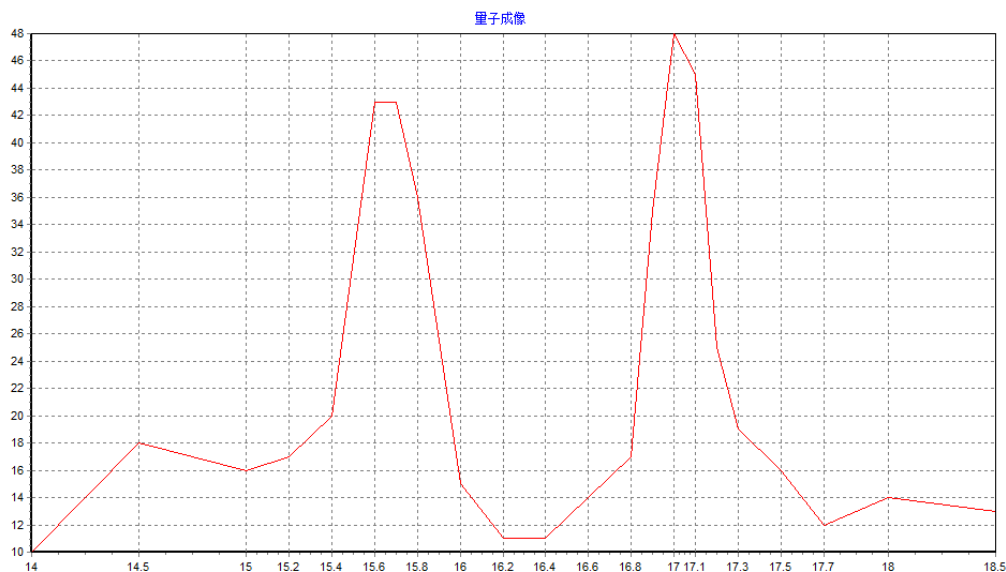


图 4 双缝量子成像实验结果图

实验曲线如上图。根据“Advanced Wave”唯象理论，成像关系满足高斯公式，成像放大倍数为  $(z_1 + z_2) / z_0$ 。本实验架构中，成像放大两倍。成像物体-双缝的间距为 0.68mm，像的双峰间距为 1.35mm，与理论分析一致。

#### 参考文献：

- [1] Hong C K, et al. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference [J]. Phys Rev Lett, 1987, 59: 2044-2046.
- [2] Bell J S. Speakable and unspeakable in quantum mechanics [M]. London: Cambridge University Press, 1987.
- [3] R J Glauber. “Coherent and incoherent states of the radiation field.” Physical Review 131(6): 2766-2788.
- [4] R J. Glauber. “The quantum theory of optical coherence.” Physical Review 130(6): 2529.
- [5] P A M Dirac. “The principle of quantum mechanics.” Oxford. Clarendon Press.
- [6] 郑名扬。基于纠缠光源的量子成像理论与实验研究。博士学位论文。

## A double seam quantum imaging experiment based on the correlation of photon pair

Yang Qing, Chen Kai

(University of science and technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** using the correlated photon pair generated by PDC, one of the beam as the reference arm, the other as object arm, to observe double slit quantum imaging.

**Keywords:** ghost imaging; associated photon pairs; local features; Young's double-slit

# 基于纠缠光源的单光子干涉和HOM型双光子干涉实验

刘 敏, 蔡昕东

(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027)

**摘 要:** 利用纠缠光源的其中一支作为单光子源, 应用 Mach-Zehnder 干涉扩展装置, 在干涉长度范围内, 观察由于环境变化所导致的相位改变。实验中表现为光子计数抖动。同时, 利用纠缠源产生的纠缠光子对之间的关联性, 制备不可区分的纠缠光子, 进行 HOM 型双光子干涉实验。

**关键词:** 纠缠光源 Mach-Zehnder 干涉 单光子干涉 光子计数 HOM 型双光子干涉

## 1 单光子干涉

量子光学之父 R.J.Glauber 提出: 量子意义上的干涉, 并非是光子之间物理意义上的干涉, 而是概率波的干涉<sup>[3][4][5]</sup>。保罗 狄拉克: “假定我们令大量光子组成的光束分裂为两个强度相等的部分。按照光束的强度与其中可能的光子数目相联系的假定, 我们就会得到, 光子总数的一般分别走入每一组分。现在, 如果使这两个组分互相干涉, 我们就得要求, 在一个组分中的一个光子能够与另一组分中的一个光子互相干涉。在某些情况下, 这两个光子就要互相抵消, 而在另一些情况下, 它们就要产生四个光子。这样一来, 就会和能量守恒相矛盾了。而新的理论把波函数与一个光子的几率联系起来, 就克服了这一困难, 因为这个理论认定, 每一光子都是部分地走入两个组分中的每一个。这样, 每一个光子只与它自己发生干涉。”<sup>[6]</sup>

光具有波粒二象性。当我们探测纠缠源产生的纠缠光子计数时, 我们侧重于光的粒子性。当光经过半透半反分光棱镜分束后两束光波的叠加出现类似于经典光学中的干涉现象时, 则侧重于光的波动性。在本实验装置中, 当纠缠源产生的约 100k.cps 光子经过分光棱镜后, 单从粒子性角度考虑, 后端耦合器收集到的将会是一个恒定的光子计数值。而实验中观察到的干涉现象如果不是光子之间的干涉, 就如经典干涉实验中光波的干涉的话, 那么很难想象光子确切的行走路径。如此, R.J.Glauber 提出量子意义上的干涉是概率波的干涉。

本实验方案很好的展现的光的波粒二象性。最终我们将观察到在分光棱镜处叠加后的光子计数值, 同时也将观察由于环境变化导致干涉位置处光子计数值的抖动。

## 2 实验装置

单光子干涉实验系统包括干涉环部分和收集探测部分 (图 1)。干涉环部分包括: 准直器, 反射镜, 分光棱镜和一维移动平台; 收集探测部分包括: 耦合器, 光子探测。

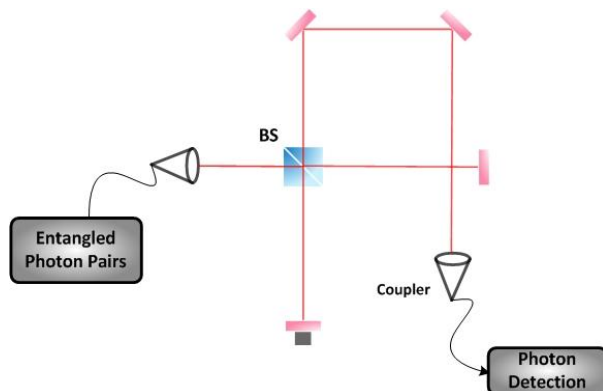


图 1 单光子干涉实验光路图

纠缠源中的一路光子经分光棱镜 BS 透射和反射，再由红光反射镜反射后在 BS 处发生单光子干涉。用耦合器收集二次经过分光棱镜 BS 的光子，由单光子探测设备探测收集到的光子。每一个光子只与它自己发生干涉，在干涉位置出现光子计数抖动的现象，计数抖动幅度随单光子行走路径距离差呈包络状，如图 2 所示。

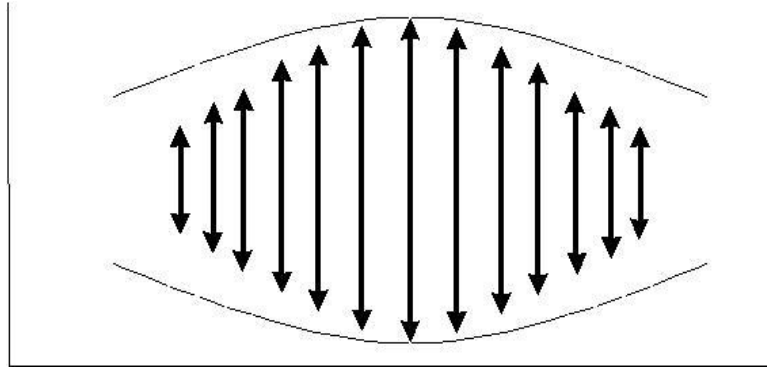


图 2 单光子干涉实验结果拟合图

实验结果如图 3 所示。横坐标为移动台的测微螺旋头所处位置显示的刻度值，实验中推动移动台，扫描干涉位置。纵坐标为实时采集的光子计数值，上图中显示的多个点是移动台处于指定位置，不同时间采集的实时光子计数值。由图 3 所示，相干长度为：90 $\mu\text{m}$ ，光子计数波动范围为：[12000.cps, 22000.cps]。

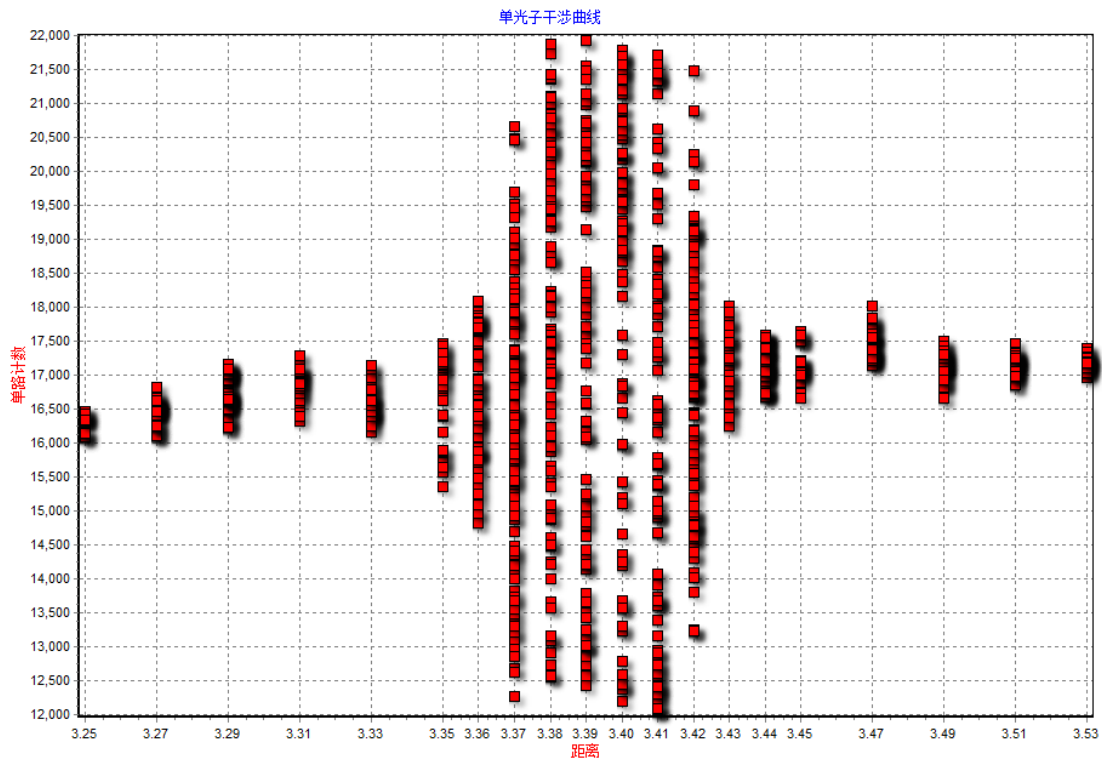


图 3 单光子干涉实验结果图

### 3 HOM 型双光子干涉

1987 年，C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel 在实验中观察到基于分光棱镜的双光子干涉现象<sup>[6]</sup>。以下用玻色子的产生和湮灭算符来阐述 HOM 型干涉的理论过程。

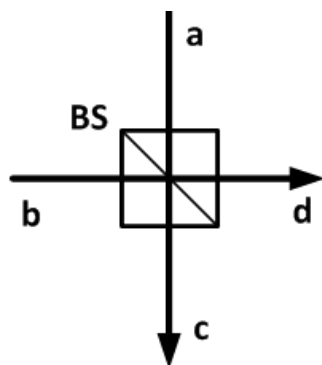


图4 分光棱镜

$a^+$  和  $b^+$  均为产生算符。a 路径和 b 路径各有一光子(图 4), 可表示为:

$$a^+ b^+ |0,0\rangle_{ab} = |1,1\rangle_{ab}$$

光子经过半透半反分束镜 BS 后, 透射和反射的概率均为 50%。其路径选择可由产生算符之间的关系变化表示:

$$a^+ \rightarrow \frac{\hat{c}^+ + d^+}{\sqrt{2}}, \quad b^+ \rightarrow \frac{\hat{c}^+ - d^+}{\sqrt{2}}$$

Hong-Ou-Mandel 型干涉需要光子的频率相同, 偏振方向相同且两光子在时间上不可区分。当两光子不可区分时光子之间发生干涉。那么, 我们无法区分两光子同时透射或是两光子同时反射的情况。即:

$$\hat{c}^+ d^+ |0,0\rangle_{ab} = i d^+ \cdot i \hat{c}^+ |0,0\rangle_{ab}$$

那么, 两光子经过 BS 后:

$$\begin{aligned} |1,1\rangle_{ab} &= a^+ b^+ |0,0\rangle_{ab} \xrightarrow{BS} \frac{1}{2} (\hat{c}^+ + i d^+) (\hat{c}^+ - d^+) |0,0\rangle_{cd} \\ &= \frac{1}{2} (\hat{c}^{+2} - d^{+2}) |0,0\rangle_{cd} = \frac{|2,0\rangle_{cd} - |0,2\rangle_{cd}}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

从上式亦可看出, 发生双光子干涉时, 两光子只从一端输出, 则没有符合。

#### 4 实验装置

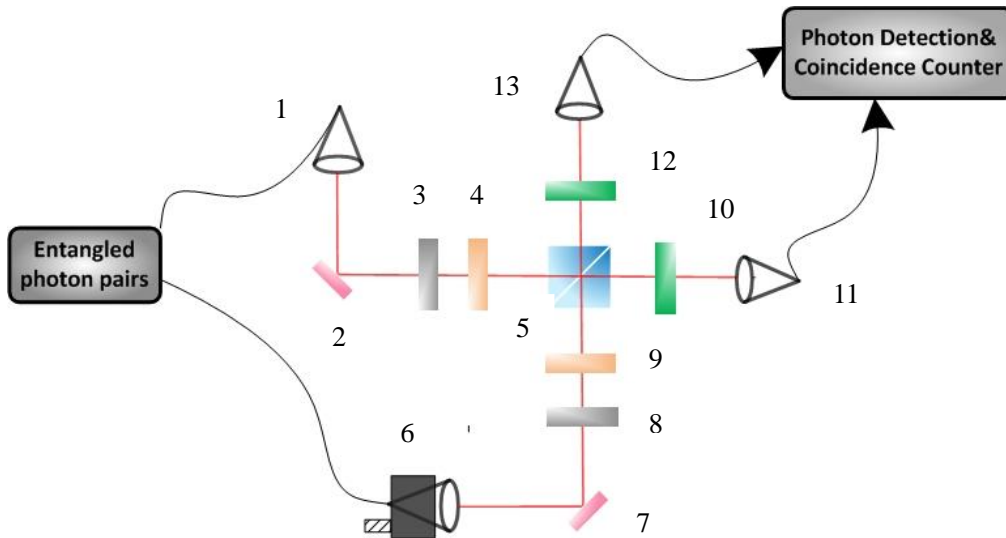
HOM 型双光子干涉实验(图 5)包括干涉, 滤波和单光子探测和符合部分。从纠缠源系统产生的两路纠缠光子对经过分别经过准直器准直, 再经高反射率的反射镜转折, 最后在分光棱镜处产生干涉。每一路光子在分光棱镜处都将概率性的走透射线或是反射线。最终, 耦合器都将收集到其中一路经过分光棱镜的透射光子和另外一路经过分光棱镜的反射光子。收集到的光子经过光纤传输到单光子探测器, 输出的电信号经过电子学处理, 在将单路计数和符合计数上传和显示在上位机软件上。

II 型参量下转换产生偏振方向相互垂直的纠缠光子对, 而 HOM 型双光子干涉需要不可区分的光子对。因此, 在干涉装置中需要半波片旋转光子的偏振方向。另外, 需要极化片检测光子的偏振是否旋转到最佳。

实验结果如上图所示, 横坐标为移动台螺旋测微头所处位置的刻度值, 纵坐标为光子的符合计数值。实验中推动移动台扫描双光子干涉位置。图示中干涉中心位置移动台的位置为

14.78mm，双光子相干长度约 90um，干涉对比度为：4：1。

非干涉位置符合计数为 260.cps，干涉中心位置处符合计数值为 60.cps。



1 准直器、2 反射镜、3 半波片、4 极化片、5 偏振分光棱镜、6 准直器&移动台、7 反射镜、7 半波片、8 极化片、9 滤波片、10 耦合器、11 滤波片、12 耦合器

图 5 HOM 型双光子干涉光路图

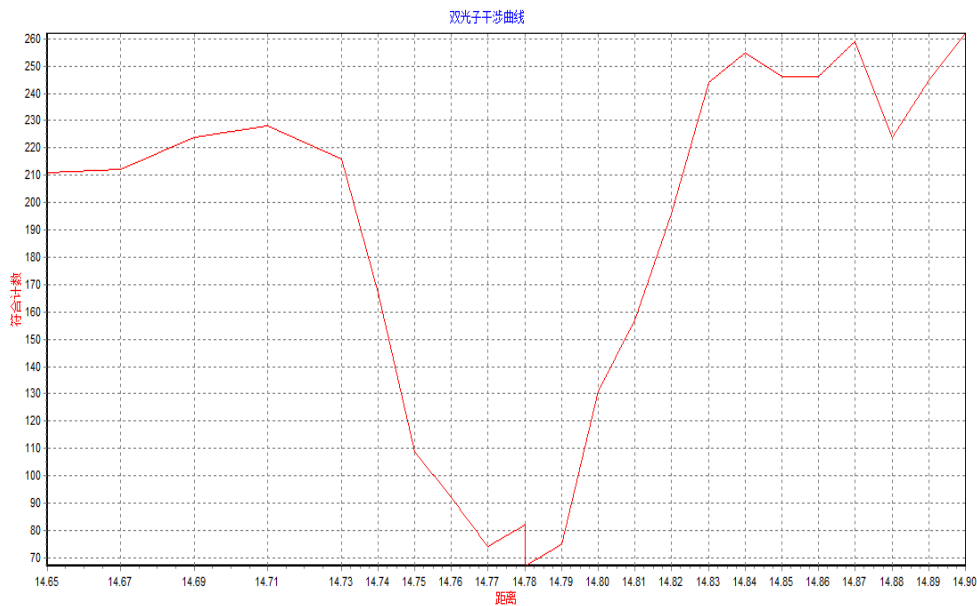


图 6 HOM 型双光子干涉实验结果图

参考文献:

- [1] Hong C K, et al. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference [J]. Phys Rev Lett, 1987, 59: 2044-2046.
- [2] Bohm D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables, I and II [J]. Phys. Rev., 1952, 85(2): 166-179, 180-193.
- [3] R J Glauber. “Coherent and incoherent states of the radiation field.” Physical Review 131(6): 2766-2788.

- [4] R J Glauber. "The quantum theory of optical coherence." Physical Review, 130(6):2529.  
[5] P A M Dirac. "The principle of quantum mechanics." Oxford. Clarendon Press.  
[6] C K Hong, Z Y Ou, L Mandel. Phys. Rev. Lett. 1987, 59, 2044.  
[7] D N Klyshko. "Two-photon Light: Influence of filtration and a new possible EPR experiment." Physics Letters A, 128(3,4): 133-137.

## Single photon interference and "HOM type two-photon interference experiment based on entangled photons

Liu Min, Cai Xin-dong

(University of science and technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** the use of light source as single photon sources, one of the application of the Mach - Zehnder interference extension device, within the scope of the interference lengths, observed due to environmental changes caused by the phase change. Experiments show the photon counting jitter. At the same time, using the correlation between entangled source of entangled photon pairs, preparation of indistinguishable entangled photons, "HOM type two-photon interference experiments.

**Key words:** entangled light; Mach - Zehnder interference; single-photon interference photon counting; HOM two-photon interference

# 大气压等离子体实验演示仪

董馨<sup>1</sup>, 孙智兴<sup>2</sup>, 于江涛<sup>2</sup>

(1. 北京舒杰特科技有限责任公司, 北京 100084;

2. 河北联合大学机械工程学院, 唐山 063009)

**摘要:** 随着大气压气体放电等离子体科学技术的不断发展, 面向基础和应用研究的各个领域均对等离子体科学与技术领域的人才培养提出了迫切的需求。我们以大气压放电等离子体在生物医学、环境保护、新能源以及飞行器流动控制等新兴领域的应用为背景, 开发了面向国内高校等离子体物理实验教学的实验演示仪器。

**关键词:** 大气压放电等离子体; 实验教学; 演示仪

## 1 引言

等离子体被称为除固体、液体、气体以外物质的第四态, 它由离子、电子等带电粒子以及中性粒子（原子、分子、微粒等）组成, 宏观上呈现准电中性和集体效应<sup>[1]</sup>。自然界中常见的太阳、雷电和极光以及工业中应用的霓虹灯、荧光灯和电弧焊等都属于等离子体。

按照气体温度来划分, 可将等离子体分为高温等离子体和低温等离子体<sup>[2]</sup>。高温等离子体是指温度约为  $10^8$  K 的等离子体。低温等离子体又可分为温度约为  $10^4$  K 的热等离子体以及电子温度可达几十电子伏特, 但气体温度约为几千或几百度、甚至接近室温的冷等离子体。图 1 给出了实验室中产生的几种典型的大气压气体放电等离子体, 其中  $T_h$ 、 $T_e$  和  $n_e$  分别代表重粒子温度、电子温度和电子数密度, 温度比  $\theta (=T_e/T_h)$  表征了等离子体的热力学非平衡程度。

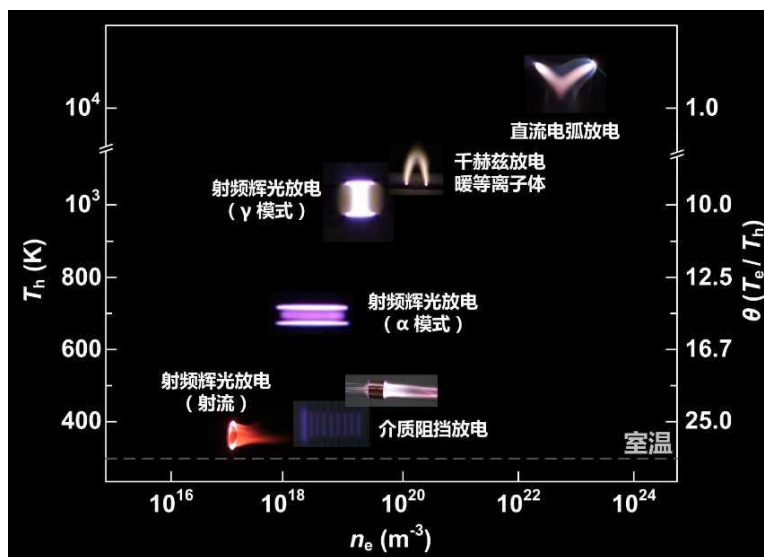


图 1 大气压放电等离子体参数图谱

等离子体技术已广泛应用于诸多领域。在能源领域, 利用超高密度、超高温等离子体的核聚变发电; 在工业领域, 利用热等离子体实现了焊接、切割、热电厂锅炉的无油点火; 在日常生活中, 利用等离子体发光特性实现照明, 如荧光灯、霓虹灯放电管等; 在材料加工领域, 利用等离子体化学活性的薄膜沉积与刻蚀, 以及材料的表面改性、废弃物处理; 在生

物医学领域，利用常压室温等离子体可进行生物体诱变育种、疾病治疗等；在空间推进领域，等离子体推力器广泛地应用于小卫星的姿态控制和轨道保持等方面；另外等离子体在能量转换、国防安全等领域亦有着广泛的应用<sup>[3-5]</sup>。

随着等离子体科学与技术各个领域应用的不断拓展，相关的应用基础研究呈现出显著的学科交叉和融合的特点，这势必会对人才培养提出更高和更迫切的需求。虽然国内高校已经相继开设了一些等离子体基础理论课程，但在等离子体实验教学方面仍然缺乏与理论教学和应用研究相匹配的实验教学仪器。针对目前国内高校对于等离子体实验教学的需求，我们团队结合目前等离子体理论教学内容和热点应用领域开发了系列大气压放电等离子体演示仪（Plasma Demo），包括等离子体激励器、疯狂的火焰和等离子体音箱。以下我们将对这三种演示仪的特性进行详细的介绍。

## 2 实验装置和实验内容

我们所开发的这套等离子体演示仪包括了等离子体激励器、疯狂的火焰和等离子体音箱三个模块。该演示仪的特点是：以空气为放电介质，在大气压下实现放电，因而无需真空系统和特殊气体（如惰性气体）的供给；实现了对等离子体特性从视觉到听觉的全方位展示，即适合于在课堂上做演示实验用，也适合于在实验室中开展具有一定探索性的实践课程的应用。此演示仪系列中的等离子体激励器和疯狂的火焰可共用一个电源模块，模块化的设计使得演示仪成本低、体积小、重量轻、便于维修和易损件的更换。

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 等离子体激励器

等离子体激励器的放电类型为介质阻挡放电，该演示仪模块的总体效果图、放电单元结构示意图及电极结构图分别如图 2(a)~(c)所示，其放电的伏安特性曲线和电压—功率曲线如图 3 所示。等离子体激励器工作时，在上下两极板间施加高压交变电场，在空气被击穿之前，两电极之间为一电容；两电极间的电流随外加电压的升高而增加；当两电极间的外加电压达到约 6 kV 时空气被击穿，在两电极间介质层的上下表面处均会产生介质阻挡放电，但放电强度较弱；随着电压的进一步升高，放电电流和功率逐渐增加，放电区面积和等离子体的发光强度均随之增加；此时气体放电所诱导的电极壁面附近的空气流速亦增加，从而对酒精灯火焰产生明显的扰动（见图 4）。

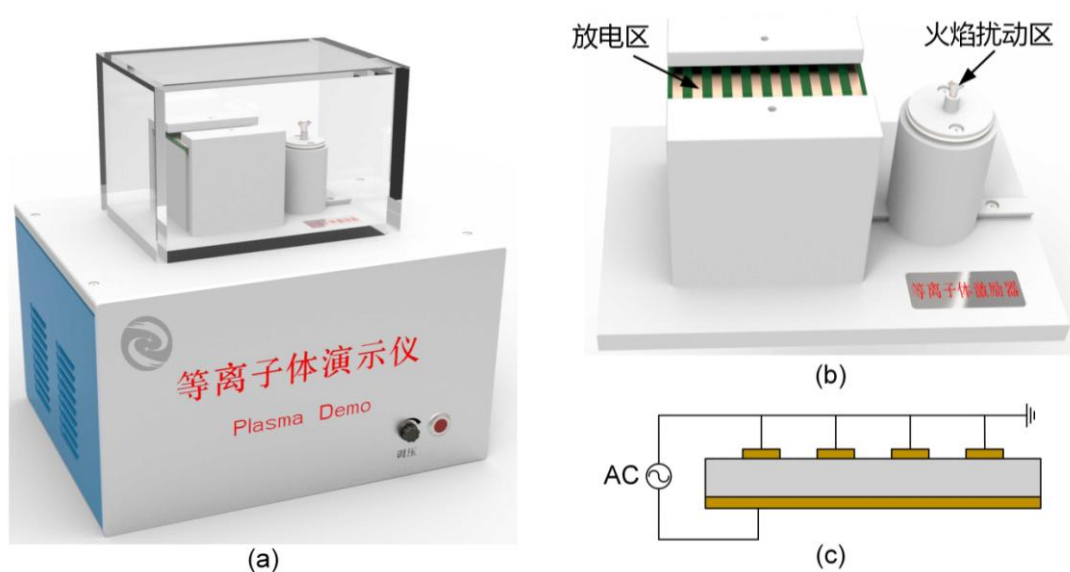


图 2 离子体激励器总体效果图 (a)、放电单元结构示意图 (b) 及电极结构图 (c)



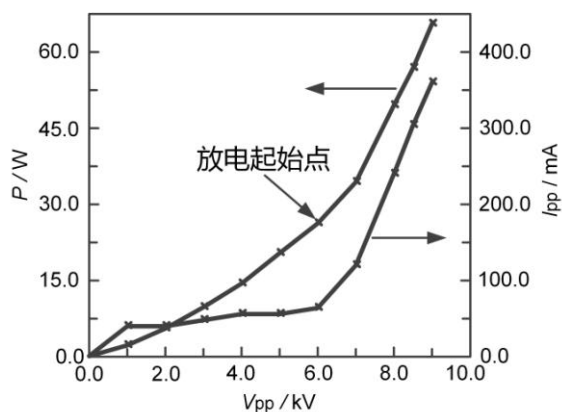


图 3 离子体激励器放电的伏安特性曲线及电压—功率曲线



图 4 离子体激励器放电前 (a) 和放电后 (b) 的放电图像及对酒精灯火焰的扰动

### 3.2 疯狂的火焰

疯狂的火焰模块的放电类型为电晕放电。图 5 给出了该模块的总体效果图、放电单元结构示意图及产生电晕放电的原理示意图。电晕放电是指带电体表面在气体或液体介质中出现许多局部的电离和激发过程，但电极之间并不击穿或导通而出现的自持放电现象<sup>[6]</sup>。此实验模块通过在酒精灯火焰中添加具有多尖端的金属电极，并将该电极与高频高压电源相连，从而在电极尖端产生多处电晕放电（如图 5(c)所示）；电晕放电所产生的等离子体对酒精灯火焰产生剧烈扰动，从而导致火焰形状畸变。图 6(a)~(d)分别给出了外加电压为 0（参考状态）、10.7、17.6 和 18.9 kV 时酒精灯火焰的照片。可以看到，由于电晕放电的出现，酒精灯火焰出现明显的分叉和脉动；而随着外加电压的增大，火焰分叉增多、脉动亦变得更加剧烈。

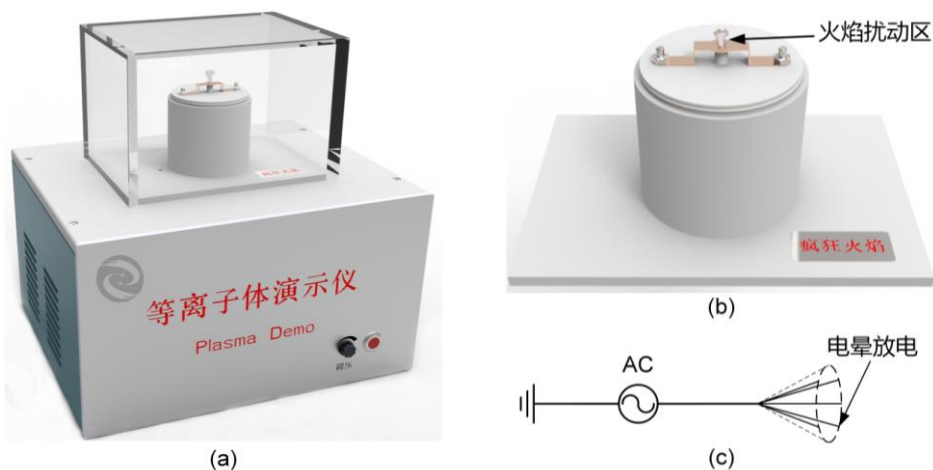


图 5 疯狂的火焰模块总体效果图 (a)、放电单元结构示意图 (b) 及电晕放电原理示意图 (c)

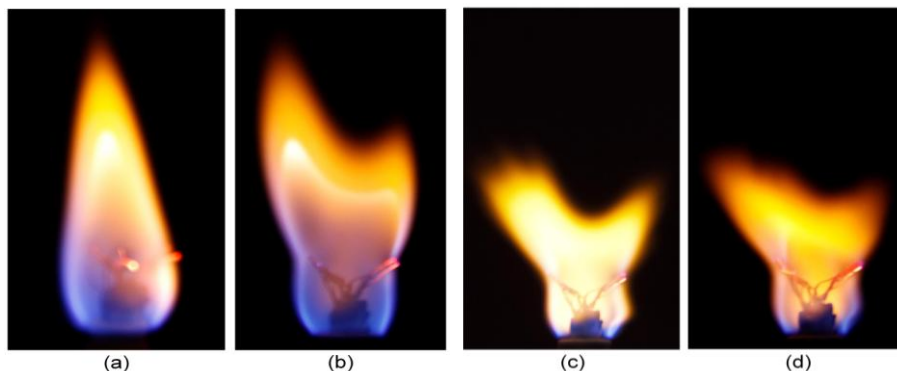


图 6 不同放电条件下酒精灯火焰发生扰动的对比

### 3.3 等离子体音箱

等离子体音箱的放电类型为暖等离子体放电。图 7 给出了该模块的总体效果图、放电单元结构示意图及典型的放电图像。当在等离子体音箱的两平行的放电细丝（如图 7(b)所示）之间外加大约 40 kV 的直流高压后，两铜丝之间的空气在该高压电场的作用下击穿形成放电通道，产生暖等离子体。当放电通道形成后，放电电压中的直流成分迅速衰减，而交流成分（即纹波成分）则占主导地位。此时，可将音频（可由 MP3，手机，电脑等音频设备提供）信号放大后对该交流电压的峰峰值进行调制。图 8 为未加入音频信号时输入高压变压器的脉宽调制信号，此时放电稳定，所形成的等离子体如图 7(c)所示，该信号为一方波；而当采用音频信号对放电电压进行调制后，可以明显地发现放电电压的脉冲宽度和幅度均在随着音乐的节奏变化，相应地，所产生的等离子体按照音频的规律跳动，并推动空气震动，从而实现了“会唱歌的电弧”（如图 7(d) 所示）。

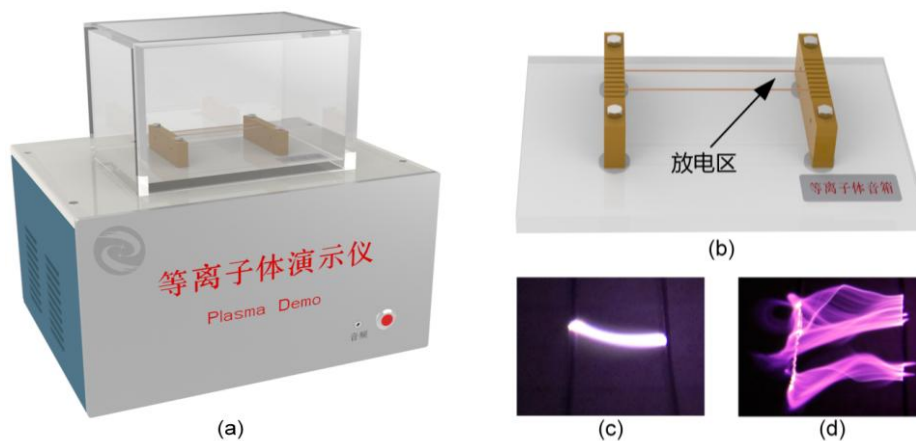


图 7 等离子体音箱总体效果图 (a)、放电单元结构示意图 (b) 和典型的放电照片 (c) ~ (d)

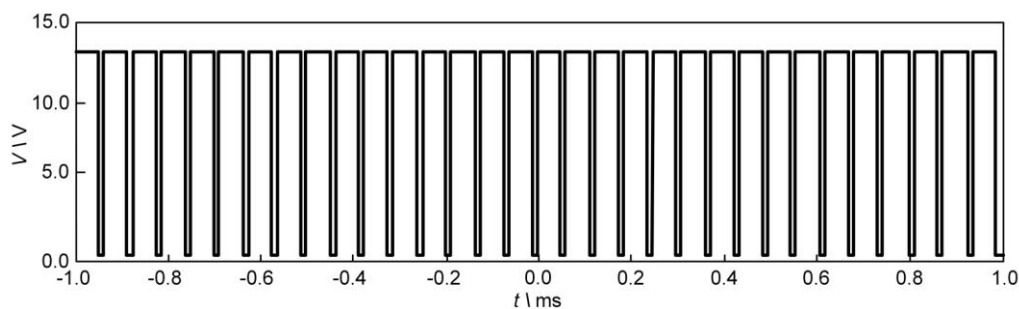


图 8 未加入音频信号时的放电电压波形图

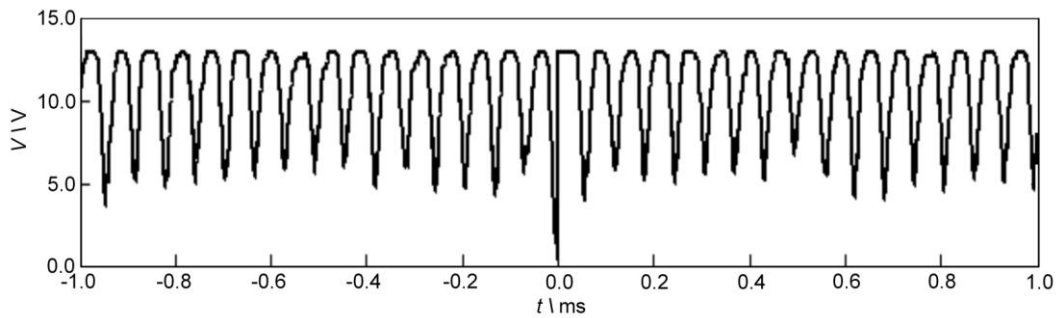


图9 加入音频信号后的放电电压波形图

#### 4 结束语

该套大气压等离子体演示仪直观地向学生展示了三种典型的等离子体的放电图像和特性，包括介质阻挡放电、电晕放电及非热电弧放电（暖等离子体）。该套演示仪很好地展示了大气压气体放电等离子体的一些基本特性和典型应用，而且有利于通过引导学生对实验现象进行细致的观测和深入的剖析加深对等离子体基础理论知识的学习和掌握。该套实验演示仪在清华大学等单位进行了初步的实验教学，受到了教师和学生的好评。

#### 参考文献：

- [1] Chen F F. 等离子体物理导论[M]. 林光海, 译. 北京: 人民教育出版社, 1980: 1-20.
- [2] 陈熙. 热等离子体传热与流动[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-14.
- [3] 江南. 我国低温等离子体研究进展[J]. 物理, 2006, 35(2): 130-139.
- [4] 孟月东, 钟少锋, 熊新阳. 低温等离子体技术应用研究进展[J]. 物理, 2006, 35(2): 140-146.
- [5] Moreau E. Airflow control by non-thermal plasma actuators [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(3): 605-636.
- [6] 张海峰, 庞其昌, 陈秀春. 高压电晕放电特征及其检测[J]. 电测与仪表, 2006, 43(482): 6-9.

## Experimental Demonstration Instruments of Atmospheric-Pressure Gas Discharge Plasmas

DONG Xin<sup>1</sup>, SUN Zhi-Xing<sup>2</sup>, YU Jiang-Tao<sup>2</sup>

(1. Beijing Superjet Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China;

2. College of Mechanical Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

**Abstract:** With development of atmospheric-pressure gas discharge (APGD) plasma science and technology, there exists an urgent demand for the talent cultivation from different fundamental and application fields. In this paper, several demonstration instruments of the APGD plasma sources for the experimental education in the universities or colleges in China are developed with biomedical science, environmental protection, new energy and flow control of aircraft, etc., as the background.

**Key words:** atmospheric gas discharge plasmas; experimental education; demonstrat

# 利用时域有限差分法模拟金纳米球及球壳光学特性

钱 钧, 刘丽军, 张春玲

(南开大学 物理科学学院, 天津 300071)

**摘 要:** 利用时域有限差分方法, 研究了金纳米球, 金纳米球壳及多层球壳的消光特性及电场分布。结果表明, 金纳米颗粒的几何参数对消光峰的位置有显著影响。

**关键词:** 纳米颗粒; 消光; 表面等离子

## 1 引言

金纳米球及球壳结构近年来受到极大关注, 由于它们独特的光学性质, 在生物传感, 生物医学成像, 乃至癌症治疗等方面有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>。金纳米颗粒的光学特征主要来源于颗粒的局域表面等离子共振 (Localized Surface Plasmon resonance, LSPR)<sup>[4]</sup>。金纳米颗粒在入射光照射下, 其自由电子发生集体震荡, 从而形成局域表面等离子共振, 在共振波长引起强烈的光学吸收和散射, 并在颗粒周围产生极强的电场分布。金纳米颗粒的表面等离子共振对颗粒的几何形貌及周围介质折射率十分敏感。通过改变金球壳 (Silica-Gold) 颗粒的核壳比, 能够使其共振峰移动到近红外的生物窗口 (700-1300nm)<sup>[5]</sup>, 有利于其在生物方面的应用。近年来, Gold-Silica-Gold 多层球壳结构也被合成并广泛研究<sup>[6]</sup>。相比于 Silica-Gold 球壳结构, Gold-Silica-Gold 多层球壳结构能够提供更加丰富及可调节的等离子共振带。

本文利用时域有限差分方法 (finite difference time domain, FDTD)<sup>[7]</sup>, 研究金球 (Gold sphere), 金球壳 (Silica-Gold), 及 Gold-Silica-Gold 多层球壳结构的吸收, 散射, 电场分布等光学特性。本实验作为研究性实验, 有利于本科生了解当今科学研究的前沿领域, 培养学生的创新能力, 科研技能等综合实验素质。通过时域有限差分方法模拟, 使同学能够很直观的了解金纳米颗粒的电场分布等光学特性, 有利于从微观层面了解光与金纳米颗粒的相互作用机制。

## 2 基本原理

FDTD 方法是一种常用的电磁场模拟方法。电场分量  $E$ , 磁场分量  $H$  满足麦克斯韦方程组, 即

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= \frac{\partial D}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

在均匀介质中, 有  $D(\omega) = \varepsilon(\omega)E(\omega)$ ,  $B(\omega) = \mu(\omega)H(\omega)$ , 其中  $\varepsilon(\omega)$ ,  $\mu(\omega)$  为介电常数和磁导率。在三维空间中,  $E$  矢量可以分解为  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  三个分量, 同理  $H$  也可以分解为  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  三个分量。FDTD 方法的基本思路是将时间与空间网格化, 在格点间距很小的极限情况下, 将函数的微分运算转换成差分运算, 将  $E$  和  $H$  的分量在空间和时间上采

**基金项目:** 国家基础科学人才培养基金资助 (J1103208, J1210027)

**作者简介:** 钱钧 (1978—), 男, 回族, 辽宁沈阳人, 南开大学物理科学学院讲师, 博士, 从事实验教学, 微纳光学研究。

取交替抽样的离散方式进行处理。给定初始场，根据已知的边界条件，即可以模拟电磁波与物质的相互作用，以及此电磁波随时间的演化行为。

### 3 模拟计算及讨论

我们要计算的三种结构见图 1，图 1(a)为金纳米球结构，半径为  $R$ 。图 1(b)为金纳米球壳（Silica-Gold）结构，中间为二氧化硅球核，外面是金球壳，各层半径为  $R_1$ ， $R_2$ 。图 1(c)为 Gold-Silica-Gold 多层球壳结构，中间为金球核心，外面依次是二氧化硅层和金壳层，各层半径为  $R_1$ ， $R_2$ ， $R_3$ 。在 FDTD 计算中采取总场散射场光源，入射光传播方向  $k$  及偏振方向  $E$  及如图 1 所示。二氧化硅的介电常数取 2.04。金的介电性质取文献[8]中的参数。

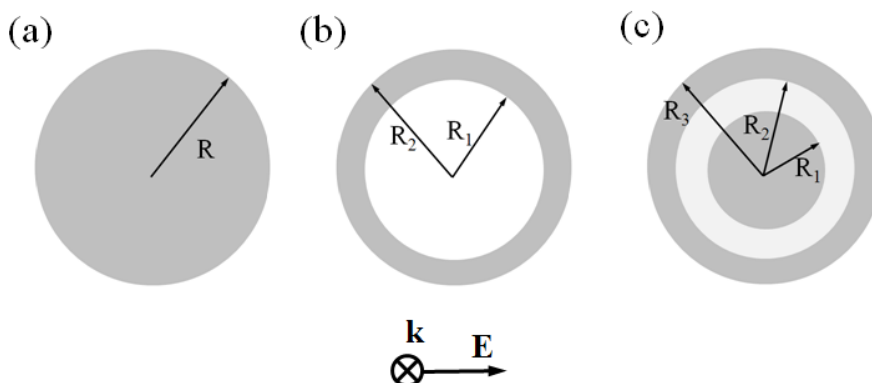


图 1 金纳米球(a)，金纳米壳(b)，以及多层金球壳结构(c)示意图

图 2 给出了不同半径  $R$  下，金纳米球的吸收，散射及消光光谱。颗粒的消光等于吸收和散射相加。由于金球尺寸很小，小于入射光波长。在瑞利散射条件下，散射光强度和颗粒半径  $R^6$  成正比，而吸收强度是和球颗粒半径  $R^3$  成正比<sup>[9]</sup>。所以，我们在图 2 中看到，当  $R$  比较小时 ( $R=20$  nm)，散射相比于吸收很小。随着  $R$  逐渐增大，散射逐渐增大。当  $R=80$  nm 时，金球颗粒的散射大于吸收。此外，随着半径  $R$  的增大，光谱等离子共振峰的波长位置有较小的红移。

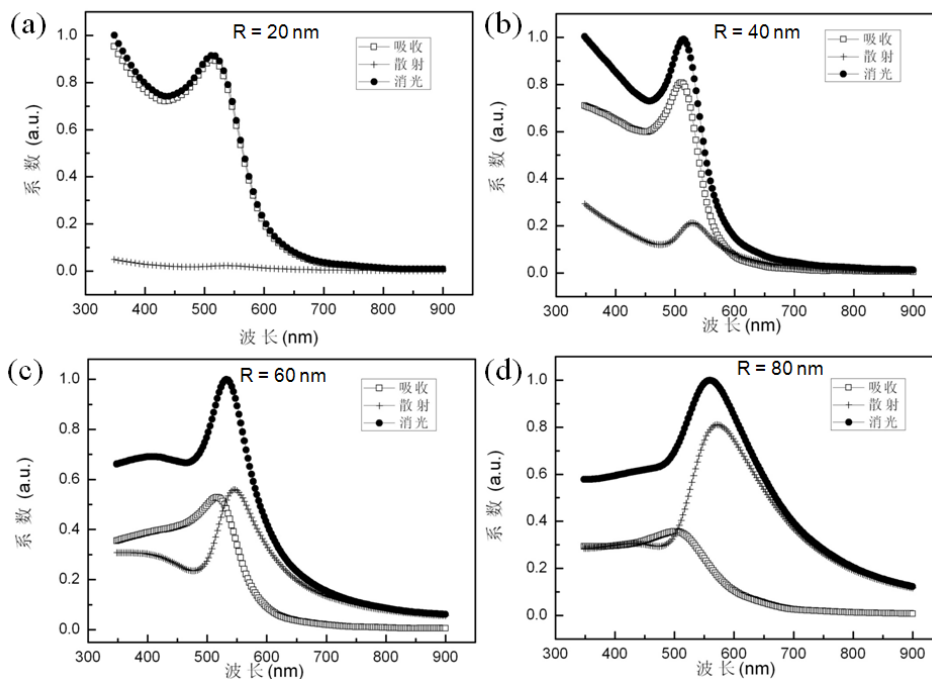


图 2 不同  $R$  下金纳米球的吸收，散射及消光谱

图 3 给出了不同内核半径  $R_1$  下，金纳米球壳的消光光谱，其中  $R_2=60$  nm。我们可以看到，等离子共振峰位置对  $R_1$  的变化十分敏感。在  $R_2$  不变的条件下，随着  $R_1$  的增大，核壳比增大，等离子共振峰波长红移进入近红外区域（700-1000 nm）。在这个区域，光能够透过生物组织，对于生物及医学方面的应用，有很重要的价值。

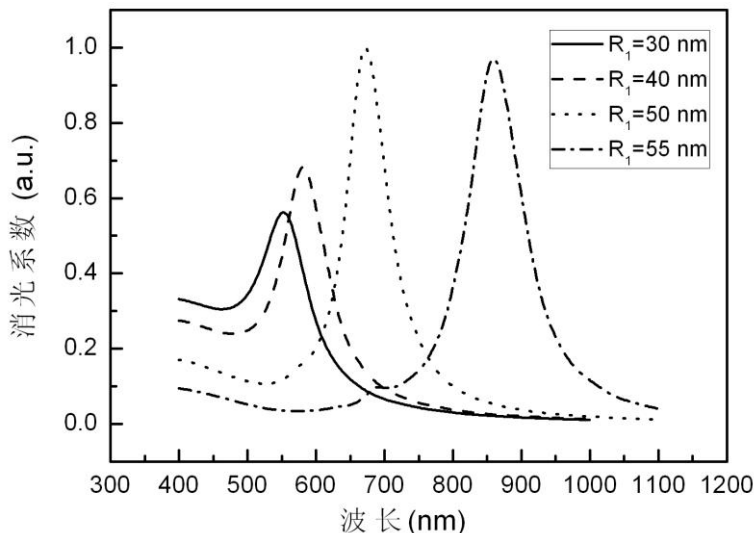


图 3 不同  $R_1$  下金纳米球壳 ( $R_2=60$  nm) 的消光谱

图 4 是不同金核心半径  $R_1$  下，Gold-Silica-Gold 多层球壳结构的消光光谱，其中  $R_2/R_3=50/60$  nm。根据等离子杂化理论[10], Gold-Silica-Gold 多层球壳的等离子共振，可以看做中间金球核心的等离子共振与外面的金纳米壳的等离子共振相互作用。在两者的相互作用下，产生了高能级和低能级的两个等离子共振模式，对应光谱上两个消光峰。随着  $R_1$  的增大，低能峰向红端移动，而高能峰有微小蓝移。可以理解为， $R_1$  的增大，使得金球核心和外层金纳米壳接近，相当于增大了两者的相互作用，从而使得对应的高能峰和低能峰劈裂增大。

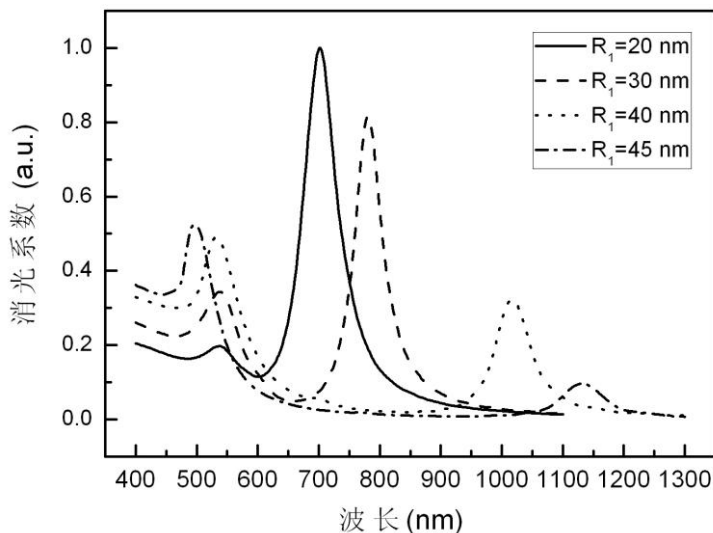


图 4 不同  $R_1$  下 Gold-Silica-Gold 多层球壳 ( $R_2/R_3=50/60$  nm) 的消光谱

图 5 分别给出了，这三种不同结构在等离子共振波长时的电场分布。对  $R=60$  nm 的金球，以及  $R_1/R_2=40/60$  nm 的金球壳，我们可以看到电场的增益主要局域在金颗粒的外表面。

对于  $R_1/R_2/R_3=30/50/60$  nm 多层球壳，无论对于高能峰（530 nm）还是低能峰（780nm），电场的增益很大一部分局域在金球以及外金壳之间的介质层，金壳外表面的电场增益相对较小。

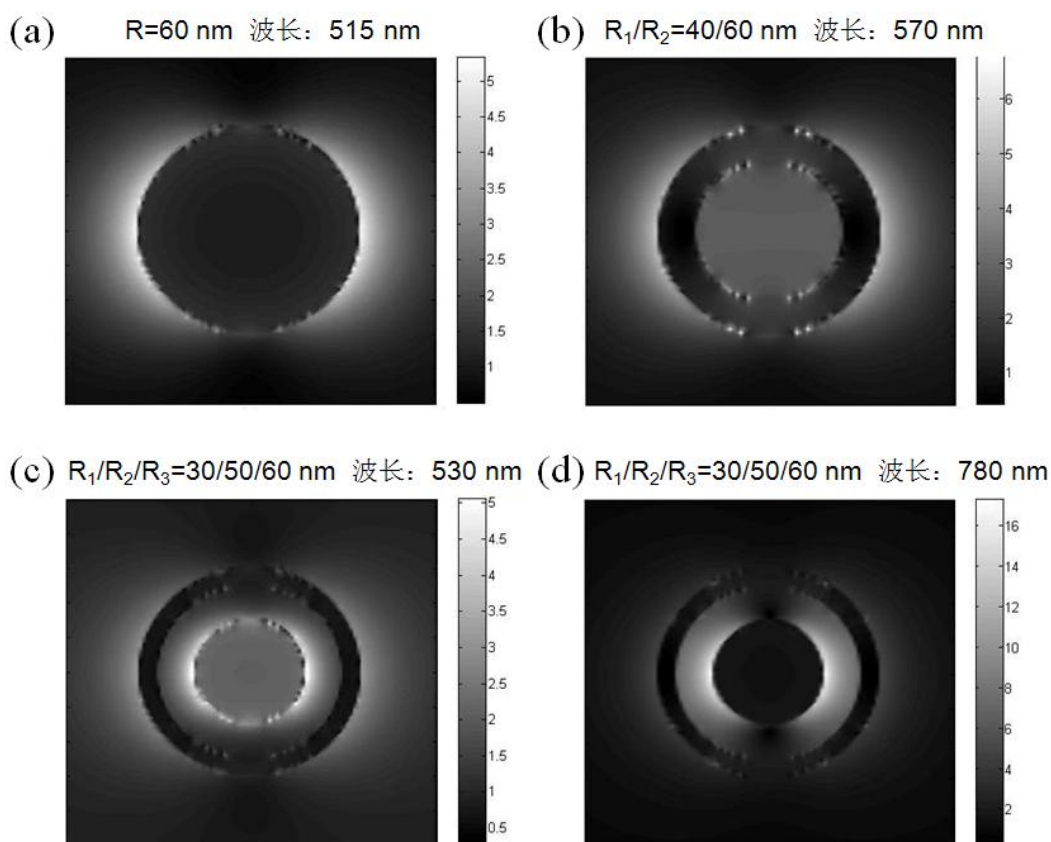


图 5 金纳米球(a),金纳米壳(b),Gold-Silica-Gold 多层球壳(c,d)在共振波长时的电场分布

#### 4 结束语

本实验利用 FDTD 方法，计算了金纳米球，金纳米球壳，及金纳米多层球壳的消光特性以及不同结构共振波长下的电场分布。给出颗粒几何参数对几种结构的消光谱的影响。结果表明，随着二氧化硅核心  $R_1$  的增大，金纳米壳的消光峰显著红移。随着金核心  $R_1$  的增大，Gold-Silica-Gold 多层球壳消光谱的低能峰显著红移，而高能峰微弱蓝移。学生在实验中，可以自行设计结构，分析各参量对金球及球壳结构光学特性的影响。有助于培养学生的创新意识，提高学生的科研能力，有助于学生了解前沿的科学知识。

#### 参考文献:

- [1] Mayer K M, Hafner J H. Localized surface plasmon resonance sensors [J]. Chem. Rev. 2011, 111: 3828-3857.
- [2] Bikram M, Gobin A M, et al. Temperature-sensitive hydrogels with SiO<sub>2</sub>-Au nanoshells for controlled drug delivery [J]. J. Control. Release, 2007, 123: 219 -227.
- [3] Park J, Estrada A, et al. Two-photon-induced photoluminescence imaging of tumors using near-infrared excited gold nanoshells [J]. Opt. Express, 2008, 16: 1590-1599.
- [4] 肖桂娜, 蔡继业. 基于局域表面等离子共振效应的光学生物传感器[J]. 化学进展, 2010, 22: 194-200.
- [5] 张兴坊, 张腊梅, 范群芳, 等. 金纳米球壳结构局域表面等离子体共振调谐特性[J]. 中

- 国激光, 2011, 38: 0910001。
- [6] Hu Y, Fleming R C, Drezek R A. Optical properties of gold-silica-gold multilayer nanoshells [J]. Opt. Express, 2008, 16:19579-19691.
- [7] 陈靖, 陆文强, 孙骞。利用时域有限差分法模拟介质纳米波导的导波特性和[J]。物理实验, 2010, 30: 7-10。
- [8] Johnson P B, Christy R W. Optical-constants of noble-metals [J]. Phys. Rev. B Condens. Matter, 1972, 6, 4370 -4379.
- [9] Van Dijk M A, Tchebotareva A L, et al. Absorption and scattering microscopy of single metal nanoparticles [J]. Phys. Chem. Chem. Phys. 2006, 8: 3486-3495.
- [10] Prodan E, Radloff C, N. J. Halas, et al. A hybridization model for the plasmon response of complex nanostructures [J]. Science, 2003, 302: 419-422.

## Simulation on optical properties of gold sphere and nanoshells by using finite difference time domain method

Qian Jun, Liu Li-jun, Zhang Chun-ling

(School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** We study the optical properties and E-field distribution of Gold nanosphere, Gold nanoshell, and Gold-Silica-Gold multilayer nanoshells. We show that, the geometric parameters have a significant impact on the wavelength of extinction peak.

**Key words:** nanoparticles; extinction; surface plasmon



# 热光二阶关联影响因素实验研究

田 甲, 林海龙, 高 禄

(中国地质大学(北京) 数理学院, 北京 100083)

**摘 要:** 热光 HBT 测量值可定量表示热光场的二阶关联程度。实验研究了物光和参考光的光程差及热光源横向尺寸对热光二阶关联值的影响。实验结果表明, 随着物光和参考光光程差增加, HBT 值会降低并且其半高宽增大; 随着光源横向尺寸增加, HBT 值降低, 其半高宽减小。

**关键字:** 热光; 二阶关联; 分辨率

## 1 引言

1956 年, 汉勃雷-布朗(R. H. Brown)和特威斯(R. Q. Twiss)为测量恒星角直径而设计著名的实验<sup>[1]</sup>。后来人们就以他们的名字命名该实验为“HBT”实验。HBT 实验第一次证实了光的强度关联效应, 实验本身也成为测量强度关联的典型方法, 在量子光学发展史上具有里程碑的意义。

1995 年, 美国马里兰大学的 Yanhua Shih 等人利用自发参量下转换的纠缠光子对完成了一种奇特的成像实验——鬼成像(ghost imaging)<sup>[2]</sup>, 此实验使得在一个没有物体的闲散光路中获得物体的空间信息成为了可能。当时人们认为这是一种量子现象, 只有采用纠缠双光源才能实现鬼成像。2002 年, Rochester 大学的 Boyd 等人巧妙地利用一个随机旋转的反射镜反射激光获得了空间频率随机分布的热光源, 通过光场的强度测量获得了透射物体的鬼成像<sup>[3]</sup>。这个实验结果表明鬼成像实验也可以利用经典光源实现, 而并非是量子光源所特有的现象。这一实验报道更是引起了科学界的一场争辩: 鬼成像实验是否是一种量子现象? 随后, 国内外很多研究组在热光二阶关联测量方面开展了理论和实验研究工作<sup>[4-7]</sup>。到目前为止, 研究结果表明热光源可以模仿纠缠双光子源实现鬼干涉、鬼成像等双光子关联测量实验。

在研究热光二阶关联特性的实验中, HBT 测量是一个必要的实验基础, 因此对于 HBT 影响因素的研究极为关键。本实验中, 采用激光照射旋转毛玻璃形成空间频率随机分布的热光源; 通过改变热光源的横向尺寸及物光和参考光光程差, 研究光源特性及光路设计对热光二阶关联的影响。

## 2 实验原理

HBT 的实验原理图, 如图 1 所示。非相干热光源发出的光被非偏振分束器分成两束, 分别自由传递到达探测器  $D_1$  和  $D_2$ 。将其中一个探测器探测面上某一固定点的光强值与另一个探测器探测面上各个点的光强值进行强度关联测量, 即可获得 HBT 值。

**基金项目:** 北京市自然科学基金(4133086); 中央高校基本业务费。

**指导教师:** 高禄(1982-), 女, 辽宁沈阳人, 中国地质大学(北京)数理学院讲师, 博士, 主要从事大学物理及大学物理实验的教学和研究工作。

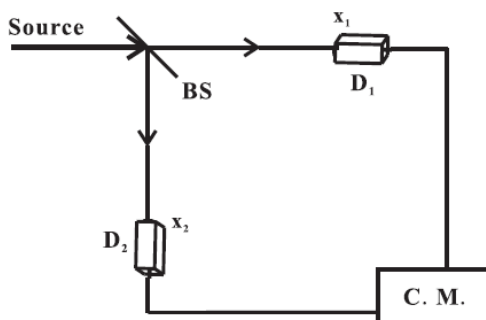


图1 HBT实验原理图。BS: 分束器; D<sub>1</sub>和D<sub>2</sub>: 探测器; C.M.: 关联测量。

根据高斯矩定理,满足高斯统计分布光场的高阶关联可以用一阶关联函数表示,则热光场的二阶关联函数可以表示为

$$\begin{aligned} \langle I_1(x_1)I_2(x_2) \rangle &= \langle E_1^*(x_1)E_2^*(x_2)E_2(x_2)E_1(x_1) \rangle \\ &= \langle E_1^*(x_1)E_1(x_1) \rangle \langle E_2^*(x_2)E_2(x_2) \rangle + \left| \langle E_1^*(x_1)E_2(x_2) \rangle \right|^2. \quad (1) \\ &= \langle I_1(x_1) \rangle \langle I_2(x_2) \rangle + \left| \langle E_1^*(x_1)E_2(x_2) \rangle \right|^2 \end{aligned}$$

式(1)由两部分组成,第一项 $\langle I_1(x_1) \rangle \langle I_2(x_2) \rangle$ 表示探测器D<sub>1</sub>和D<sub>2</sub>处的强度分布的乘积,是直流背景项;第二项 $\left| \langle E_1^*(x_1)E_2(x_2) \rangle \right|^2$ 表示光场的二阶关联信息。

光场从光源横截面到探测器的探测面自由传播的脉冲响应函数可以表示为

$$h(x_j, x_0) = \frac{k}{2\pi z} \exp\left[-\frac{i\pi}{4} + ik\sqrt{(x_j - x_0)^2 + z^2}\right], \quad (2)$$

其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为光场的波数, z是从光源横截面到探测器的探测面的距离,  $x_i$ 和 $x_0$ 分别表示探测面和光源横截面的空间横向坐标。在近轴近似条件下,式(2)可以写为

$$h(x_j, x_0) = \sqrt{\frac{k}{2\pi z}} \exp\left[-\frac{i\pi}{4} + ikz + \frac{ik}{2z}(x_j - x_0)^2\right]. \quad (3)$$

假设理想情况下,热光源发出的光具有无穷小的相干长度,热光源横截面的一阶关联函数可以表示为

$$\langle E_0(x)E_0(x') \rangle = S_0\delta(x_0 - x_0'), \quad (4)$$

这里假设光场强度分布为常数 $S_0$ 。将式(3)和(4)代入到(1)中的关联项,可以得到光场的一阶互关联函数为

$$\begin{aligned}
 & \langle E_1^*(x_1)E_2(x_2) \rangle \\
 &= \iint h_1^*(x_1, x_0)h(x_2, x_0)\delta(x_1 - x_0)\delta(x_2 - x_0)dx_0 \\
 &= \frac{kS_0}{2\pi z} \exp\left[\frac{ik(x_2^2 - x_1^2)}{2z}\right] \int_{-r}^r \exp\left[\frac{ik(x_1 - x_2)x_0}{z}\right] dx_0, \quad (5) \\
 & \frac{S_0kr}{\pi z} \exp\left[\frac{ik(x_2^2 - x_1^2)}{2z}\right] \text{sinc}\left[\frac{2\pi r(x_1 - x_2)}{\lambda z}\right]
 \end{aligned}$$

其中  $r$  为光源发光面的尺寸半径。于是，我们可以得到 HBT 实验的二阶关联函数

$$\langle I_1(x_1)I_2(x_2) \rangle = \left(\frac{krS_0}{\pi z}\right)^2 \left\{1 + \text{sinc}^2\left[\frac{2\pi r(x_1 - x_2)}{\lambda z}\right]\right\}, \quad (6)$$

固定一个探测器，扫描另一个探测器就可以得到

$$\langle I_1(0)I_2(x) \rangle = \left(\frac{krS_0}{\pi z}\right) \left[1 + \text{sinc}^2\left(\frac{2\pi rx}{\lambda z}\right)\right]. \quad (7)$$

式(7)表示非相干热光源 HBT 实验测得的二阶关联函数形式，其归一化形式可以表示为

$$g^2(0, x) = 1 + \text{sinc}^2\left(\frac{2\pi rx}{\lambda z}\right). \quad (8)$$

从式(8)中可以看到，归一化 HBT 曲线的半高宽与光源距探测面的距离  $z$ 、光源的尺寸  $R$  及波长  $\lambda$  有关。HBT 曲线的半高宽随着  $z$  的增加而增大，随着  $r$  的增加而减小。HBT 理论曲线如图 2 所示。

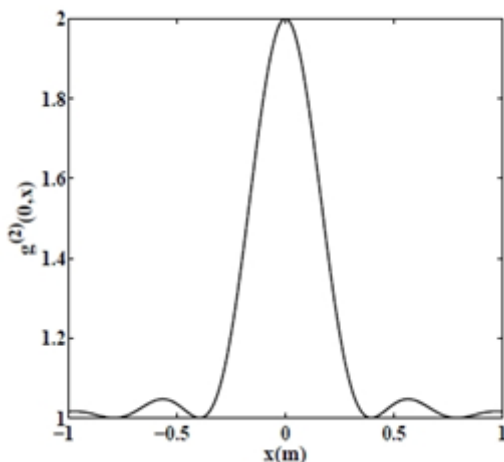


图 2 HBT 理论曲线图

### 3 实验研究

#### 3.1 实验装置

实验光路如图 3 所示。波长为 632.8nm 的激光器发出的激光经过平面镜 M 反射，依次通过偏振片  $P_1$  和  $P_2$ ，它们的作用是保证光源为线偏振光，同时可以组合调节光强。扩束透镜 N 可以调整激光光斑的大小。经扩束后的激光照射在转动的毛玻璃 G 上形成空间频率随机分布的赝热光源。 $P_3$  为放置在热光源附近的光阑，用来调节热光源的横向尺寸。 $BS$  为 50/50 非偏振分束器，可以把光源发出的光束分为两束，两束光分别自由传递到探测器  $D_1$  和  $D_2$  的探测面。两探测器的探测面距离热光源 G 的距离分别为  $d_1$  和  $d_2$ 。两个探测器分别连接计算机中采集卡的端口，由相应的采集程序进行数据采集和测量，并将数据存储在计算机中。

依据 HBT 原理，本实验所采用的采集方式为：取探测器  $D_1$  探测面上某一固定点值与另

一个探测器  $D_2$  探测面上的各个点的光强值进行关联测量，对采集到的数据进行归一化关联计算，从而得到光场的二阶关联 HBT 值。

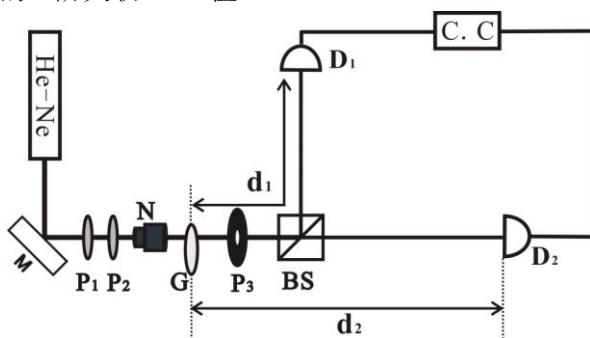


图 3 HBT 实验装置图。He-Ne:激光器；M: 反射镜； $P_1, P_2$ : 偏振片；N: 扩束透镜；G: 毛玻璃； $P_3$ : 光阑；BS: 分束器； $D_1, D_2$ : 探测器；C. C: 关联测量。

### 3.2 实验过程及结果

首先是固定光阑  $P_3$  的直径为 3mm，通过改变探测器  $D_2$  距离光源的光程，改变物光和参考光两光路的光程差，测量相应的 HBT 值。探测器  $D_1$  保持位置不变，距离分束器 BS 的距离为  $d_1=31.8\text{cm}$ ，探测器  $D_2$  的位置依次变化使光程差分别为  $\Delta d=d_2-d_1=0\text{cm}, 5\text{cm}, 10\text{cm}$  和  $20\text{cm}$ 。实验结果如图 4 所示。图 4 中的四条曲线分别是光程差  $\Delta d=0\text{cm}, 5\text{cm}, 10\text{cm}, 20\text{cm}$  时所测得 HBT 值。当  $\Delta d=0\text{cm}$  时，归一化的 HBT 值达到了 1.935，接近理想值 2；随着探测器到光源光程差的增加，HBT 值逐渐减小。当光程差  $\Delta d$  达到  $20\text{cm}$  时，二阶关联的 HBT 值减到 1.221，二阶关联值变得较低。实验结果表明：热光二阶关联随着两个光路光程差的增大而下降，同时曲线的半高宽也随之增大，导致二阶关联测量的分辨率降低。所以在上述热光二阶关联实验测量系统中，在光源尺寸是直径为 1mm 的圆形区域情况下，物光和参考光两光路的光程差不能大于  $20\text{cm}$ ，否则二阶关联特性将消失。

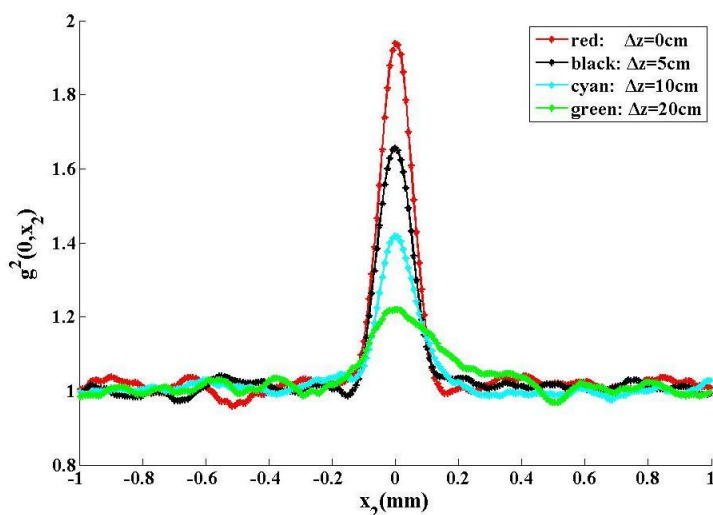


图 4 HBT 值随光程差变化曲线

其次，固定探测器  $D_1$  和  $D_2$  的位置，即  $d_1=d_2=31.8\text{cm}$ 。通过改变光阑  $P_3$  的直径即热光源的横向尺寸，测量相应的 HBT 值。实验测量结果如图 5 所示。四条曲线分别是光阑  $P_3$  直径  $D$  分别为 1mm, 2mm, 5mm, 10mm 时，所测得的 HBT 值。实验结果表明：当光阑直径为 1mm 时，关联值达到 1.797；随着光阑直径的增大，HBT 值逐渐减小，当直径增加到 10mm 时，

二阶关联值下降到 1.361。由此可见，强度关联值随着热光源横截面尺寸的增大而降低。同时，HBT 曲线的半高宽随着光阑直径的增加而减小，这说明热光二阶关联测量系统的分辨率随着光阑直径的增加而提高。

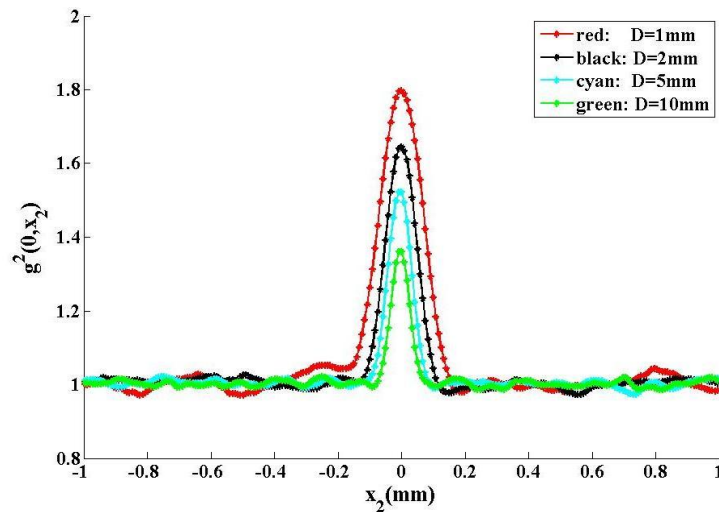


图 5 HBT 值随光阑直径变化曲线

#### 4 结语

热光的归一化二阶关联 HBT 值与物光和参考光光程差及光源的横截面尺寸有紧密联系。研究表明，随着热光二阶关联测量系统中物光和参考光光程差增加，HBT 值会随之降低，而且曲线的半高宽也随之增加，导致系统的测量分辨率降低。随着光源横截面尺寸增加，即实验装置中光阑  $P_3$  直径增大，HBT 值也会随之降低，但是曲线的半高宽却随之减小，系统的测量分辨率提高。这说明尽管光源横截面尺寸的增加可以提高热光关联系统的测量分辨率，但是要以降低图像可见度为代价。本文的研究结果，对于开展热光二阶关联实验教学和研究具有指导意义。

#### 参考文献：

- [1] R H Brown, R Q Twiss. Correlation between photons in two coherent beams of light[J]. Nature, 1956, 177, 27.
- [2] T B Pittman, Y H Shih, D V Strekalov, A V Sergienko. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement, Phys. Rev. A 52, 1995, R3429–R3432.
- [3] R S Bennink, S J Bentley, R W Boyd. ‘Two-Photon’ Coincidence imaging with aclassical source, Phys. Rev. Lett., 2002,89, 113601.
- [4] De-Zhong Cao, Kaige Wang. Sub-wavelength Interference in macroscopic observation [J]. Phys. Lett. A, 2004, 333, 23-29.
- [5] GAO Lu, XIONG Jun, ZHANG Shu-Heng, WANG Wei, WANG Kai-Ge. Improving Visibility of Diffraction Pattern with Pseudo-Thermal Light, CHIN. PHYS. LETT., 2008, 25(4): 1277.
- [6] 李璐, 关东石, 刘宏超, 张素恒, 熊俊。光的偏振性对HBT实验的影响[J]。量子光学学报, 2009 (3): 201-206。
- [7] 高禄, 张颖涛, 汪凯戈。相位物体的热光关联成像[J]。量子光学学报, 2006 (B08)。

## Experimental Research on the influence factors of thermal light HBT

(School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The measured HBT value of thermal light can numerically represents the second order correlation degree of the thermal light field. The effect of the transverse size of thermal light source and the optical path difference of the two light beams on the thermal light second order correlation has been experimentally studied. The research results show that the value of HBT will decrease with the increase of the transverse size of the thermal light source, and the half height width of HBT will decrease. The value of HBT will decrease with the increase of the optical path difference between the two beams, but the half height width of HBT will increase.

**Key words:** thermal light; second order correlation; resolution

# 基于聚合物全息光盘的大容量体全息存储演示仪

刘鸿鹏, 王维波

(中国民航大学 理学院, 天津 300300)

**摘要:** 依据体全息存储基本原理, 以光致聚合物作为记录介质开发高密度、大容量体全息信息存储演示仪。自行研制具有一次写入永久读取能力的聚合物盘式信息存储介质, 并测试材料的存储性能与演示仪图像存储能力。演示从信息采集、处理、存储, 到读取全过程。使学生了解下一代信息存储技术, 存储介质的制备与成型工艺, 掌握信息记录的光化学机理。

**关键词:** 全息存储; 光致聚合物; 全息光盘

## 1 引言

二十一世纪人类对于数据存储的需求, 每年以指数形式增长。二维面存储技术如磁存储、传统光盘存储和半导体存储等仍在不断地改进以满足对存储系统容量更大和传输更快等要求, 然而这些存储手段正逐步接近其物理极限。例如光盘存储由于其波长的衍射极限将显著限制其存储密度。目前正在迅速发展的一种有别于传统技术的方法就是三维信息存储技术。体全息存储技术便是其中最引人注目的一种。体全息信息存储是替代现今的 CD、DVD 和蓝光光盘的下一代信息存储的首选技术, 由于其存储容量大、传输速率高而备受人们关注。近些年国外一下发达国家, 如美国、日本和英国相继投入了大量的人力物力对其加以重点研究。而国内仅有少数几个单位在从事相关领域的研究工作。目前国内市场还没有相关产品, 因此对体全息存储系统的开发必将带来显著的社会与商业价值。

从教学上讲, 理工科本科学生在学习过程中有必要了解前沿的数据存储技术并掌握其存储原理。因此开发高密度大容量体全息存储演示实验系统, 能够直观展示现代数据存储领域的最新科技成果, 使学生更好的学习相关原理, 掌握信息从采集、传输、存储到读取整个方式, 这将有助于提升学生的知识水平, 为综合型人才培养提供帮助。

## 2 全息光盘存储介质的研制

对于一次写入永久读取的大容量体全息光存储介质而言, 目前研究的较为广泛的材料主要包括两种, 分别是: 以丙烯酰胺为单体, 聚乙烯醇为基底, 掺杂光敏染料的聚合物存储体系<sup>[1,2]</sup>; 及以聚甲基丙烯酸甲酯为聚合基底, 掺杂菲醌光敏成分的聚合物存储系统<sup>[3-5]</sup>。丙烯酰胺存储系统由于其高水溶性与成膜性能, 适合于制备成薄膜状, 对于实现大容量多层存储是不利因素。而菲醌掺杂的聚甲基丙烯酸甲酯光致聚合物(英文简称 PQ-PMMA, 其中 PQ 代表菲醌, PMMA 代表聚甲基丙烯酸甲酯)能够制备较高的厚度, 适合于高密度大容量的信息存储, 同时具有较高的衍射效率与热稳定性, 近年来受到了研究人员的广泛关注。

材料的制备方法采用引发剂热致聚合。首先将菲醌黄色粉末与甲基丙烯酸甲酯溶液(英文简称 MMA)照一定的质量百分比常温混合均匀, 而后向其中加入热引发剂偶氮二异丁氰(英文简称 AIBN)。通过孔径为 20 $\mu\text{m}$  的过滤坩锅将混合液体过滤, 滤除其中的杂质与未溶物, 将澄清的混合物常温静置 24 小时, 使其排除内部气泡; 然后将温度升至 MMA 的聚合温度, 通过热引发剂 AIBN 引发 MMA 单体的链式聚合反应, 在真空中精确控制温度使引发

**作者简介:** 刘鸿鹏(1982—), 男, 辽宁人, 讲师, 博士, 研究方向主要包括: 有机光电功能材料、大容量体全息存储材料及全息光学装置。

后的材料聚合均匀。放置一周后材料成为厚度为毫米量级略微发黄色的透明固体，经过打磨、抛光后便可以用于全息存储实验研究。所制备的样品如图 1 所示。而 PQ 分子仅对波长小于 550nm 的光敏感，对热不敏感，在热引发过程中没有参与反应，因此该制备过程对于光敏剂 PQ 分子浓度没有影响。

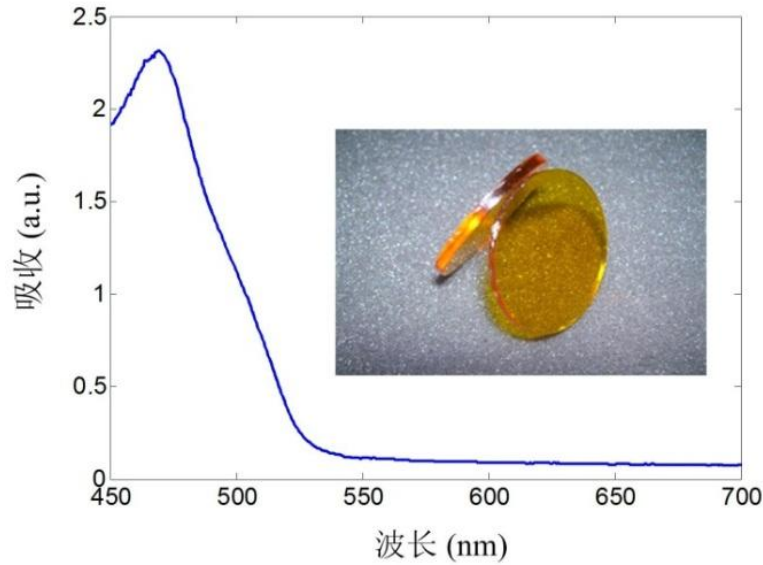


图 1 实验室自行研制的基于 PQ-PMMA 的光致聚合物全息光盘，及其吸收谱

### 3 光化学反应机制分析与材料性能测试

本节简要分析材料内部的光化学反应过程，此时忽略光化学反应过程中复杂的链式聚合反应，由于 PQ 分子浓度的改变是光栅折射率调制形成的主要原因，仅考虑导致 PQ 分子浓度改变的主要反应过程。当一束准直的光照射到材料上，其内部光化学反应过程描述如下 [6,7]



其中 R 代表组成聚合物材料的 MMA 分子或 PMMA 大分子，R<sup>\*</sup> 代表分子吸收光子后形成的自由激子，H 代表反应物分子中的氢原子，光产物为由两种自由激子键合后形成的大分子。k<sub>d</sub>、k<sub>i</sub>、k<sub>t</sub> 分别是激子产生速率常数，引发速率常数与终止速率常数。

PQ 分子的消耗与自由基产生和引发反应有关，可以写为

$$-\frac{\partial[\text{PQ}](t)}{\partial t} = R_d + R_i \quad (4)$$

其中 R<sub>d</sub> 自由基产生速率，R<sub>i</sub> 引发反应速率，[PQ] 是光敏剂 PQ 分子浓度。在本文以后的各个章节中均采用符号‘[]’作为分子浓度的表示形式。单体自由基产生速率远快于光吸收过程自由激子的产生速率，因此引发反应速率可以写为 R<sub>i</sub> = R<sub>d</sub> = f k<sub>d</sub> [PQ]，其中系数 f 为反应系数，代



表由于笼蔽效应仅有一部分自由基参与反应, 方程(4)的解可以写成

$$[\text{PQ}](t) = [\text{PQ}]_0 \exp(-fk_d t) = [\text{PQ}]_0 \exp(-E/E_\tau) \quad (5)$$

其中  $E$  是曝光能量,  $E_\tau = I_0/fk_d = 1/\kappa$ ,  $\kappa$  定义为聚合速率参数,  $[\text{PQ}]_0$  是光敏剂 PQ 分子曝光初始时刻的浓度。因此相应的光产物浓度的增长速率描述为

$$[\text{Photopolymer}](t) = [\text{PQ}]_0 [1 - \exp(-E/E_\tau)] \quad (6)$$

根据 Lorentz-Lorentz 关系<sup>[3]</sup>, 材料空间任意一点的折射率调制度与材料主要成份的调制浓度成正比, 可以写为

$$\Delta n(E) \propto \Delta[\text{Photopolymer}](E) \quad (7)$$

将方程(5)与(6)带入方程(7), 最终得到折射率调制度以如下形式增长

$$\Delta n(E) = C_1 - C_2 \exp(-E/E_\tau) \quad (8)$$

其中  $C_1$ ,  $C_2$  为与分子浓度有关的常数。

如果考虑到调制光照射过程, 各种分子的扩散将需要考虑, 此时的模型称作扩散模型。同时由于聚合物曝光过程存在链增长的过程, 因此光产物并不是局限于空间某一个点, 而是具有一定的空间分布, 这里采用高斯形式的非局域空间分布, 从而得到聚合物材料的扩散方程如下:

描述自由 PQ 分子链式聚合与扩散的一维非局域扩散方程表述如下

$$\frac{\partial U(x,t)}{\partial t} = \left( \frac{\partial D(U)}{\partial U} + D(U) \right) \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2} - \int_{-\infty}^{+\infty} R(x,x') E(x',t) dx' \quad (9)$$

对于 PQ-PMMA 光致聚合物, 其中  $U(x,t)$  代表 PQ 分子的浓度,  $D(U(x,t))$  代表与 PQ 浓度有关的扩散系数,  $R(x,x')$  是非局域响应函数, 代表在  $x'$  点的 PQ 分子浓度对  $x$  点聚合的 PQ 分子的影响。  $E(x',t)$  代表与光强和聚合速率有关的聚合物消耗, 其非局域响应函数可以表述为<sup>[8]</sup>

$$R(x,x') = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[ -\frac{(x-x')^2}{2\sigma} \right] \quad (10)$$

其中  $\sigma^{1/2}$  代表有效链长度。曝光  $t$  时间后, 在  $x$  点聚合的 PQ 分子浓度, 相应的光产物浓度可以写成

$$P(x,t) = \int_0^t \int_{-\infty}^{+\infty} R(x,x') E(x',t') dx' dt' \quad (11)$$

折射率调制度仍然能够依据方程(8)的描述。

#### 4 高密度大容量体全息存储演示仪的解决方案

针对体全息存储原理构建存储系统, 搭建信息存储实验平台。体全息信息存储采用二波耦合原理, 将信息以光栅形式记录于聚合物材料内部。一束 532nm 的绿色激光由 DPSS 型半导体激光器发出后经过准直系统, 然后通过偏振分光棱镜被分为两束。其中一束经过扩束, 打到空间光调制器 (SLM) 上, SLM 通过光学相位调制方式使该光束携带相关数据信息。光束再经过傅立叶透镜汇聚于样品内部。另外一束参考光经过反射后直接打在样品上。这样两束相干光便能够在样品内部发生干涉, 将光强的空间调制记录于样品内部, 从而永久的记

录信息。由于是采用体全息方式，高厚度的样品能够实现大容量、高密度的一次写入永久读取的信息存储方式。通过角度与空间平移复用，能够有效提高存储容量与密度。大容量体全息存储演示仪原理与实验室搭建的装置如图 2 所示。

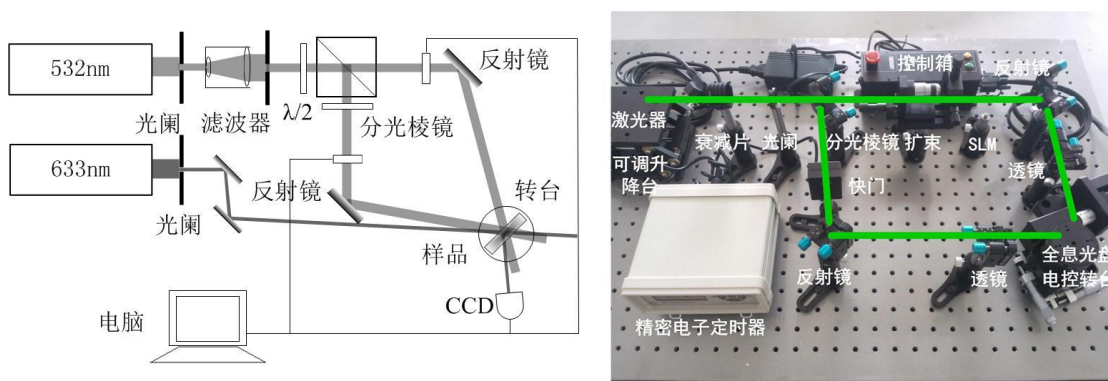


图 2 基于聚合物全息光盘的大容量全息存储演示仪实验原理与装置实物图

依据实验装置，下面主要介绍演示的操作步骤。

**信息采集：**信息的采集过程中，演示人员或学生可以通过数码相机、数码摄像机等将图片信息采集并转换成空间光调制器能够读取的信息格式。也可以通过打印方式将图片信息直接打印在透明塑胶片上，并置于信号光路，用于直接将信号光调制使之携带信息。

**预处理：**预处理过程的目的是将通过数码相机采集的数字图片的分辨率调至与空间光调制器相同，进而能够输入其中，使其能够顺利调制信号光。还包括将图像转换成黑白灰度图像，亮度调节等。

**信息写入：**信息的写入过程是整个全息信息存储演示过程的关键。依据实验装置原理图，将波长为 532nm 的准直激光分成两束，一束作为信号光，扩束后照射到空间光调制器（或者是由透明片携带的信息），将光束进行调制，使之携带相应的信息。另外一束作为参考光，反射后直接照射到样品上。两束光重叠于样品内部，依据光学相关原理在样品内部形成光强度空间调制，并导致样品内部化学成分形成相应的调制，从而形成相位型体光栅，将信息记录。该信息记录于材料内部是可永久保存，并多次读取的。

**信息读取：**信息读取过程将信号光路关闭，仅保留参考光路。依据光栅衍射原理，在原始记录角度应用原波长记录光入射样品后，记录于材料内部的信息能够在原信号光方向完全再现，通过 CCD 能够直接显示在计算机屏幕上，也可以通过屏幕直接显示图案。

图 3 所示为材料的衍射效率时间变化曲线，记录光强为  $45\text{mW}/\text{cm}^2$ 。右侧为记录图像与记录后 15 分钟的再现图像。可以看出材料有着较高的衍射效率，到达稳态后光栅是稳定的。经过演示仪再现的图像均匀性较好，这说明该演示仪能够用于体全息信息存储的演示。

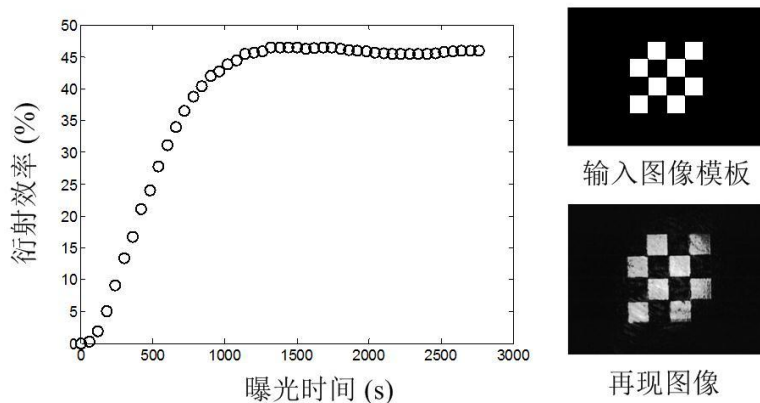


图 3 材料衍射效率性能测试曲线与通过全息演示装置再现的图像

## 5 结论

自行研制了基于 PQ-PMMA 光致聚合物的高厚度全息光盘。并基于光致聚合物全息光盘，研制大容量体全息信息存储演示仪。通过光化学反应分析，对曝光过程小分子的扩散与聚合行为进行了研究。并测试了材料的全息性能，获得了具有较高图像质量的演示仪再现图像。最后归纳总结了演示仪从信息采集、处理、存储，到信息的读取全过程。基于聚合物全息光盘的大容量全息存储演示仪将使学生了解下一代信息存储技术的实现过程，存储介质的制备与成型工艺，掌握信息记录的光化学机理与相应的光学原理。

### 参考文献：

- [1] Sergi Gallego, Andr s Márquez, Stephan Marini, et al. In dark analysis of PVA/AA materials at very low spatial frequencies: phase modulation evolution and diffusion estimation. *Optics Express*, 2009, 17: 18279-18291.
- [2] Michael R. Gleeson, Shui Liu, Sean O’Duill, et al. Examination of the photoinitiation processes in photopolymer materials. *J. Appl. Phys.*, 2008, 104, 064917: 1-8.
- [3] A V Veniaminov, and Yu N Sedunov, Diffusion of Phenanthrenequinone in Poly (methyl methacrylate): Holographic Measurements, *Polymer Sci. Ser. A.*, 1996, 38: 56-63.
- [4] G J Steckman, I Solomatine, G Zhou, and D Psaltis. Characterization of phenanthrenequinone-doped poly (methyl methacrylate) for holographic memory, *Opt. Lett.* , 1998, 23(16): 1310-1312.
- [5] S H Lin, K Y Hsu, W Z Chen, et all. Phenanthrenequinone-doped poly (methyl methacrylate) photopolymer bulk for volume holographic data storage, *Opt. Lett.*, 2000, 25(7): 451-453.
- [6] Hongpeng Liu, Dan Yu, Xuecong Li, et al. Diffusional enhancement of volume gratings as an optimized strategy for holographic memory in PQ-PMMA photopolymer. *Optics Express* , 2010, 18, 6447-6454.
- [7] L P Krul, V Matusевич, D Hoff, et al. Modified polymethylmethacrylate as a base for thermostable optical recording media, *Opt. Express*, 2007, 15(14): 8543-8549.
- [8] J T Sheridan, and J R Lawrence. Nonlocal-response diffusion model of holographic recording in photopolymer, *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, 17(6): 1108-1114.

Liu Hong-peng, Wang Wei-bo

(College of Science, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Based on the principle of volume holographic storage, demonstration instrument of holographic data storage are investigated by photopolymer as a recording media. The media disc of polymer with write once read memory is prepared. The holographic storage characteristics of materials and corresponding instrument are measured and analyzed experimentally. The new demonstration instrument can demonstrate all of the process including data collection, process, storage and read. The preparation of medium, molding technics, and photochemical mechanism of the photopolymer can present to the student for understanding next information storage technology.

**Key words:** Holographic storage; Photopolymer; Holographic disc

# 利用霍尔效应研究热退火对黑硅材料电学性质的影响

王科范, 刘平安

(河南大学 物理与电子学院, 河南 开封 475004)

**摘要:** 利用霍尔效应来测量不同温度热退火后的黑硅的霍尔系数、载流子浓度、载流子迁移率和电导率。我们发现随着热退火温度的升高, 黑硅内载流子的浓度缓慢下降, 载流子迁移率却同步增加, 这说明黑硅内载流子散射的主要形式是电离杂质散射。

**关键词:** 黑硅; 载流子浓度; 迁移率; 霍尔效应

## 1 引言

IV 族半导体材料硅是应用最广泛、工艺最成熟的半导体材料。由于它具有较强的耐高温能力, 价格低廉以及储备资源丰富等优点, 而被广泛应用于现代半导体和大规模集成电路。但是, 硅材料却并不特别适合用来制作光电子器件, 这是因为硅的折射率较高, 反射损失可达 40% 以上, 这就降低了光电子器件的实际效率; 硅的禁带宽度为  $1.12\text{eV}$ , 这决定了它不能吸收波长大于  $1.1\mu\text{m}$  的太阳光。因此, 减少晶体硅表面的反射、扩展硅的吸收波长一直是硅基红外探测器和太阳电池的研究热点<sup>[1]</sup>。

这方面的研究近期取得了突破性的进展。1997 年美国哈佛大学的 Eric Mazur 教授领导的研究小组偶然发现了一种全新的硅表面改性技术。他们在  $\text{SF}_6$  气氛中, 使用飞秒激光扫描硅片表面时, 发现硅表面由带光泽的灰色转变为纯黑色, 这种新型硅材料也因此得名“黑硅”。进一步的测试表明, 黑硅表面呈现准规则的微米量级的尖锥结构, 它对从紫外到中红外波长(波长范围  $250\sim 2500\text{nm}$ ) 的光几乎全部吸收, 并且具有良好的可见和近红外发光性能, 它还可以辐射太赫兹波等。这种黑硅材料一经出现就引起了美国各大著名科学杂志的竞相报道, 他们认为黑硅在遥感、光通信以及微电子等领域都具有重要的应用价值。<sup>[2, 3]</sup>哈佛大学的 Eric Mazur 教授评论说: “黑硅拓展了我们原先所熟知的技术, 而且可以被应用在硅原本无法涉及的领域。我坚信这是一种新材料, 相当于 60 年前的半导体。”<sup>[4]</sup>

另一方面, 目前近代物理实验层次的霍尔效应实验仍偏重于验证性质, 对学生要求不高, 这对于那些有志于继续深造的高年级本科生来讲还远远不够。为了让这部分学生早日接触科学研究前沿, 初步体验真实的科学研究工作, 我们尝试设计出一系列的研究性实验项目, 希望通过这些实验项目来拓宽他们的知识面, 激发他们从事科学研究的热情。本文描述的实验内容即是这些实验项目之一。

## 2 黑硅样品的制备及霍尔测试

我们选用直径为 3 英寸, 厚度为  $390\mu\text{m}$ , 双面剖光, 晶面取向为 (001) 的 p 型硼掺杂硅单晶片作为衬底片, 电导率为  $1\sim 10\Omega\text{cm}$ 。第一步, 我们把圆形的硅单晶衬底片切成  $1\text{cm}\times 1\text{cm}$  的许多小方片; 第二步, 对这些硅衬底小方片进行表面化学刻蚀。将它们整齐放

---

**资助项目:** 国家自然科学基金 (No. 61204002)

**作者简介:** 王科范 (1979-), 男, 河南人, 河南大学物理与电子学院电子系副教授, 博士(后), 主要研究方向为半导体材料物理与化学。

**通讯作者:** 刘平安 (1965-), 男, 河南人, 河南大学物理与电子学院电子系副教授, 普通物理实验室主任, 主要研究大学物理实验教学。

进聚四氟乙烯制作的样品篮内，再将样品篮放进配制好的刻蚀液内。刻蚀液为氢氧化钠和异丙醇的混合水溶液，其中氢氧化钠的质量百分含量为 2.5%，异丙醇的体积百分含量为 6%，刻蚀液的温度保持在 80℃。刻蚀时间为 40 分钟。刻蚀完成后，用去离子水反复冲洗硅衬底片，再用高纯氮气吹干备用。第三步，对刻蚀后的硅衬底片进行  $^{32}\text{S}^+$  离子注入，注入剂量为  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ ，注入电压为 200keV。为了避免沟道效应，让衬底片的法线方向偏离离子束方向 7°。离子注入前后硅衬底片的表面形貌变化很小，但是它的表面层由于离子轰击会产生很多晶格损伤。第四步，为了消除晶格损伤，我们对离子注入后的硅衬底片进行纳秒激光退火。选用的激光器为 KrF 准分子激光器，激光波长为 248nm，脉冲时间为 20ns，光斑尺寸为  $3\text{mm} \times 1\text{mm}$ ，能量密度为  $1.0 \text{J/cm}^2$ 。衬底片上平均每点激光脉冲数为 4 个。至此，黑硅样品制备完毕。为了研究热退火对黑硅样品电学性质的影响，我们将黑硅样品放进真空管式炉内，在高纯氮气气流的保护下，在 200~800℃ 温度范围内以 100℃ 为温度间隔进行热退火，每个温度点热退火时间为 30 分钟。

样品制备阶段的表面形貌是用扫描电子显微镜（Scanning Electron Microscope）来观察的，其型号为日本日立公司生产的 JSM-6301F。样品的室温霍尔效应是采用范德堡法测量的；磁场是由一块永磁体产生的，它的磁场强度为 0.5 特斯拉；电压和电流是由 Keithley 6514 静电计测量的；金属电极是由焊接在样品方片侧边中点的金属钢构成的。

### 3 实验结果与讨论

化学刻蚀后，衬底片表面布满了金字塔结构，如图 1 所示。这些金字塔结构的形成是由于刻蚀液对  $\text{Si}\langle 001 \rangle$  面和  $\langle 111 \rangle$  面的刻蚀速率不同所致。<sup>[5]</sup> 金字塔结构的侧面是  $\langle 111 \rangle$  面。在可见光波段，这些金字塔结构可以将硅表面的反射率降低到 10% 左右。

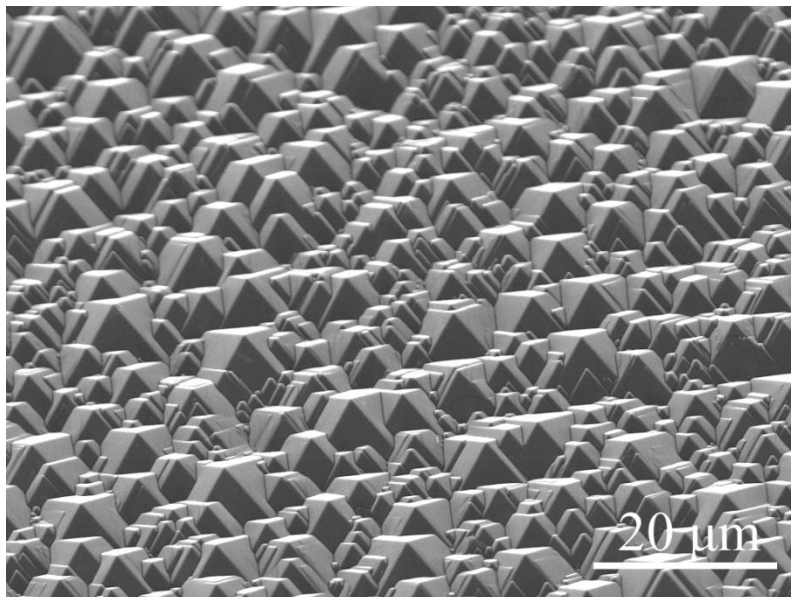


图 1 化学刻蚀后的硅衬底片的表面形貌

硫离子注入之后，硅样片的表面形貌没有明显变化。离子注入后硫离子在硅样片内部的浓度分布可以通过模拟软件 SRIM 计算出，<sup>[6]</sup> 结果如图 2 所示。从图中我们可以看出，硫离子浓度的深度分布为高斯分布，最深处约在样品表面以下 350nm 处。

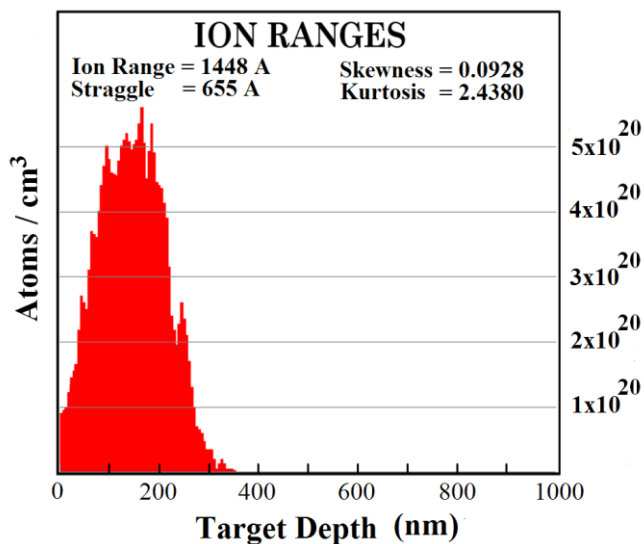


图 2 离子注入后硫离子浓度在硅样品内的深度分布模拟结果

纳秒激光退火之后，金字塔结构转变为圆屋型结构，如图 3 所示。纳秒激光退火时，金字塔结构表面的硅材料快速熔化变成液态，这些液态的硅熔体在表面张力的作用下使表面变得圆滑。前人的研究表明，纳秒退火后离子注入层的晶格损伤可以完全消除<sup>[7]</sup>。

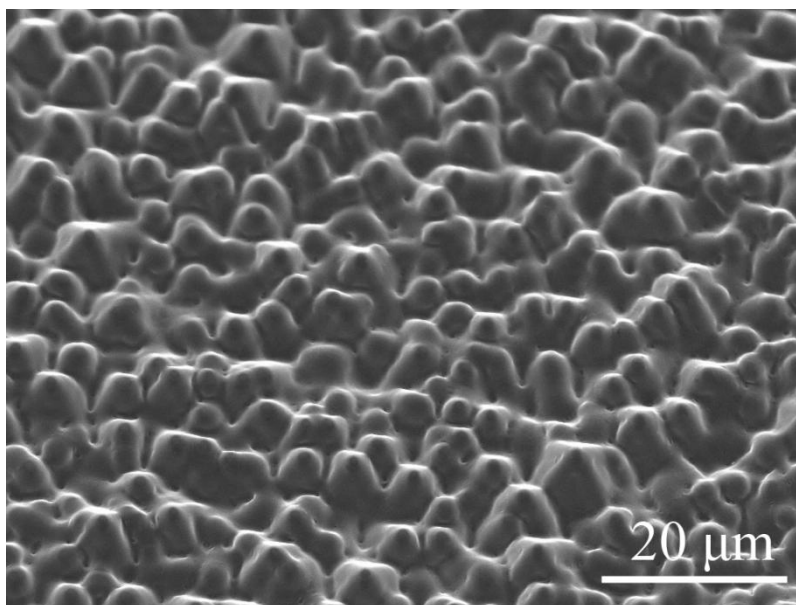
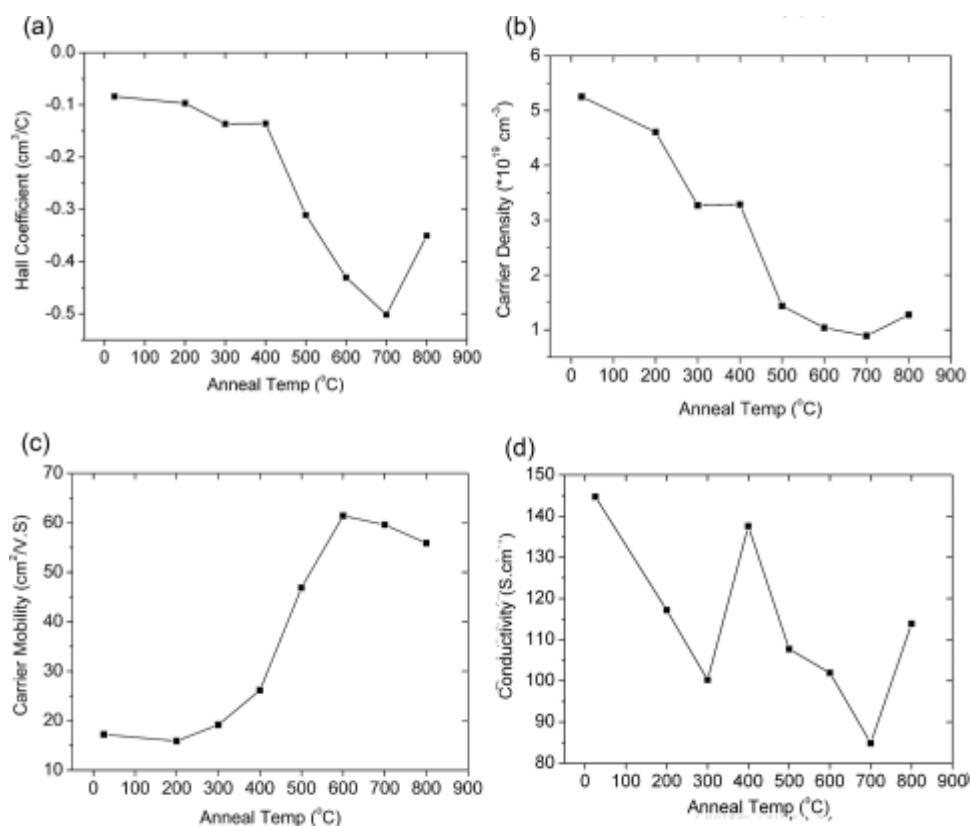


图 3 纳秒激光退火后黑硅样品的表面形貌图

黑硅样品在不同的温度热退火后，我们对各个样品进行室温霍尔测试，测试结果如图 4 所示。



(a) 霍尔系数；(b) 载流子浓度；(c) 载流子迁移率；(d) 电导率  
图 4 随着热退火温度的增加，各个黑硅样品的霍尔测量结果

图 4 (a) 显示所有热退火后的黑硅样品的霍尔系数都是负的，这说明黑硅样品内参与导电的载流子主要是电子。因为选用的硅衬底片本来是 p 型掺杂的，这说明硫离子注入后可以释放出更多的电子来抵消了空穴的影响；另外，这也说明黑硅层与硅衬底之间实际上是一个 n<sup>+</sup>/p 结，这个结会自然地将黑硅层的电子运输与硅衬底隔离开，所以我们测到的仅是黑硅层的电子运输性质。

图 4 (b) 说明随着退火温度的增加，电子的浓度慢慢地从退火前的  $5.25 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  下降到退火温度为  $700^\circ\text{C}$  的  $8.9 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。图 4 (c) 显示随着热退火温度从  $300^\circ\text{C}$  增加到  $600^\circ\text{C}$ ，电子的迁移率快速增加，在更高的退火温度电子迁移率仅略微下降。综合图 4 (b) 和 4 (c) 的结果，我们认为热退火使黑硅样品内的硫杂质从可以释放电子的状态转变为不能释放电子的状态，这也暗示硫元素从荷正电态转变为中性态。值得注意的是，电子迁移率的增加基本上与电子浓度的下降是同步的，这表明黑硅样品内载流子散射的主要形式是电离杂质散射<sup>[8]</sup>。

图 4 (d) 是黑硅样品电导率随退火温度的变化。电导率是载流子浓度和载流子迁移率的乘积。对于未热退火的样品，由于电子的浓度很高，尽管电子迁移率有点低，样品还是具有很好的导电性。随着热退火温度的增加，电子浓度下降，样品的电导率也随之下降。

#### 4 结束语

将处于研究前沿的半导体材料黑硅作为霍尔效应实验研究的对象，并辅以其它的研究手段比如化学刻蚀、扫描电镜、离子注入、软件模拟、纳秒激光退火和热退火等，这可以拓展高年级本科生的知识面，让他们早日熟悉真实的科学研究方法和思路。

参考文献：

- [1] 姜晶, 吴志明, 王涛, 郭正宇, 于贺, 蒋亚东. 革命性的新材料——黑硅[J]. 材料导报, 2010, 24 (4): 122-126.
- [2] Schechter B. Tall, dark and stranger. New Scientist, 2001, 169(2273): 34-37.
- [3] 赵明, 苏卫锋, 赵利. 表面微构造的硅材料——一种新型的光电功能材料[J]. 物理, 2003, 32 (7): 455-457.
- [4] 邹勉. 黑硅: 潜力无穷的新材料 专家相信它相当于 60 年前的半导体[J]. 半导体信息, 2009 (1) :4-5.
- [5] Vazsonyi E, Clercq K D, Einhaus R, Kerschaver E V, Said K, Poortmans J, Szlufcik J, Nijs J. Improved anisotropic etching process for industrial texturing of silicon solar cells [J]. Solar Energy Materials & Solar cells, 1999, 57: 179-188.
- [6] www.srim.org
- [7] Tabbal M, Kim T, Warrender J M, Aziz M, Cardozo B L, Goldman R S. Formation of single crystal sulfur supersaturated silicon based junctions by pulsed laser melting [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2007, 25: 1847-1852.
- [8] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生, 等. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 111.



# 数字化密立根油滴实验仪

何雨华, 方 恺, 倪 晨, 郭先红, 陆 萍  
(同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092)

**摘 要:** 本文介绍了一种改进后的密立根油滴实验仪, 仪器利用 A/D 采样等技术, 将测量所得到的平衡电压, 油滴下降时间等数据及时记录保存并计算, 用于实时检测验证实验结果, 并可上传至教学网站平台, 做存档备查。

**关键词:** A/D 采样; 实时检测; 物理实验

## 1 引言

密立根油滴实验是一个非常经典的物理实验, 其设计思想极富生命力, 启迪着千千万万青年学生。依据的原理是基本的物理规律, 实验方法也非常简单, 通过测量电压和时间这两个宏观量, 却能精确地得到基本电荷这一微观量。这在物理实验设计中是很值得借鉴的。

在此实验中, 捕捉油滴是学生在实验重点训练的技巧之一。在过去的实验教学中, 通过显微镜目镜来观察油滴, 但是由于学生长时间会造成用眼疲劳, 当观察者眼睛稍作休息调整时, 油滴非常容易丢失。由于仪器操作使用不当或由于静电的作用等原因, 也会造成油滴丢失。特别是在需要对同一油滴进行多次测量时, 往往测量几个数据后就难以跟踪油滴, 造成实验测量的困难。

90 年后, 随着 CCD 技术的发展与普及, 国内高校大都采用 CCD 加显示屏来替代原来的肉眼直接观察。这是这一实验装置的一个飞跃。把原来比较困难的跟踪油滴变得简单, 所以该装置得以非常迅速广泛推广。

但是目前存在的问题是: 实验中如果学生操作不当, 比如平衡电压调节不适当; 油滴下降时间与距离选择不合适; 就容易产生较大测量误差, 甚至对验证电荷的“量子化”的结论有疑意。另一方面, 现在一个教师同时要指导数十名学生, 而对学生的实验情况无法也不可能精力及时去逐一计算更正。而教师往往需要学生, 在课堂上尽可能多的测量油滴, 所以学生对实验中的问题可能也无法及时发现。待回去处理数据时发现问题已为时太晚了, 个别同学为了得到好的实验结果往往会对实验数据作部分的“修正”, 而这恰恰是物理实验中最忌讳的。

## 2 仪器设计的设计思想及操作模块

数字化密立根油滴实验仪的最大特色在于: 在原有传统仪器操作模式基本不变的前提下, 增加了实验数据采集功能。可实时记录下油滴的平衡电压, 油滴下降时间等数据, 这一系统与仪器的计时装置相连接, 当电子计时秒表按下停止时, 数据自动采集完毕。

仪器采用智能菜单形式, 实验者可根据自身的实验条件进行适当的设置。对某一个油滴测量完毕, 在仪器上显示屏上, 可显示出当前的油滴参数, 如认为这个数据是正确, 可按仪器上的确认按键进行保存数据, 同时该数据也上传至教师的电脑中。同一个油滴进行多次测量后(测量次数可自行设定)。仪器可对当前的油滴进行分析, 计算出油滴所带的电量、电子数, 以及误差等。学生可根据该结果总结分析实验操作情况, 及时做出调整, 便于下一

---

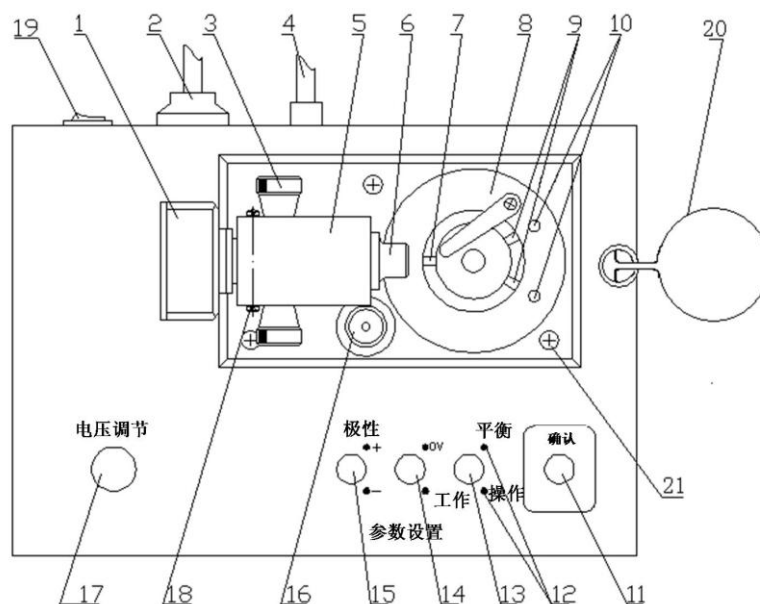
**作者简介:** 何雨华(1959-), 男, 上海人, 同济大学理科学与工程学院高级实验师, 学士, 从事物理实验教学和科教仪器研制。

个油滴的测量。

通过采用计算机通信技术，将学生实际操作测量到的实验数据实时地传送到计算机上，教师通过实验教学软件，可以实现实验管理、数据监察、数据分析运算、数据拟合和学生实验资料查询等多项功能<sup>[1]</sup>。

实验仪由主机、CCD 成像系统、油滴盒、监视器等部件组成。其中主机包括可控高压电源、计时装置、A/D 采样、视频处理等单元模块<sup>[2]</sup>。CCD 成像系统包括 CCD 传感器、光学成像部件等。油滴盒包括高压电极、照明装置、防风罩等部件。监视器是视频信号输出设备。仪器部件如图 1 所示。CCD 模块及光学成像系统用来捕捉暗室中油滴的像，同时将图像信息传给主机的视频处理模块。实验过程中可以通过调焦旋钮来改变物距，使油滴的像清晰的呈现在 CCD 传感器的窗口内。电压调节旋钮可以调整极板之间的电压，用来控制油滴的平衡、下落及提升。

定时开始、结束按键用来计时；0V、工作按键用来切换仪器的工作状态；平衡、提升按键可以切换油滴平衡或提升状态；确认按键可以将测量数据显示在屏幕上，从而省去了每次测量完成后手工记录数据的过程，使操作者把更多的注意力集中到实验本质上来。



- 1、CCD 盒 2、电源插座 3、调焦旋钮 4、Q9 视频接口 5、光学系统 6、镜头  
7、观察孔 8、上极板压簧 9、进光孔 10、光源 11、确认键 12、状态指示灯  
13、平衡、提升切换键 14、0V、工作切换键 15、定时开始、结束切换键 16、水准泡  
17、电压调节旋钮 18、紧定螺钉 19、电源开关 20、油滴管收纳盒安放环  
21、调平螺钉(3 颗)

图 1 数字化密立根油滴实验仪示意图

上、下极板之间通过胶木圆环支撑，三者之间的接触面经过机械精加工后可以将极板间的不平行度、间距误差控制在 0.01mm 以下；这种结构基本上消除了极板间的“势垒效应”及“边缘效应”，较好地保证了油滴室处在匀强电场之中，从而有效地减小了实验误差。胶木圆环上开有两个进光孔和一个观察孔，光源通过进光孔给油滴室提供照明，而成像系统则通过观察孔捕捉油滴的像。照明由带聚光的高亮发光二极管提供，其使用寿命长、不易损坏；油雾杯可以暂存油雾，使油雾不至于过早地散逸；进油量开关可以控制落油量；防风罩可以避免外界空气流动对油滴的影响。

### 3 数字化密立根油滴实验教学管理系统

数字化密立根油滴实验教学管理系统已应用于同济大学物理实验中心的“物理实验”课程教学，其功能包括：实验管理、资料查阅和数据传输等。学生完成实验后可将实验数据保存在计算机中，并备份数据。需要时，可以通过查找姓名、学号、实验时间或仪器编号等方式进行数据查询。实验数据保存后，可以预览和根据需要打印相应的实验报告，供教师批改实验报告或进行实验教学研究与分析时参考。

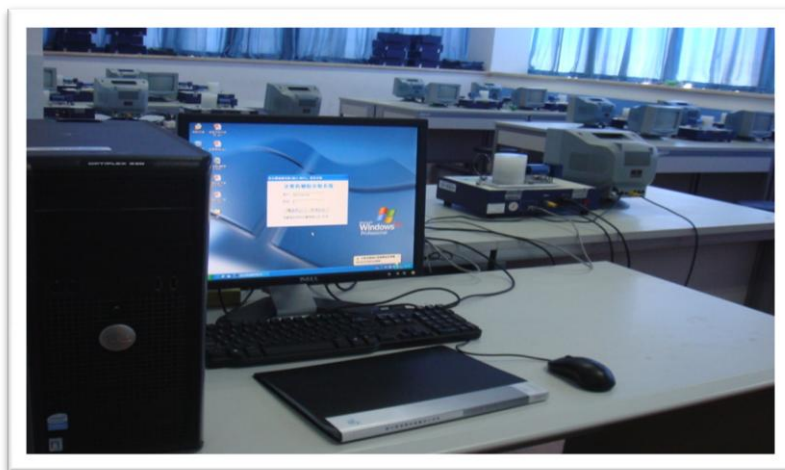


图2 数字化密立根油滴实验教学管理系统实验室照片

系统还具有以下功能：

#### 1) 系统管理

主要包括操作用户管理、通讯参数设置，连接装置管理、实验装置管理、实验资料管理，重置当前数据、清除实验数据、数据备份/恢复等功能，只有具备系统管理员权限的操作用户才具有操作这些功能的权限。

#### 2) 资料查阅

主要包括实验原理、实验内容、背景资料等与实验有关的信息查阅功能，以便于学生在做实验时遇到疑问，可随时进行查阅。

#### 3) 数据传输

数据发送采用轮询的集中控制方式机制。计算机依照一定顺序逐个访问各仪器，询问是否有信息要发送。如果有，则该仪器立即占用线路并将信息发给计算机。如果没有，则将应答信息送给计算机，计算机再访问下一台仪器。这样使每一台仪器都有同等的机会，并在预定的时间间隔内将数据安全、有效地发送到计算机上。本系统通信协议包括上行协议和下行协议（以数据采集器为汇集点）。上行协议规定集线器与计算机之间的通信机制；下行协议规定集线器与控制箱之间的通信机制。通信协议包括软件（硬件）握手协议；询问、应答命令协议；请求、传送数据协议等。其中，握手协议解决联机问题，命令协议解决链路问题，数据协议解决传送问题。

### 4 实验数据处理模块

由于数字化密立根油滴实验仪改善了实验条件，使实验者有更多时间及精力去测量油滴，从而在单位时间内可以测量更多有效油滴，大量的实验数据使得数据处理结果更可信。

数据处理方法有图解法、最小二乘法等<sup>[3]</sup>。

简单的图解法是将计算所得各个油滴的电量值按大小标在数轴上，通过图形可以直观地

看到数据形成疏密有致一簇一簇的有序分布。其中间距较大的应该是基本电荷数  $n$  的差异，而间距较小的应该是测量随机误差形成的差异。对同一簇数据求平均，可得一组按不同基本电荷数排列的数据  $q_1, q_2, \dots, q_n$ 。对这些数据进行逐差处理，最小差值的平均值  $e$  就是电子电量的估计值[4]。

另一种图解法是作  $q \sim n$  关系图，求出直线的斜率  $\Delta q / \Delta n$ ，即电子电量  $e$ 。

最小二乘法： 设  $y_i = q_i$  (电量测量值,  $i=1,2,\dots,m$ )

$$\hat{y}_i = n_i e \quad (\text{拟合直线上相应的电量值}) \quad (1)$$

这里  $\hat{y}_i = n_i e$  可看作直线方程 ( $n_i$  看作  $x_i$ )，则

$$y_1 - \hat{y}_1 = q_1 - en_1$$

$$y_2 - \hat{y}_2 = q_2 - en_2$$

.....

$$y_m - \hat{y}_m = q_m - en_m$$

对方程组两边求平方和可得：

$$S = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^m (q_i - en_i)^2 \quad (2)$$

要使  $S$  为最小值，必须

$$\frac{dS}{de} = \frac{d}{de} \sum_{i=1}^m (q_i - en_i)^2 = 0$$

求导数得：

$$\sum n_i q_i - \sum en_i^2 = 0 \quad (3)$$

电子电量为

$$e = \frac{\sum_{i=1}^m n_i q_i}{\sum_{i=1}^m n_i^2} \quad (4)$$

其不确定度为

$$U_e = \sqrt{\frac{\sum (\frac{q_i}{n_i} - e)^2}{m(m-1)}} \quad (5)$$

数据处理时为了简便， $n$  也可用  $q_i/e_0$  取整数来得到，这里公认值

$$e_0 = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

## 5 结论

通过近二年来,对数千学生的教学实践。获得非常好的效果。经过问卷调查,大部分学生都认为:提高了学习的兴趣、在单位时间内增加了测量了油滴数量、增强了实验的责任性。

实验过程中,教师能实时监控学生的实验过程与数据,对实验中发生的问题可以随时提出纠正意见。并可根据需要在批改实验报告等环节随时调用数据,增加教师与学生之间的互动。

**致谢:** 对成都世纪中科仪器有限公司技术部的钟建华工程师等在仪器研制中的合作和支持表示感谢。

### 参考文献:

- [1] 何雨华,方恺,陈铭南.智能型气体比热容比测定实验教学网络的系统设计[J].实验室研究与探索,2008,27(11):37-40.
- [2] 潘人培.物理实验参考书[M].北京:高等教育出版社,1990:285-298.
- [3] 陆廷济,胡德敬,陈铭南.物理实验教程[M].上海:同济大学出版社,2000:66-71.
- [4] 方恺,倪晨,马宁生,等.物理实验学习册[M].上海:同济大学出版社,2011:121-128.

## Digital Millikan Oil Drop Experiment Instrument

HE Yu-hua, FANG kai, NI cheng, GUO Xian-hong, LU Ping

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, Chiana)

**Abstract:** This paper introduces an improved Millikan oil drop experiment instrument, instrument using A/D sampling technology. The measured data including the balance voltage and the falling time of the oil drop etc. will be detected, recorded and calculated to verify the experimental results. The data can be uploaded to the teaching website platform as the record.

**Key words:** A/D sampling; real time detection; physics experiments

# 复合真空计操作规程应用研究

刘嘉滨, 沈学浩, 周红, 杨文明  
(上海交通大学 物理与天文系, 上海 200240)

**摘要:** 真空的获得与真空镀膜实验是在一定真空度下进行, 因此, 真空测量在实验中具有重要作用。然而真空计不合理的操作规程会致使规管出现问题, 从而影响实验的顺利进行, 因此, 需要根据实验原理与实验过程, 设定合理的操作规程。

**关键词:** 真空; 复合真空计; 规管

## 1 引言

真空的获得与真空镀膜实验作为一门认识真空现象、掌握真空技术的专业实验, 在大学物理实验及近代物理实验中占有重要的地位。通过真空泵对真空系统和真空镀膜室持续地抽气, 当其空间中气体稀薄到一定程度(即真空度)时, 将金属或金属氧化物变成气态原子或分子并沉积在金属或非金属表面<sup>[1]</sup>, 从而实现真空镀膜。而真空度的测量, 是由真空计来完成。

由于真空计的工作原理不同, 很少采用一种真空计来测量所有真空度范围的压强, 在具体实验中通常会采用复合真空计来进行低真空与高真空测量。高低真空分开测量不仅有助于学生理解真空过程, 而且也有助于真空设备良好的运转。虽然高低真空测量可自动切换, 但在实验中由于需要对镀膜室进行操作, 因此, 再次进入高真空度时需要一个稳定过程, 如此时高低真空测量频繁切换, 则会容易致使测量器件损坏。所以, 复合真空计需要一个正确的操作规程以保证实验设备与实验教学的顺利进行。

## 2 复合真空计工作原理

真空计作为测量空间内稀薄气体压力(通常比大气压小得多)的仪器, 按照不同的分类方法可划分为不同种类真空计如表 1 所示。绝对真空计可直接读取气体压力, 而相对真空计需要通过气体压力有关的函数关系来测量压力; 直接测量真空计可直接测量单位面积上的压力, 而间接测量真空计则通过低压下与气体压力有关的物理量的变化来间接测量压力。在实际测量中相对真空计和间接测量真空计的种类会更多些。

复合真空计是由热偶真空计与热阴极电离真空计组成, 其测量范围可达  $10^{-5}\text{Pa}$ 。在实验中, 热偶真空计是用来测量真空镀膜机的低真空度。热偶真空计是以热偶规管为传感器, 将被测环境的压强信号转换为微弱的电信号, 经过信号放大和 A/D 转换, 送入单片机进行数据处理和显示<sup>[2]</sup>。工作时, 热偶规管中的加热丝会通过电流给予加热, 利用热电偶直接测量热丝的温度变化<sup>[3]</sup>, 温度升高时, 热电偶输出热电势越大, 系统真空度越高, 反之, 真空度越低。

电离真空计是利用电子在电场中的电离化, 即电子电离后会产生正离子和次级电子, 并在一定温度下正离子数正比于气体的压力, 因此, 可通过测量离子流的大小来指示系统真空度, 即

$$I_i = KI_e p$$

式中,  $I_i$  为离子电流,  $I_e$  为发射电子流,  $p$  为气体压力,  $K$  为规管系数。

**作者简介:** 刘嘉滨(1976—), 男, 山西原平市, 工程师, 硕士, 教育技术。

表 1 真空计分类

真空计分类		
分类方法		分类
真空度刻度		绝对真空计
		相对真空计
真空计测量原理	直接测量	静态液位真空计
		弹性元件真空计
	间接测量	压缩式真空计
		热传导真空计
		热辐射真空计
		电离真空计
		放电管指示器
		粘滞真空计
		场致显微镜
		分压力真空计

热阴极电离真空计主要是由电离规管和测量电路组成，电离规管负责离子流的生成，主要由阴极、阳极与收集级三个电极组成。阴极是提供电子流 $I_e$ 的灯丝，阳极产生电子加速场并可收集电子流，收集级负责收集离子流 $I_i$ 。普通电离真空计压力测量范围在 $1 \times 10^{-1} \sim 10^{-5} \text{Pa}$ 内，因此，可用来测量真空镀膜机的高真空度。

### 3 操作规程应用研究

真空镀膜机主要是由真空机组、真空镀膜室、真空计等部件组成，其中真空机组负责对系统与镀膜室进行抽真空，镀膜室是镀膜材料制备的工作场所，真空计可实时监控整机系统的真空度。

本实验中心采用的是北京仪器厂生产的 DM-240 型真空镀膜机，其真空机组是由机械泵和油扩散泵组成，前者负责低真空抽气，后者负责高真空抽气。在实验中，首先需要将高阀关闭，将低阀放置在抽钟罩处，开启机械泵对系统和镀膜室进行低真空抽气，复合真空计的热偶计监视屏会实时显示抽气情况。当真空度达到 6.67Pa 以下时，可转至高真空抽气，如镀膜材料制备准备好，达到镀膜所需真空度时，即可进行镀膜实验。进行高真空抽气时，首先需要将高阀打开，将低阀转至在抽系统处，然后开启油扩散泵及冷却水系统，此时，可通过复合真空计的复合计监视屏观察高真空抽气情况。

热偶规管和电离规管作为复合真空计的测量前端，如果操作不正确，容易使其出现问题，因此，复合真空计需要设定合理的操作规程。

在实验中，当热偶计读数达到 6.67Pa 时，可以启动油扩散泵进行高真空抽气，如果复合真空计高低真空测量处于自动切换时，此时，电离规管开始工作，复合计显示高真空度。但是，由于油扩散泵开启前，真空镀膜机的高阀要开启，将扩散泵与镀膜室连通，低阀要切换位置，因此，这些操作会使低真空度降低，电离规管又瞬间停止工作，而这种瞬间的通断对电离规管有严重的影响。并且，低真空度高于 6.67Pa 需要一定稳定时间，在这个时间内如果电离规管频繁通断，也会影响规管的性能。所以，不能将复合真空计高低真空测量一直处于自动切换状态。这个过程应该要手动开启高真空测量，即开启油扩散泵高真空抽气时，暂时先不启动电离规管测量，而是继续观察热偶计读数，当其读数再次低于 6.67Pa 以下时，

再进行高真空测量,这样可使得电离规管持续工作,作到有效的保护。

真空镀膜是在镀膜室内进行,在实验中,由于抽真空需要一定的时间,因此,可在真空镀膜机抽真空同时制备镀膜材料。镀膜材料安装时需要开启镀膜室,此时,合理的操作应首先关闭高真空测量,并切断镀膜室与扩散泵连接,然后对镀膜室进行充气,充气完毕后,打开镀膜室进行镀膜材料安装。此后,需要对镀膜室再次进行高真空抽气,该过程不能因前面已进行过抽气,可直接开启高真空测量。仍要先对镀膜室进行低真空抽气,真空度达到要求后,开启高真空和高真空测量。因此,在真空镀膜实验过程中,如果一定时间内无需高真空测量时,应该停止电离规管工作,以便延长其使用寿命。同样,在镀膜取样或实验结束等实验环节,也应首先关闭高真空测量,再进行其他实验操作步骤。

#### 4 结束语

复合真空计作为通用工业仪器,已广泛应用于真空镀膜、真空冶炼、真空焊接等行业,在实验教学中,测量仪器稳定性、可靠性和易操作性更重要。规管作为测量仪器的前端,如果真空计操作不合理会使其性能降低或出现问题,不仅会影响真空度的测量,而且也会影响学生实验操作,导致真空镀膜机故障。因此,复合真空计合理的操作规程可以有效的保护规管不被损坏,同时,为真空的获得与真空镀膜实验顺利进行提供强有力的基础保障。

#### 参考文献:

- [1] 黄鸿宏,黄洪填,黄剑彬,等。真空镀膜综述[J]。现代涂料与涂装,2011,14(6):22-24。
- [2] 李杨。热偶规真空计的设计与研究[D]。东北师范大学,2011。
- [3] 刘玉岱。真空技术及应用系列讲座第六讲:真空测量[J]。真空,1996(2):46-50。

## Research on the operation rules of composite vacuum gauge

LIU Jia-bin, SHEN Xue-hao, ZHOU Hong, YANG Wen-ming

(Department of Physics and Astronomy, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Vacuum measurement plays an important role in vacuum experiment. However, the gauge causes problem because of the unreasonable operation of the vacuum gauge. Therefore, the vacuum gauge needs some reasonable rules according to the principles and experiment process.

**Key words:** Vacuum; Compound vacuum gauge; gauge



# 流水式核磁共振实验中低流速下共振信号反常增强原因探究及纵向弛豫时间准确测量

杜晓波, 许强, 孙昕, 龙北玉, 付成伟, 周亮, 梁析楠, 韩炜  
(吉林大学物理实验教学中心, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 明确了流水式核磁共振实验中, 低流速下核磁共振信号幅度随着水流量的减小而反常增强, 是低流速下核磁共振检测磁场二次磁化造成的。选用高速数据来拟合纵向弛豫时间更为准确。

## 1 引言

稳态核磁共振（或固定样品核磁共振）实验中的宏观磁矩（磁化强度  $M$ ）来源于水分子中氢原子核的磁矩。以 50Hz 的交变磁场作为扫描磁场，由于水的弛豫时间为 2.2s 左右，远大于扫场周期的 0.02s，导致出现共振饱和现象，难以观察到核磁共振信号。因此需要在水中加入顺磁盐（ $\text{CuSO}_4$  或  $\text{FeCl}_3$  等）以减少弛豫时间，避免发生共振饱和。

流水式核磁共振是在固定样品核磁共振基础上的扩展，样品采用流动的纯水。参看图 1，在固定样品核磁共振实验装置之前的水路中增加了另一组核磁共振系统（称为核磁共振 1），包括频率和幅度可调的交变磁场和稳恒磁场（地磁场即可）。如此处发生了核磁共振，后面的固定样品核磁共振装置（称为核磁共振 2）的核磁共振信号会发生变化，因此可以由核磁共振 2 共振信号的变化来确定核磁共振 1 的共振状态。利用流水式核磁共振实验可测量地磁场等极弱和不均匀磁场，也可以用来测量水样品的纵向弛豫时间  $t_1$ 。

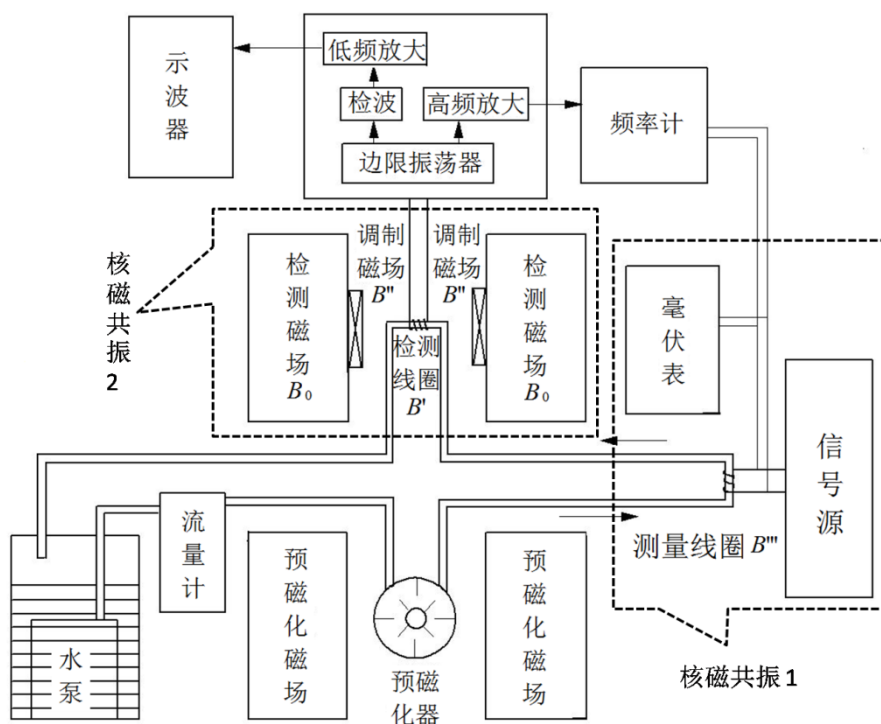


图 1 流水式核磁共振实验装置示意图

在磁场中水的磁化强度  $M$  达到稳定状态需要经历一定的时间，去掉磁场后  $M$  的消失也要经历一定的时间，这种现象称为弛豫，通常以指数来描述，弛豫时间约为 2.2s。水历经核磁共振 2 的时间很短，不能被充分磁化，信号的幅度很小。以纯水作为样品并仍然采用 50Hz 扫场方法来观测核磁共振信号，需要解决弛豫问题。解决的方案就是在两个核磁共振装置之前增加一个预磁化器，该装置能保证水在比较强的磁场中停留足够长的时间以被充分磁化。离开预磁化器后  $M$  按指数规律衰减，只要在较短时间内流到核磁共振装置，仍能保留一定的强度，满足实验要求。由于水是流动的，发生了核磁共振的水在 0.02 后已经离开了核磁共振系统的射频线圈，新流过来的水是未发生共振的，这样就解决了共振饱和问题。

水从预磁化器磁化饱和离开后， $M$  按  $M = A_1 e^{-t/t_1}$  规律衰减。关闭核磁共振 1，核磁共振 2 给出的共振信号的强度正比于水的磁化强度  $M$ ，因此可由信号幅度表示  $M$ 。将流速转换成时间后，得到  $M(t)$  曲线，即可拟出纵向弛豫时间  $t_1$ ，这是流水式核磁共振实验的一个实验教学内容。但在实验教学中发现当流速减低到一定程度，核磁共振信号的幅度反而增强，并影响到了纵向弛豫时间的拟合。本文就这一问题进行了实验分析，探寻纵向弛豫时间拟合更为准确的修正方法。

## 2 实验与讨论

实验中发现，在流速较大时，信号的幅度确实随着流速的减小而减小。但流速小到约 10l/h（对应时间约为 6s）之后，信号幅度反而增强，如图 2 中的曲线 a 所示。

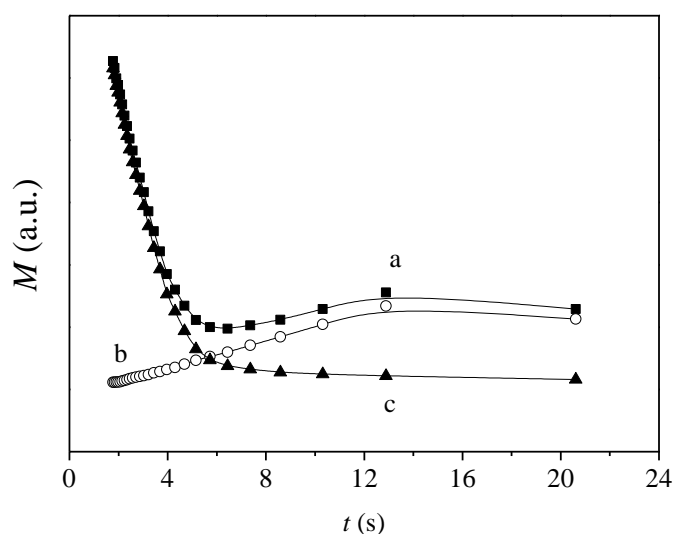


图 2 经预磁化后核磁共振信号幅度随着流速的变化 (a)；未经预磁化核磁共振信号幅度随着流速的变化（背底）(b)；扣除了背底之后的核磁共振信号随着水流量的变化 (c)。

经预磁化器磁化饱和的磁矩  $M$  应随着时间的增加而下降，核磁共振信号的幅度也因此单调下降。流速降低到 5s 之后，信号反而随着时间的增加而增加，说明还有一个磁场在对水进行磁化。实验装置中核磁共振 2 处还存在一个磁场。该磁场与预磁化磁场相似，也是由 NdFeB 永磁材料制成的永磁场。经测量，磁场强度 0.5T，磁场空间的半径 34mm。水路直径为 4mm。在流速较大时，如 60l/s，水历经该磁场的时间为 0.0025s，该磁场对水的磁化作用很小。当流速较小时，如 1m/s，水历经该磁场的时间为 0.15s，该磁场对水的磁化作用已经

比较显著,因此会引起信号强度的增加。

为验证上述分析,我们将预磁化器中预磁化磁场中取出,不再进行预磁化,得到了图2中的曲线b。该曲线横轴同样为水从预磁化器流到核磁共振2的时间,但水在核磁共振2磁场中的停留的时间约为其1/65,这是由水路长度决定的。没有经过预磁化磁场的磁化,信号幅度,也就是磁化强度 $M$ 仍然随着时间的增加而增加,说明 $M$ 确实是由第二个核磁共振磁场的磁化造成的。经过13s左右信号幅度又开始下降,主要是共振饱和导致的。用曲线a减掉曲线b,得到的曲线c没有了核磁共振信号的反常增加,证明了我们的分析是正确的。

采用曲线c进行拟合,得到的弛豫时间为1.86s,与水的弛豫时间2.2s有较大的偏差。原因是虽然进行了曲线背底修正,仍然不能完全消除误差。过低的流速导致信号弱,信噪比很低,误差较大。另外过低的流速会使发生了一次共振的水在第二个共振时刻,如0.01s之后不能全部流出核磁共振2的射频线圈,产生了共振饱和,导致信号强度下降。

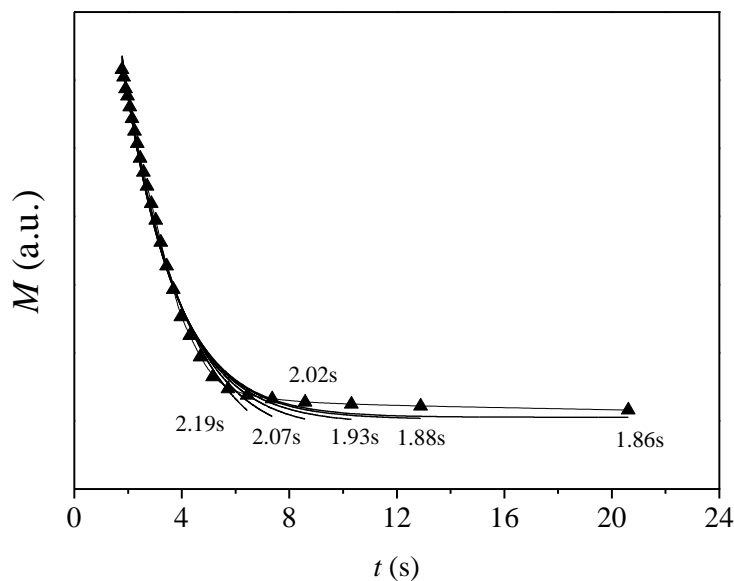


图3 弛豫时间修正

考虑到上述容易引起误差的因素,弛豫时间的拟合应尽量不使用流速过低的数据。如图3所示,逐渐舍弃低流速数据,拟合结果逐渐接近水样品弛豫时间的理论值。当时间不超过7s,拟合的结果为2.19s。所以测量弛豫时间 $t_1$ 时,流速为20m/s以上为宜。

### 3 结论

经实验研究证实,流水式核磁共振实验中低流速下核磁共振信号幅度随着水流量的减小而反常增强,是低流速下核磁共振检测磁场二次磁化造成的。选用高流速数据来拟合纵向弛豫时间更为准确。

### 参考文献:

- [1] 杜晓波, 张志杰, 孙昕。流水式核磁共振实验系统介绍[J]。大学物理, 2012, 29, 34。
- [2] 房德慧。用流水式核磁共振磁强计(NMR)测量弱磁场[J]。电测与仪表, 1982 (7): 20。
- [3] 王金山, 高福文, 高维铮。流水式核磁共振磁强计的研究[J]。仪器仪表学报, 1981 (2): 66。

# 适应近代物理实验课堂要求的高压实验装置的改进

梁桁楠, 周海宁, 李 岩, 刘 帅, 郭茂森  
(吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130012)

**摘 要:** 我们借鉴了现代先进高压科学的实验技术, 并结合现今大学近代物理实验教学中的现状, 改进了原有的高压设备, 使得昂贵的 DAC 高压实验可以轻松的走进大学的近代物理实验课堂。

**关键词:** DAC; 白宝石; 红宝石测压; 高压实验装置

大学近代物理实验课堂中, 引入高压科学的相关实验题目总是存在一系列困难。其中教师高压实验技术的训练是可以大量练习弥补的, 而高压实验中耗材的成本巨大才成为高压实验难以走进大学近代物理教学课堂的重要问题。由于本科或研究生的实验课教学群体巨大, 昂贵的耗材不可能适应长期的繁重的教学计划。而本文则解决了该重要问题, 成功找到了一种简单, 易操作, 容错率低, 并且耗材成本低廉的实验手段完成高压实验在本科或研究生中的教学任务。

## 1 传统科研中的静高压实验装置

高压按实验条件可分为动高压和静高压。动高压利用冲击波作动力获得瞬时高压, 压值可高达几百万甚至几千万个大气压, 同时伴随骤然升温。利用外界机械加载方式, 缓慢逐渐施加负荷挤压所研究的物体而使其内部产生很高的压力, 称为静态高压。本文中涉及的高压相关的实验技术都指的是静高压范畴。

现代高压科学飞速发展, 从早期的活塞-圆通装置, 布里奇曼对顶砧等, 到现阶段世界范围内承认最为适合产生高压并且广泛应用的实验装置金刚石对顶砧。高压科学的发展一直与加压的实验装置密不可分<sup>[1]</sup>。DAC 即金刚石对顶砧高压实验装置。DAC 最早模型: 借助杠杆原理, 把两个金刚石表面对压, 结果金刚石表面之间的样品很快被压碎。这是 DAC 最原始的简单模型, 当时最高压力达到约 10 GPa。后来金属垫圈的使用改变了这一现状: 一个垫圈放置于两个金刚石砧之间对产生高压非常有利, 同时垫圈的使用使 DAC 有一个小腔来装固体或液体样品。金刚石对顶砧的定位十分重要, 因为金刚石十分易碎, 工作平台必须平行而且直径吻合。

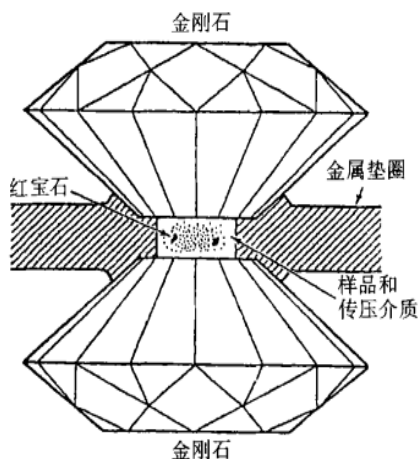


图 1 压砧及垫片结构

约 90% 的钻石碎裂不是在很高的压力下发生的，而是由于操作不当或压力槽结构不佳（比如没调准线性）等造成的。使用一定强度的金属垫圈并且定位完美的 DAC，才可以达到较高的压力。高压科学发展到现在，DAC 高压实验技术趋于成熟，已经广泛应用在最前沿的高压科学实验中<sup>[2]</sup>。

## 2 DAC 高压装置压砧方面的改进

我们为了得到百万大气压量级的高压，DAC 装置采用金刚石作为压砧<sup>[3]</sup>。众所周知，金刚石是世界上最硬的物质，它有着莫氏硬度为 10 的出众性质。作为压砧无论是光学性质还是硬度都无可比拟。但是唯一的缺点就是价格昂贵，一对实验中品性良好的金刚石至少要 1 万元人民币。而且在科研中长期总结发现没有受过长期训练的实验操作者，在完成对金刚石压砧对中调平的过程中没有足够经验，或者不够细心的情况下，没有按要求把金刚石对顶的砧面完全调平，就很容易使金刚石在加压的过程中碎裂。但是调试金刚石完全对中与调平又是一个需要长期训练的工作。如果让学生一开始没有经验的情况下就使用金刚石进行调试，有很大几率会损伤金刚石。金刚石一旦有一点破损，就无法继续进行高压实验，而这对金刚石也就无法再利用了。如果开设了相关实验课，大量学生循环的实验教学任务难免不发生此类金刚石破损的事故，而事故的成本又是巨大的。正是因为这方面原因，高压科学方面的实验一直难以走进大学近代物理实验的课堂。

而本文采用刚玉（氧化铝）代替金刚石作为 DAC 加压装置的压砧则可以很好的解决这样的问题。首先刚玉是一种由氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )的结晶形成的宝石。掺有金属铬的刚玉颜色鲜红，一般称之为红宝石；而蓝色或没有色的刚玉，普遍都会被归入蓝宝石的类别。刚玉的莫氏硬度为 9，非常接近金刚石。而且无色的白宝石也完全对光学先关测试没有影响。可以说是一种非常好的金刚石压砧的替代品。更主要的是它的价格并不高，一对白宝石压砧的价格最多 800~1000 元。而且可以反复利用，破损率并不高。较之金刚石的价格，白宝石压砧可以说是“即经济又实惠”。但白宝石也存在问题，它能承受的压强并不高，最高也只有 1~2GPa 左右。但是在近代物理实验教学中，获得这样的压力已经足够了



图 2 白宝石压砧实物图

## 3 垫片的选择

我们传统金刚石压砧的硬度很高，与金刚石配套使用的垫片是型号为 T301 的钢片，其具有很好的延展性和适中的硬度。但是我们如果采用白宝石作为压砧的时候垫片就不能继续采用 T301 钢片了。因为 T301 钢片的硬度过高，白宝石预压过程中容易损坏，难以与其搭配使用。根据这样的情况，我们找到了一种配合白宝石压砧使用的垫片，即铜片。铜片相对钢片的硬度更适合搭配白宝石。但是这里要强调如果用纯铜的话，硬度相对较软。最后采用

黄铜或磷铜片作为垫片。

#### 4 结论与总结

随着高压科学的发展,各大高校迫切的需要开设与高压先关的近代物理基础性实验,但是面临资金有限,技术缺乏的问题。高压实验技术的提高可以通过大量的训练完善,而实验中金刚石的损坏则是成本巨大。外加上金刚石的价值问题,实验中的丢失与管理也会相应存在巨大挑战。本文中找到了一种金刚石压砧的替代品-白宝石(又名刚玉)压砧。利用这种价格低廉的压砧,配合硬度及韧性适中的黄铜或磷铜片作为垫片。这种组合的DAC压机降低了成本,但是实验效果相近,可以让学生简单方便的练习高压实验技术,容错性低,便于广泛推广。这种高压实验装置可以广泛推广到各大高校的近代物理实验课堂中。根据学生的实际课堂反馈效果非常好,让学生我对高压技术有了初步的了解,并为以后继续学习高压科学打下了基础。

#### 参考文献:

- [1] Zha, Chang-Sheng, Ho-kwang Mao, Hemley, Russell J. Elasticity of MgO and a primary pressure scale to 55 GPa [J]. Physical Sciences, 2001.
- [2] 梁桁楠。LiMVO<sub>4</sub>(M=Cu,Ni,Mn)型锂离子电池材料的高压结构研究: 吉林大学博士学位论文, 2012。
- [3] Ho-kwang Mao, Jinfu Shu, Jingzhu Hu, Russell J. High-pressure X-ray diffraction study of diaspora [J]. SolidState Communications, 1994, 90(8): 497-500.

### Improvement of high-pressure experimental apparatus adapted to modern physics experiments

**Abstract:** We learn from the modern advanced science and high-pressure experimental techniques, combined with today's college physics experiment teaching situation, improving the existing high-voltage equipment, making expensive DAC high-pressure experiments can easily go into the classroom at the University of Modern Physics Experiment.

**Key words:** DAC; white gem; ruby; high-pressure experimental apparatus

# 水热法制备 ZnO 纳米棒

甄春阳<sup>a</sup>, 杨坤<sup>b</sup>, 付康宁<sup>a</sup>, 董敬敬<sup>c</sup>

(中国地质大学(北京) a. 能源学院; b. 工程技术学院; c. 数理学院, 北京 100083)

**摘要:** 以  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O/HMT$  为反应物, 通过低温水热反应过程, 在籽晶衬底上制备了 ZnO 纳米棒, 分别用场发射扫描电子显微镜和 X 射线衍射仪对 ZnO 纳米棒形貌与晶体结构进行了表征, 并研究了不同方法制备的 ZnO 籽晶层以及籽晶层厚度对 ZnO 纳米棒形貌及结晶质量的影响。结果表明磁控溅射籽晶衬底上生长的 ZnO 纳米棒结晶质量最好, 而籽晶层的厚度对 ZnO 纳米棒的垂直取向性有一定的影响。

**关键词:** 氧化锌; 水热法; 纳米棒; 籽晶层

## 1 引言

一维 ZnO 纳米材料因高的结晶质量、良好的波导特性以及易于制备等特点, 在制作纳米电子器件和纳米光电子器件等领域表现出巨大的应用潜力, 这些都极大地推动了在固体基底上制备取向生长 ZnO 纳米棒的研究<sup>[1]</sup>。

目前, 制备 ZnO 纳米棒常用的方法有气相沉积法、分子束外延等, 但这些方法需要复杂昂贵的仪器设备和较高的生长温度, 导致了大规模工业化生产难以进行。2001 年, Vayssieres<sup>[2]</sup>采用简单的湿化学方法, 以  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 、HMT 为反应物在玻璃衬底上制备出了 ZnO 微米管, 虽然这种方法简便易行, 成本低廉, 但制备出的 ZnO 纳米管的直径较大, 约为 1~2  $\mu m$ , 且取向性较差; 2003 年, Vayssieres 等人<sup>[3]</sup>进一步尝试了通过改变反应条件并引入籽晶衬底, 成功的制备了不同直径的、取向性较好的 ZnO 纳米棒; 2005 年, Greene 等人研究了以  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O/HMT$  为反应物通过水热反应生长 ZnO 纳米棒的机理, 认为 HMT 可以起到 PH 缓冲剂的作用, 它可以缓慢的提供  $OH^-$ , 有利于 ZnO 纳米棒的形成<sup>[4]</sup>; 之后几年, 以  $Zn(CH_3COO)_2/NaOH$ 、 $ZnCl_2/HMT$  以及  $Zn(NO_3)_2$ /氨水为反应物, 通过水热反应过程, 在籽晶衬底上生长 ZnO 纳米棒被相继报道<sup>[5-7]</sup>。

本文, 我们以  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O/HMT$  为反应物, 通过低温水热反应过程, 在籽晶衬底上制备了 ZnO 纳米棒, 并研究了不同的籽晶层制备方法及籽晶层厚度对 ZnO 纳米棒形貌及结晶质量的影响。

## 2 实验

### 2.1 ZnO 籽晶层的制备

在晶格失配较大的衬底上生长 ZnO 纳米棒时, 籽晶层起着至关重要的作用: 导向作用, 有利于 ZnO 纳米棒空间定向生长和使纳米棒垂直于衬底; 缓冲层作用, 减小 ZnO 纳米棒与衬底之间的晶格失配; 限制纳米棒直径, 可以实现对纳米棒密度和直径的调节<sup>[3, 8]</sup>。因此, 我们首先用磁控溅射、溶液法以及胶束法在 Si(001)衬底上制备 ZnO 籽晶层。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目: 表面等离子激元增强纳米硅薄膜太阳能电池的研究(批准号: 61106065); 中央高校基本科研业务费项目: 石墨烯电极 ZnO 纳米棒基发光二极管制备及光致发光研究(批准号: 2652013067); 实验室开放基金项目: 水热法制备 ZnO 纳米材料及其光学特性研究(批准号: 2013BXY048)

**作者简介:** 甄春阳(1993—), 男, 中国地质大学(北京)本科三年级学生。

**指导教师:** 董敬敬(1985—), 女, 山东聊城人, 博士, 中国地质大学(北京)数理学院, 讲师, 研究方向为纳米材料与器件。

### 2.1.1 磁控溅射法

溅射靶采用纯度为 99.99% 的 ZnO 陶瓷靶, 生长室内的本底真空可达到  $1.0 \times 10^{-5}$  Pa。衬底采用 Si(001)衬底。衬底与靶之间的距离约为 8.0 cm。样品的制备过程及条件如下:

将清洗干净的衬底放在衬底托上放入生长室, 将本底真空抽至  $1.0 \times 10^{-5}$  Pa, 接着加热衬底至所需的生长温度 ( $600^\circ\text{C}$ ), 待温度稳定以后, 通入工作气体 Ar, 调整气体的流量和闸板阀使生长室内的气压保持在 1.0 Pa。射频源预热 10 min 后, 开启溅射靶的挡板和射频源, 预溅射 10~20 min, 溅射掉靶表面的污染层, 而后开始薄膜的生长。其中, 射频功率为 80 W, 通过控制生长时间控制薄膜的厚度, 生长过程中, 为了获得比较均匀的薄膜, 在样品的生长过程中保持样品自转。通过改变溅射时间可以调控籽晶层的厚度。

### 2.1.2 溶液法

具体制备过程如下<sup>[9]</sup>:

a. 溶液的配制: 用电子天平称取 0.220 g 醋酸锌 ( $\text{Zn}(\text{Ac})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), 加入 20 ml 无水乙醇, 超声 10 min 使醋酸锌彻底溶解, 得到 0.05M 的  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ /乙醇前驱体溶液; 然后, 再加入 0.06 g 乙醇胺 (MEA), 并磁力搅拌 30min。

b. 提拉成膜: 用自制的拉膜机将清洗干净的衬底垂直慢慢浸入镀膜溶液中, 充分浸渍 10 分钟后以 1 mm/s 的速度匀速拉出, 在空气中充分晾干之后, 再进行下一次拉膜。

c. 热分解: 拉膜结束后, 将样品放入干净干燥的瓷舟中, 然后放入烘箱中在  $250^\circ\text{C}$  下烧结 10 min。烧结结束后, 便得到了覆盖有 ZnO 籽晶层的衬底。

### 2.1.3 反胶束方法

采用聚合物 PS(1760)-b-P2VP(700)为母体, 以  $\text{ZnCl}_2$  为金属盐, 负载 L 为 0.5 ( $L=n(\text{Zn})/n(\text{PVP})$ )。具体过程如下:

a. 首先, 量取适量的 PS-PVP 和甲苯, 配制浓度为 0.5 wt% 的 PS-PVP 甲苯溶液, 室温搅拌 3 h,  $70^\circ\text{C}$  搅拌 2 h, 使溶液中形成以 PVP 为核 PS 为壳的球状胶束;

b. 然后, 将  $\text{ZnCl}_2$  加入上述溶液 ( $\text{ZnCl}_2$ : PS-PVP=0.5), 再搅拌至少 24 h,  $\text{ZnCl}_2$  完全进入球状胶束的内部;

c. 之后, 将上述溶胶旋涂在清洗好的 Si (100)衬底上(2000 rpm), 氧等离子体处理 10 min ( $2.0 \times 10^{-2}$  Torr), 每个球状胶束中的前驱体盐被氧化为一个 ZnO 纳米颗粒;

最后,  $700^\circ\text{C}$  氧气中退火 2 h, 提高其结晶性能。

## 2.2 水热反应生长 ZnO 纳米棒

本实验利用水热法在低温条件下制备出 ZnO 纳米棒, 选用六水硝酸锌 ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 99.5% purity, Aldrich)和六亚甲基四胺(HMTA, 99.5% purity, Aldrich)作为反应物, 单晶 Si(001)作为衬底, 聚四氟乙烯衬里的高压反应釜作为反应容器。具体制备过程及条件如下:

a. 衬底清洗: Si (001)衬底被切分为约  $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$  的方块, 用丙酮、乙醇和去离子水依次超声清洗 20 min, 氮气吹干; 然后置于 5% 的氢氟酸(HF)溶液中清洗 30 s, 用以除去 Si 衬底表面的固有氧化层, 然后用去离子水反复冲洗干净, 氮气吹干。

b. 生长籽晶层: 为了减小 ZnO 与 Si 衬底的晶格失配度, 我们首先在清洗过的 Si 衬底上利用磁控溅射法生长了一层[0002]取向的 ZnO 薄膜, 作为生长的籽晶层。具体的制备方法及步骤如上所述。

c. 配制反应液: 首先, 用分析天平分别称取适量的  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和 HMT (二者的摩尔浓度相同, 本文中统称水热反应浓度)并放于烧杯中; 然后, 往烧杯中加入适量去离子水, 超声使其完全溶解; 最后, 将烧杯中的溶液转移到一定容积的容量瓶内, 并加入去离子水至容量瓶刻度线, 摇晃使其混合均匀, 待用。

d. 水热反应: 首先, 将籽晶衬底固定在样品架上 (带有籽晶层的一面朝下, 以避免溶液中固体产物沉积); 随后, 将反应液注入到聚四氟乙烯的反应釜中, 注入釜中液体体积为



釜体体积的 4/5 (~40 ml); 接着, 将反应釜放入烘箱, 恒温下保持一定时间; 最后, 从反应釜中拿出样品, 用去离子水清洗, 红外灯下烘干, 此时衬底表面覆盖了一层 ZnO 纳米棒。所用样品架及反应釜如图 1 所示。



图 1 样品架与水热反应釜

### 3 结果与讨论

在 Si(100)衬底上生长 ZnO 纳米棒时, 籽晶层起着至关重要的作用。籽晶层的粗糙度、均匀性以及结晶质量决定着纳米棒的形貌、取向性和光学性质。然而, 籽晶层的性质与制备方法、实验条件密切相关<sup>[10-12]</sup>。因此, 在 ZnO 纳米棒制备过程中, 首先需要选择合适的籽晶层制备方法与实验条件。本文分两个方面研究了籽晶层对 ZnO 纳米棒的影响: 籽晶层的制备方法与籽晶层的厚度。

#### 3.1 不同方法制备的籽晶层对 ZnO 纳米棒的影响

图 2 中各 ZnO 纳米棒的水热法生长条件相同, 均为 0.05 M  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和 HMT 混合溶液作为反应溶液, 在 95 °C 下反应 5 h。区别在于衬底的处理方式不同: (a)直接以 Si (100) 为衬底生长 ZnO 纳米棒; (b)先在 Si (100)衬底上磁控溅射 5 min 生长 ZnO 籽晶层 (粒径约 30 nm), 再水热反应生长 ZnO 纳米棒; (c)先在 Si (100) 通过溶液法制备 ZnO 籽晶层 (粒径约 40 nm), 之后进行水热反应; (d)先在 Si (100) 利用反胶束法制备有序 ZnO 颗粒作为籽晶层 (粒径约 30 nm), 接着水热反应生长 ZnO 纳米棒。从图中可以看出, 四个衬底上均有 ZnO 晶体生成, 其中没有籽晶层的 Si 衬底上杂乱分布着 ZnO 纳米花及纳米棒, 如图 2 (a)所示, 这是由 Si (100)与 ZnO 之间较大的晶格失配造成的。从图 2 (b)和(c)可以看出, 磁控溅射以及溶液法籽晶衬底上 ZnO 纳米棒的取向性及纳米棒密度明显要好于单纯的 Si 衬底, 并且磁控溅射籽晶衬底上 ZnO 的取向性以及表面平整度最好, 一方面说明了籽晶层的确起到了促进成核以及引导生长, 另一方面也说明纳米棒的形貌、取向性与籽晶层的粗糙度以及均匀性有很大关系: 据报道溶液法籽晶衬底具有大的粗糙度以及差的均匀性, 从而导致了纳米棒较差的取向性及平整度。反胶束法籽晶衬底上仅有少量的 ZnO 纳米颗粒生成, 造成纳米棒无法成核生长主要有两方面原因: 一方面反胶束法制备的 ZnO 籽晶颗粒结晶质量往往较差; 另一方面反胶束法制备的 ZnO 籽晶颗粒覆盖度往往较低, 不能提供足够的成核点, 不利于 ZnO 纳米棒生长。

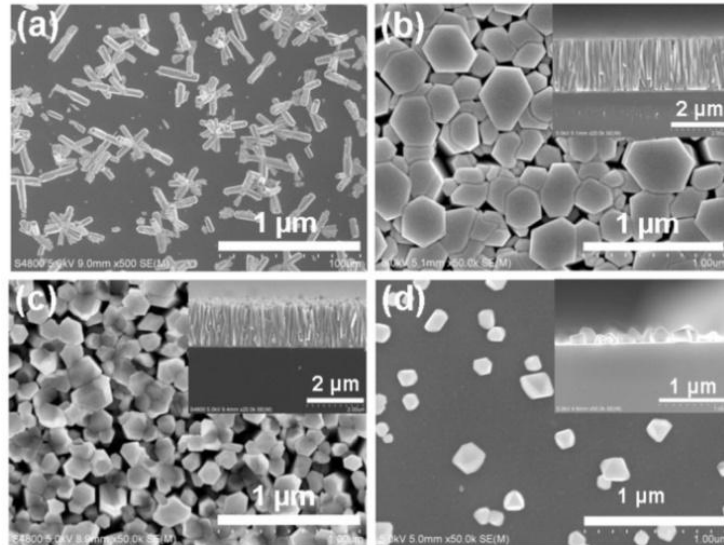


图 2 不同衬底上水热反应生长的 ZnO 纳米棒：(a) Si (100)；(b) 磁控溅射籽晶衬底；(c) 溶液法籽晶衬底；(d) 反胶束法籽晶衬底

为了进一步分析不同的籽晶层制备方法对 ZnO 纳米棒结晶质量的影响，我们对 Si 衬底、磁控溅射籽晶衬底以及溶液法籽晶衬底上制备的 ZnO 纳米棒（反胶束籽晶衬底上 ZnO 纳米棒密度较低，无法测出信号）进行了 XRD 测试，结果如图 3 所示。从图中可以看出：无籽晶层的 Si 衬底上生长的 ZnO 纳米棒取向是杂乱的，这与 SEM 测试结果是一致的；磁控溅射籽晶衬底以及溶液法籽晶衬底上制备的 ZnO 纳米棒表现出很好的[0002]取向性，这说明籽晶层对后续 ZnO 纳米棒的生长起到了引导作用，改善了 ZnO 纳米棒的取向性；此外，溶液法籽晶衬底上有微弱的 Zn (1011)衍射峰出现，而磁控溅射籽晶衬底上没有任何杂峰，说明磁控溅射籽晶层衬底上生长的 ZnO 纳米棒取向性优于溶液法籽晶衬底，这是由磁控溅射籽晶层较高的结晶质量、均匀性以及平整度导致的。通过上面的分析，我们可以得出：磁控溅射籽晶衬底上得到的 ZnO 纳米棒取向性、平整度最好。

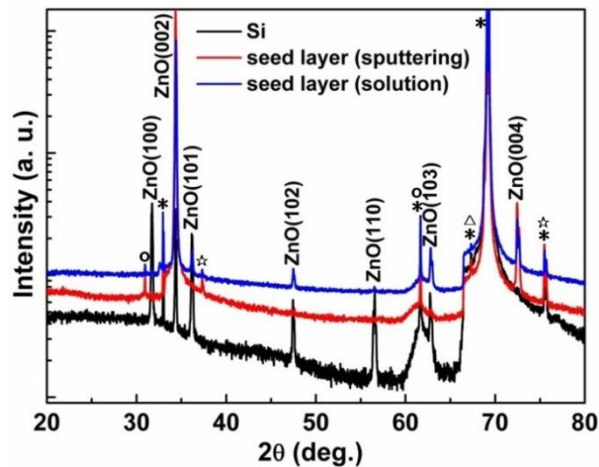


图 3 不同衬底上生长的 ZnO 纳米棒的 XRD 谱，“\*”为 Si 衬底的衍射峰，“o”、“☆”、“Δ”分别为非单色性 X 射线源中 Kβ、Ni、W 引起的衍射峰

### 3.2 籽晶层的厚度对 ZnO 纳米棒的影响

利用磁控溅射法制备 ZnO 籽晶层, 籽晶层厚度直接影响着籽晶层的形貌及结晶质量, 进而影响后续纳米棒的生长, 因此我们在不同厚度的籽晶衬底上生长了 ZnO 纳米棒。

图 4 给出了籽晶层厚度为 40 nm, 80 nm, 300 nm 以及 1  $\mu\text{m}$  的籽晶衬底上得到的 ZnO 纳米棒的 SEM 图, 水热生长的参数为 0.025 M、85  $^{\circ}\text{C}$ 、5 h。可以看出随着籽晶层厚度的增大 ZnO 纳米棒的直径由~50 nm 增大到~150 nm。对于磁控溅射法制备的籽晶层, 随着溅射时间的增长(厚度的增加), 籽晶颗粒也会慢慢长大, 长大到一定程度籽晶颗粒逐渐连接成膜。在水热生长过程中, 籽晶颗粒起到了限制纳米棒生长的作用, 通过改变籽晶颗粒的密度以及大小可以实现对纳米棒密度及直径的调节, 而对于已经成膜的籽晶层则不再能起到限制作用(图 4 (d))。此外, 还可以观察到: 当籽晶层厚度为 40 nm 时, ZnO 纳米棒的垂直性并不好, 有明显的倾斜; 随着厚度的增大, 垂直性逐渐提高, 当籽晶颗粒连接成膜后, 垂直性最好。

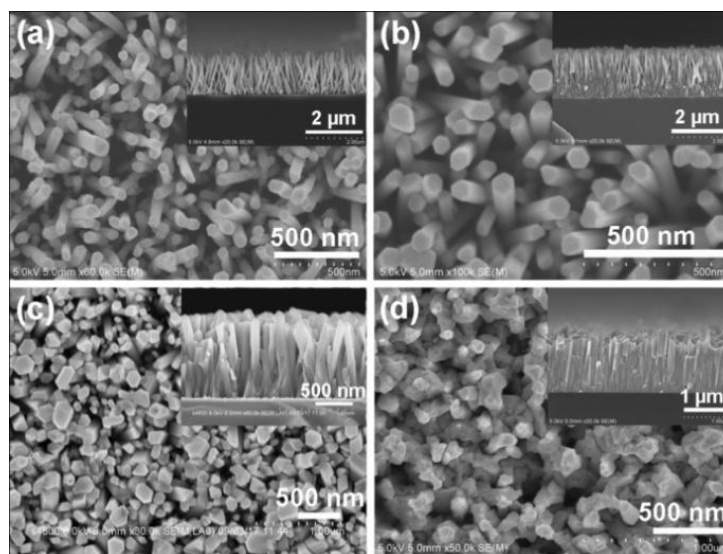


图 4 不同厚度 (a)40 nm; (b)80 nm; (c)300 nm; (d)1  $\mu\text{m}$  的籽晶层衬底上生长的 ZnO 纳米棒

## 4 结论

本文以  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{HMT}$  为反应物, 通过低温水热反应过程, 在籽晶衬底上制备了 ZnO 纳米棒, 并研究了不同方法制备的 ZnO 籽晶层以及籽晶层厚度对 ZnO 纳米棒形貌及结晶质量的影响。结果表明磁控溅射籽晶衬底上得到的 ZnO 纳米棒取向性、平整度最好, 并且在一定范围内随着籽晶层厚度的增大, ZnO 纳米棒的垂直性逐渐提高。

### 参考文献:

- [1] Y. C. Kong, D. P. Yu, B. Zhang, et al. Ultraviolet-emitting ZnO nanowires synthesized by a physical vapor deposition approach [J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 78: 407-409.
- [2] L. Vayssieres, N. Beermann, SE Lindquist, et al. Controlled Aqueous Chemical Growth of Oriented Three-Dimensional Crystalline Nanorod Arrays: Application to Iron (III) Oxides [J]. Chem. Mater., 2001, 13: 233-237.
- [3] L. Vayssieres. Growth of Arrayed Nanorods and Nanowires of ZnO from Aqueous Solutions [J]. Adv. Mater., 2003, 15 (5): 464-466.
- [4] M. Law, L. E. Greene, J. C. Johnson, et al. Nanowire dye-sensitized solar cells [J]. Nature Mater., 2005, 4: 455-459.
- [5] H. L. Cao, X. F. Qian, Q. Gong, et al. 3632 Shape- and size-controlled synthesis of nanometre

- ZnO from a simple solution route at room temperature [J]. *Nanotechnology*, 2006, 17: 3632-3637.
- [6] G. M. Hua, Y. Zhang, C. H. Ye, et al. Controllable growth of ZnO nanoarrays in aqueous solution and their optical properties [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18: 145605-145609.
- [7] J. Liu, X. Huang, Y. Li, et al. J. Vertically Aligned 1D ZnO Nanostructures on Bulk Alloy Substrates: Direct Solution Synthesis, Photoluminescence, and Field Emission [J]. *Phys. Chem. C*, 2007, 111: 4990-4994.
- [8] Y. J. Lee, T. L. Sounart, D. A. Scrymgeour, et al. Control of ZnO nanorod array alignment synthesized via seeded solution growth [J]. *J. Cryst. Growth*, 2007, 304: 80-83.
- [9] W. B. Wu, G. D. Hu, S. G. Cui, et al. Epitaxy of Vertical ZnO Nanorod Arrays on Highly (001)-Oriented ZnO Seed Monolayer by a Hydrothermal Route [J]. *Cryst. Growth. Des.*, 2008, 8: 4014-4018.
- [10] H. Wang, Z. P. Zhang, X. N. Wang, et al. Selective Growth of Vertical-aligned ZnO Nanorod Arrays on Si Substrate by Catalyst-free Thermal Evaporation [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2008, 3: 309-313.
- [11] X. B. Cao, X. M. Lan, C. Zhao, et al. General wet route for the growth of regular anisotropic nanostructures on silicon substrate [J]. *J. Cryst. Growth*, 2007, 306: 225-229.
- [12] L. E. Greene, M. Law, D. H. Tan, et al. General Route to Vertical ZnO Nanowire Arrays Using Textured ZnO Seeds [J]. *Nano Lett.*, 2005, 5: 1231-1234.

## Preparation of ZnO Nanorods by a Hydrothermal Route

ZHEN Chun-Yang<sup>a</sup>, YANG Kun<sup>b</sup>, FU Kang-Ning<sup>a</sup>, DONG Jing-Jing<sup>c</sup>

(a. School of Energy Resources; b. School of Engineering and Technology, c. School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** ZnO nanorods was synthesized on the seeded Si substrate via a hydrothermal process, and the influence of the preparation methods and thickness of ZnO seed layer on the morphology and crystalline quality of as-grown ZnO nanorods have been systematically investigated. It was found that the seed layer prepared by magnetron sputtering leads to high crystalline quality of resulting ZnO nanorods, and the c-axis oriented ZnO nanorods were obtained under the optimal seed layer thickness.

**Key words:** ZnO; hydrothermal; nanorod; seed layer

# 氢等离子体处理对 ZnO 光电性质的影响

董敬敬<sup>a</sup>, 杨坤<sup>b</sup>, 付康宁<sup>b</sup>

(中国地质大学(北京) a. 数理学院;

b. 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 纤锌矿 ZnO 由于其独特的性质而在光电器件领域具有极大的应用潜力, 与未掺杂 ZnO 相比, 氢处理后 ZnO 呈现出优良的光电性能。本文借助于霍尔、拉曼散射、光致发光及电致发光测试技术, 系统研究了氢等离子体处理以及随后的高温退火过程对 ZnO 薄膜及纳米材料光学及电学性质的影响。

**关键词:** ZnO; 氢等离子体; 光电性质

## 1 引言

近年来, 有研究表明 ZnO 的 n 型电导来源于非故意掺杂的氢<sup>[1]</sup>, 与其他半导体材料不同, 氢在 ZnO 中总是表现为浅施主, 导致 ZnO 有较高的电子浓度。据报道, 通过各种手段在 ZnO 薄膜中引入氢, 可以增加 ZnO 薄膜中的自由载流子浓度, 从而提高薄膜的电导率<sup>[2-4]</sup>。此外, 还有文献报道氢可以有效抑制 ZnO 中黄光和绿光的发射, 提高紫外光的发射效率<sup>[5, 6]</sup>。因此, 下面我们研究了氢等离子体处理对 ZnO 薄膜及 ZnO 纳米棒光电性能的影响。

## 2 实验

我们研究了氢等离子体处理及后续退火对 ZnO 光电性质的影响。为了便于材料光电性能测试, 我们这里选择了磁控溅射生长的 ZnO 薄膜(厚度为~1 μm)。具体的氢等离子体处理工艺如下: 将磁控溅射生长的 ZnO 薄膜放入电容式等离子体处理系统中, 将等离子体刻蚀室内的真空抽到  $1.0 \times 10^{-4}$  Pa 以下, 然后通入氢气, 将刻蚀室内的气压保持在 160 Pa, 射频功率设为 60 W。

## 3 结果与讨论

### 3.1 氢等离子体处理对 ZnO 薄膜电学性质的影响<sup>[7, 8]</sup>

图 1 给出了氢等离子体处理前、处理后以及不同的后续退火温度下, ZnO 薄膜的载流子浓度及迁移率。从图中可以看出: 磁控溅射制备的 ZnO 薄膜电阻相对较高, 载流子浓度和迁移率分别为  $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  和  $7 \text{ cm}^2/\text{V s}$ ; 氢等离子体处理 2 h 后, 载流子浓度增大到  $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ , 迁移率也增加到  $39 \text{ cm}^2/\text{V s}$ 。氢等离子体处理后薄膜的载流子浓度急剧增加, 表明氢在 ZnO 薄膜中起着浅施主的作用。一般而言, 随着载流子浓度的增加, 将导致载流子之间强烈的散射作用, 这会使得载流子的迁移率下降。然而, 在我们的实验结果中, 我们看到随着载流子浓度的增加, 载流子的迁移率也随之增加。相似的结果在过去的文献中也有报道<sup>[9]</sup>。当 ZnO 薄膜在氢气气氛中退火时, 载流子浓度增加, 载流子的迁移率也有所增加。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目: 表面等离子体增强纳米硅薄膜太阳能电池的研究(批准号: 61106065); 中央高校基本科研业务费项目: 石墨烯电极 ZnO 纳米棒基发光二极管制备及光致发光研究(批准号: 2652013067); 大学生创新项目: ZnO 纳米材料的制备及电致发光研究

**作者简介:** 董敬敬(1985—), 女, 山东聊城人, 博士, 中国地质大学(北京)数理学院, 讲师, 研究方向为纳米材料与器件。

如果氢等离子处理后，氢在 ZnO 薄膜中只是作为浅施主而存在，则载流子迁移率不可能增加。载流子迁移率的增加表明，氢还可以起到钝化晶界缺陷的作用。因此，氢在 ZnO 薄膜中不仅充当浅施主，而且还可以钝化大部分的缺陷。

为进一步研究 ZnO 薄膜中氢的热稳定性，我们对氢等离子体处理后的样品分别在 300, 400, 500 °C 下进行了真空退火，退火时间为 2 h。从图 1 可以看出，随着退火温度的增加，氢等离子体处理 ZnO 薄膜的载流子浓度略有下降，由  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  减小到  $6.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，仍然远高于氢等离子体处理前的样品，表明退火过程中部分与氢相关的浅施主热稳定性较差，逐渐扩散出 ZnO 薄膜，但是大部分与氢相关的浅施主是稳定的。此外，由图 1 我们还可以看出，低于 300 °C 退火时 ZnO 薄膜的载流子迁移率几乎保持不变；当退火温度高于 300 °C 时，载流子迁移率急剧减小；500 °C 下退火 2 h 后，ZnO 薄膜的载流子迁移率已减小至氢等离子体处理前的值，说明钝化晶界的氢热稳定性较差，500 °C 时已经完全扩散出 ZnO 薄膜。

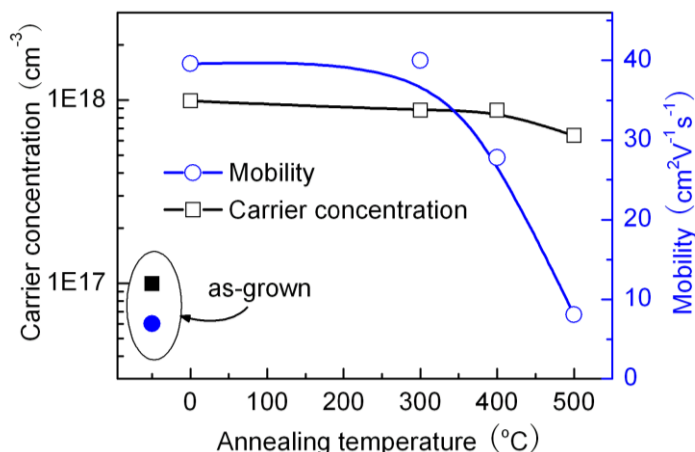


图 1 载流子浓度及迁移率和退火温度的关系图

### 3.2 氢等离子体处理对 ZnO 薄膜光致发光性质的影响

我们还研究了氢等离子体处理及后续退火对 ZnO 薄膜光致发光性质的影响。图 2 给出了氢等离子体处理前、处理后以及不同的后续退火温度下，ZnO 薄膜的室温光致发光谱。从图中可以看出，氢等离子体处理后 ZnO 薄膜的近带边紫外发光有了 20 倍的提高。据文献报道非故意氢掺杂也可以增强 ZnO 的紫外光发射<sup>[10]</sup>，此外，氢等离子体处理还可以有效的抑制 ZnO 中缺陷相关的可见光发射<sup>[5, 11]</sup>。随着退火温度的增加，氢处理 ZnO 薄膜的近带边紫外发光迅速减弱。光致发光测试结果再次证明氢等离子体处理可以钝化晶界处缺陷相关的非辐射复合中心，但是由于这部分氢并不稳定，在 500 °C 退火下扩散出 ZnO 薄膜，从而导致 500 °C 退火后样品的近带边紫外发光迅速减弱。

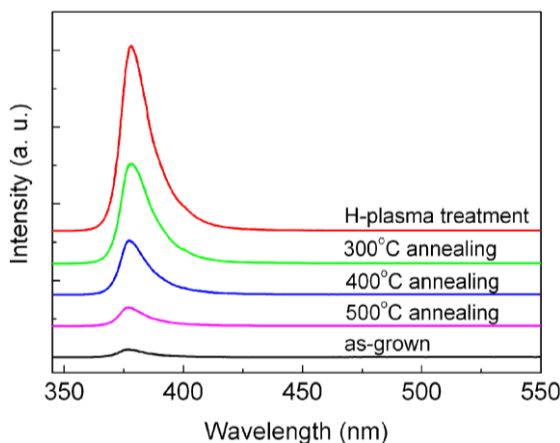


图 2 氢等离子体处理 ZnO 薄膜在不同退火温度下的室温光致发光谱

### 3.3 氢等离子体处理对 ZnO 纳米棒电致发光性能的影响

为了研究氢处理对 ZnO 纳米棒电致发光性能的影响,我们对在 GaN 衬底上生长的 ZnO 纳米棒阵列在 160 Pa, 60 W 下氢等离子体处理 2 h, 随后制备了纳米棒基发光二极管。图 3 给出了经氢处理的 n-ZnO 纳米棒/p-GaN 发光二极管在注入电流为 2 mA 和 6 mA 时的电致发光谱,为了对比,图中同时给出了未经氢处理的参考器件在相同注入电流下的电致发光谱。从图中可以看出经过氢等离子体处理的器件电致发光强度有了一定提高,但是并不明显。通过上面的分析我们知道 ZnO 薄膜光电性质的提高主要可归因于氢等离子体可以钝化晶界处的缺陷,对于 ZnO 纳米棒阵列由于缺陷密度非常低,所以氢处理的效果并不明显。

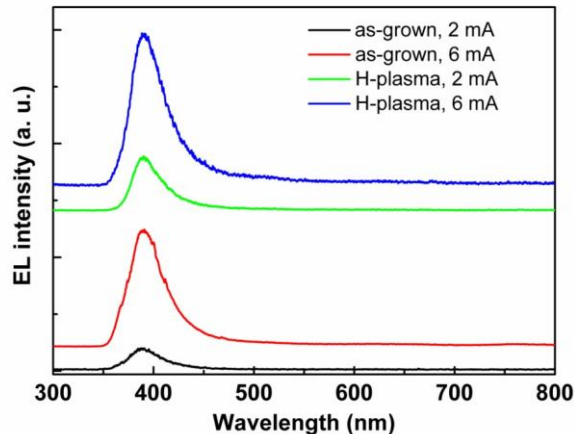


图 3 未经氢处理及经过氢处理的 n-ZnO 纳米棒/p-GaN 发光二极管在注入电流为 2 mA 和 6 mA 时的电致发光谱

## 4 结论

本文研究了氢等离子体处理对 ZnO 薄膜及 ZnO 纳米棒光电性能的影响,结果表明:氢在 ZnO 薄膜中不仅充当浅施主,而且还可以钝化晶界处缺陷相关的非辐射复合中心,从而使得载流子浓度及迁移率增大、近带边紫外发光增强。然而,钝化晶界的氢热稳定性较差,500 °C 时已经完全扩散出 ZnO 薄膜,因此,500 °C 退火后载流子迁移率及近带边紫外发光强度迅速减弱。

### 参考文献:

- [1] C. G. Van de Walle. Hydrogen as a cause of doping in ZnO [J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 1012-1015.
- [2] B. Y. Oh, M. C. Jeong, D. S. Kim, et al. Post-annealing of Al-doped ZnO films in hydrogen atmosphere [J]. J. Cryst. Growth, 2005, 281(3): 475-480.
- [3] Z. Zhou, K. Katoa, T. Komakia, et al. Effects of dopants and hydrogen on the electrical conductivity of ZnO[J]. J. Eur. Cera. Soc., 2004, 24(1): 139-146.
- [4] L. Y. Chen, W. H. Chen, J. J. Wang, et al. Hydrogen-doped high conductivity ZnO films deposited by radio-frequency magnetron sputtering [J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 85: 5628-5630.
- [5] J. M. Lee, K. K. Kim, S. J. Park, et al. Low-resistance and nonalloyed ohmic contacts to plasma treated ZnO [J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 78: 3842-3844.
- [6] T. Ishigaki, N. Ohashi, H. Taguchi, et al. Improved UV emission of zinc oxide through hydrogen doping in pulse-modulated high-power ICP [J]. Thin Solid Films, 2006, 506:

303-306.

- [7] P. F. Cai, J. B. You, X. W. Zhang, et al. Enhancement of conductivity and transmittance of ZnO films by post hydrogen plasma treatment [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, 105: 083713-083718.
- [8] J. J. Dong, X. W. Zhang, J. B. You, et al. Effects of Hydrogen Plasma Treatment on the Electrical and Optical Properties of ZnO Films: Identification of Hydrogen Donors in ZnO [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2010, 2: 1780-1784.
- [9] S. Y. Myong and K. S. Lim. Improved electrical stability and UV emission of zinc oxide thin films prepared by combination of metalorganic chemical vapor deposition technique and post-deposition hydrogen doping [J]. *Org. Electron.*, 2007, 8: 51-54.
- [10] C. H. Seager and S. M. Myers. Quantitative comparisons of dissolved hydrogen density and the electrical and optical properties of ZnO [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 94: 2888-2892.
- [11] C. C. Lin, H. P. Chen, H. C. Liao, et al. Enhanced luminescent and electrical properties of hydrogen-plasma ZnO nanorods grown on wafer-scale flexible substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86: 183103-183105.

## Effects of Hydrogen Plasma Treatment on the Electrical and Optical Properties of ZnO

DONG Jing-Jing<sup>a</sup>, YANG Kun<sup>b</sup>, FU Kang-Ning<sup>b</sup>

(a. School of Science; b. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing),  
Beijing 100083, China)

**Abstract:** Wurtzite ZnO has many potential applications in optoelectronic devices, and the hydrogenated ZnO exhibits excellent photoelectronic properties compared to undoped ZnO. In this article, the effects of hydrogen-plasma treatment and subsequent annealing on the electrical and optical properties of ZnO were investigated by a combination of Hall measurement, Raman scattering, and photoluminescence.

**Key words:** ZnO; hydrogen-plasma; photoelectronic properties



# 夫兰克-赫兹实验的改进

冯娟, 张贺, 赵飞

(中国地质大学(北京)物理实验教学示范中心, 北京 100083)

**摘要:**对传统的测量氩原子第一激发电位的方法进行了改进, 利用示波器光标“cursor”功能, 在示波器上直接读出波峰或波谷的电位。该方法减小了读数时的误差, 提高了测量精度, 并且锻炼了学生对示波器的使用, 受到较好的教学效果。

**关键词:**氩原子; 激发电位; 示波器; 误差; 测量精度

## 1 实验原理

1914年, 物理学家夫兰克和赫兹采用低速电子与稀薄气体原子碰撞的办法, 使原子从低能级激发到高能级。通过测量电子与被碰撞原子之间交换能量的特征, 测定了汞原子的第一激发电势, 直接证明了原子能级的存在; 并验证了原子发生跃迁时吸收或发射的能量完全是确定的, 不连续的, 从而为波尔理论提供了直接而独立的实验证据。实验中所用的夫兰克-赫兹仪用于测定氩原子的第一激发电位, 实验原理<sup>[1, 2]</sup>如图1所示:

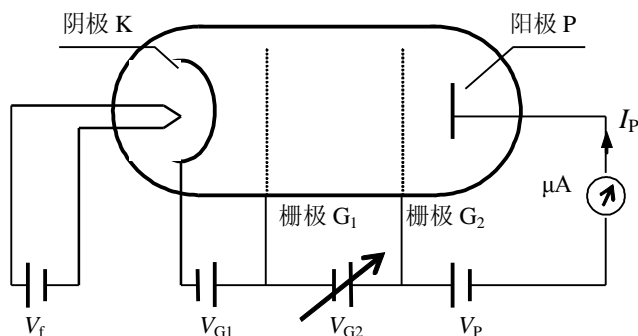


图1 夫兰克-赫兹实验原理图

$F-H$  管为四极管(其中充以氩气), 包括有阴极( $K$ , 灯丝部分), 两个栅极 $G_1$ 和 $G_2$ , 和一个板极 $P$ (也称阳极)。第一栅极 $G_1$ 靠近阴极 $K$ , 为控制栅极, 其作用是加一个正向电压 $V_{G1}$ , 用以消除电子在阴极附近的堆积效应, 并起到控制电子流大小的作用。第二栅极 $G_2$ 靠近阳极 $P$ , 第一栅极与第二栅极间距较大, 这是为了保证在常温下气体原子有足够高的碰撞机率。阴极 $K$ 在灯丝电压 $V_f$ 的加热下发射电子, 随着加速电压 $V_{G2}$ 的增加, 电子的能量逐渐增加。具有一定能量的电子主要在 $G_1$ 、 $G_2$ 空间内与原子发生碰撞交换能量, 对那些能量是原子第一激发能量整数倍的电子发生碰撞后而失去其全部能量, 在反向电场 $V_p$ 的作用下

**基金项目:** 2013年大学生创新实验项目(2013BXZ028)和中国地质大学教学研究与教学改革项目(JGYB-201233)联合资助

**作者简介:** 冯娟(1976-), 女, 北京人, 讲师, 在读博士生, 主要从事实验物理教学和应用地球物理学领域的研究。

被阻止而不能达到阳极 P，而对具有其它能量的电子，则仍有足够能量穿过  $G_2$  极而到达阳极 P，这样随着  $V_{G2}$  电压的增加，电流  $I_p$  会出现明显的周期性的起伏变化和等间距的极大和极小值。从相邻的波峰或波谷所示的电压差值，即可求得原子的第一激发电位。

## 2 传统测量方法

本实验采用 FD-FH-1 夫兰克—赫兹实验仪，如图 2 所示：



图 2 夫兰克—赫兹实验仪

### 2.1 直接在夫兰克—赫兹仪上寻找极值点

将扫描开关拨至“手动”档，调节  $V_{G2}$  至最小，然后逐渐增大其值，寻找  $I_p$  的极大和极小值点，以及相应的  $V_{G2}$  值，即找出对应的极值点  $(V_{G2}, I_p)$  [1]。两个波峰或波谷的  $V_{G2}$  之差就是第一激发电位。

### 2.2 描点画图寻找极值点

调节  $V_{G2}$  至最小，然后逐渐增大其值，每隔 1V 测量一组数据，列表记录对应的  $(V_{G2}, I_p)$  数值，画出  $I_p-V_{G2}$  曲线图。从曲线上寻找  $I_p$  值的极大或极小值点，以及相应的  $V_{G2}$  值，即  $I_p-V_{G2}$  关系曲线中波峰或波谷的位置，由图求出第一激发电位 [3]。

在教学实践中，我们发现电流  $I_p$  的读数不稳定，会出现一直上升或下降的现象，经过一段时间之后，电流变化趋于缓慢。厂家的解释是：电子管受热后，发射的电子数目不稳定，所以会出现电流读数跳动的现象。但这给学生测量带来了困扰，不知该何时读数。学生测量存在困难，而使结果不准确。

## 3 改进后的测量方法

利用示波器光标“cursor”功能测量波峰或波谷所对应的  $V_{G2}$  值，在示波器上直接读出波峰或波谷的电位，如图 3 所示。

该方法减小了读数时的误差，提高了测量精度。通过控制变量的方法，分别改变灯丝电压  $V_f$ 、第一栅极电压  $V_{G1}$ 、拒斥电压  $V_p$  的大小，还可以在示波器上直观的观测  $I_p-V_{G2}$  曲

线的变化<sup>[4]</sup>。有助于学生寻找最佳的工作参数，正确的设定参数值，得出精确地测量结果。分析不同变量对实验结果的影响，有助于学生理解各个实验参数的物理意义，更加深刻理解实验内容。

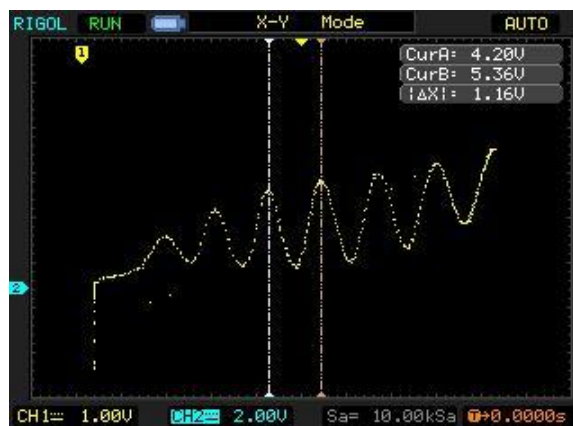


图 3

#### 4 结论

传统的测量方法比较单一，较为枯燥。改进后的测量方法，丰富了实验内容，提高了学生的兴趣；并且锻炼了学生对示波器的使用，收到较好的教学效果。

#### 参考文献：

- [1] 周惟公。大学物理实验[M]。北京：高等教育出版社，2009。
- [2] 邹莹，姚志，姜东光，孙继忠。夫兰克-赫兹实验的计算机模拟。物理实验，2014，34（3）：17-22。
- [3] 张卫山，杨善恒，鲁应涂，黄国蓝，樊江红，卢方武。基于 Origin 的夫兰克-赫兹实验数据分析。赤峰学院学报（自然科学版），2012，28（9）：6-7。
- [4] 张里荃，马艳梅，郝二娟。夫兰克-赫兹实验最佳实验条件及第一激发电位的研究。物理实验，2011，31（9）：37-38。

## Research on Balance Vibration Improvement on Franck-Hertz Experiment

FENG Juan, ZHANG He, ZHAO Fei

(Demonstration center of physics experiment, China University of Geosciences,  
Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper gives some suggestions on improve the experiment of measuring the first excitation voltage. Using the "cursor" function, we can read directly potential values of peaks and troughs from the oscilloscope. This method reduces the reading error, improves the accuracy of measurement, and trains the students' use of oscilloscope, with a good teaching effect.

**Key words:** argon atom; excitation voltage; oscilloscope; error; accuracy of measurement

# 巨磁电阻效应实验的研究与应用

郭琳<sup>a</sup>, 衣岩<sup>a</sup>, 杨显洁<sup>a</sup>, 蒲泓羽<sup>a</sup>, 李传涛<sup>b</sup>

(中国地质大学 a. 信息工程学院; b. 物理实验教学示范中心, 北京 100083)

**摘要:** 巨磁电阻材料是其中发展最快也是应用最迅猛的新型磁性材料, 因其独特的性能而被用于各种电子产品和传感器中。本文采用一定的实验方法测量巨磁电阻阻值与磁感应强度以及其他相关变量的关系, 阐述了巨磁电阻效应的作用机理和特性。为更好的了解其应用搭建了桥梁, 同时可作为大学物理实验教学内容。

**关键词:** 巨磁电阻; 磁场强度; 线圈电流; 物理实验

## 1 引言

2007年10月, 法国科学家阿尔贝·费尔和德国科学家彼得·格林贝格尔因分别独立发现了巨磁电阻效应而共同获得了2007年诺贝尔物理学奖。据权威机构调查, 对于各种材料的研究和生产, 磁性材料一直名列前茅, 仅2007年中国就生产了各种磁性材料总计约90万吨。而巨磁电阻材料是其中发展最快也是应用最迅猛的新型磁性材料, 因其独特的性能而被用于各种电子产品和传感器中。1994年IBM利用巨磁阻效应成功研制了硬磁盘读出磁头原型, 其磁盘记录密度和单位面积存储的数据点有了质的提高。随着对其研究的深入, 巨磁电阻效应将更多地应用于实际生活中。

巨磁电阻传感器应用广泛, 可用来测量弱磁场、角度、转速、位移、电流等, 与各向异性磁电阻传感器相比, 具有灵敏度更高、线性范围宽、可靠性高、寿命长, 抗恶劣环境等优点。巨磁电阻传感器可制成测速仪、定向仪、验钞机等, 可用于汽车无人驾驶、卫星定位、安全检查等各种自动控制系统, 另外巨磁电阻传感器在医疗方面也有很大应用<sup>[1-5]</sup>。

## 2 原理

### 2.1 巨磁电阻效应实验原理

所谓巨磁阻效应, 是指磁性材料的电阻率在有外磁场作用时较之无外磁场作用时存在巨大变化的现象。巨磁阻是一种量子力学效应, 它产生于层状的磁性薄膜结构。这种结构是由铁磁材料和非铁磁材料薄层交替叠合而成。当铁磁层的磁矩相互平行时, 载流子与自旋有关的散射最小, 材料有最小的电阻。当铁磁层的磁矩为反平行时, 与自旋有关的散射最强, 材料的电阻最大。

巨磁电阻效应可以由二流体模型来解释。在铁磁金属中, 导电的s电子要受到磁性原子磁矩的散射作用, 散射的几率取决于导电的s电子自旋方向与薄膜中磁性原子磁矩方向的相对取向。即自旋方向与磁矩方向一致的电子受到的散射作用很弱, 自旋方向与磁矩方向相反的电子则受到强烈的散射作用, 而传导电子受到的散射作用的强弱直接影响到材料电阻的大小。

根据二流体模型, 传导电子分成自旋向上和自旋向下两种, 由于多层膜中非磁性金属层

**基金项目:** 教学实验室开放项目(2013)资助

**作者简介:** 郭琳, 女, 中国地质大学(北京)信息工程学院学生。

**指导教师:** 李传涛, 男, 中国地质大学(北京)物理实验教学中心讲师, 博士, 从事地球物理学科研究和物理实验教学工作。

对两组自旋状态不同的传导电子的影响是相同的,所以只考虑磁层的影响。外加磁场为零时,相邻铁磁层的磁矩方向相反,两种电子都在穿过与其自旋方向相同的磁层后,在下一磁层受到强烈的散射,宏观上看,巨磁电阻材料处于高电阻状态。当外加磁场足够大时,原本反平行排列的各磁层磁矩都沿外磁场方向排列,一半电子可以穿过许多磁层只受到很弱的散射,另一半在每一层都受到很强的散射,宏观上,材料处于低电阻状态。这样就产生了巨磁电阻现象。

## 2.2 巨磁电阻实验内容及结论分析

### 2.2.1 磁场与巨磁电阻阻值的关系

了解巨磁电阻效应原理,测量不同磁场下的巨磁电阻阻值  $R_B$ ,作  $R_B/R_0 - B$  关系图,求电阻相对变化率  $(R_B - R_0)/R_0$  的最大值。

在磁场不断增强的过程中,巨磁电阻阻值会不断减小,由图 1 可见,最终会趋于平稳。此时由实验数据可知  $R_B$  即为最小值  $4.270\text{K}\Omega$ ,计算得出:  $(R_B - R_0)/R_0 \text{ max} = -11.4\%$ 。从本质上来看,电阻达到极限最小值,即是因为当外磁场足够大时,原本反平行的各层磁矩都沿外场方向排列,此时为极限状态,另一方面,可以看到磁场强度跟电阻之间不成线性关系。

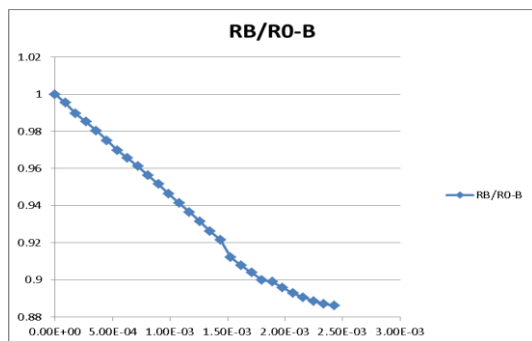


图 1  $R_B/R_0$  与磁场  $B$  的关系

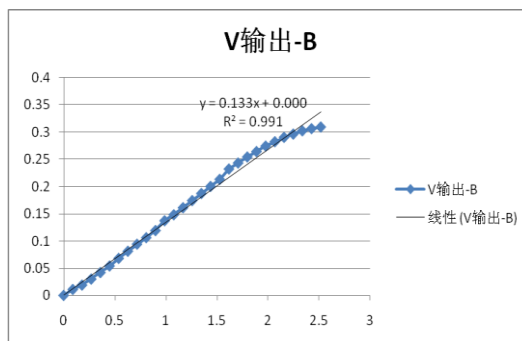


图 2 传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$  与磁场  $B$  关系

### 2.2.2 巨磁电阻灵敏度的计算

学习巨磁电阻传感器定标方法,计算巨磁电阻传感器灵敏度,由巨磁电阻传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$ ,得到电阻相对变化率  $(R_B - R_0)/R_0$  的最大值。由传感器技术指标知传感器线性范围为  $0.15\text{mT} - 1.05\text{mT}$ ,只取此部分数据作图,得到图 2。由最小二乘法拟合得到  $V_{\text{输出}} = 0.133 B$ ,相关系数为 0.991。因为传感器工作电压  $V_+$  为  $5\text{V}$ ,得到传感器灵敏度为  $30.8\text{mV/V/mT}$  (传感器技术指标中传感器灵敏度为  $30.0\text{mV/V/mT} - 42.0\text{mV/V/mT}$ )。由  $R_B/R_0 = (V_+ - V_{\text{输出}})/(V_+ + V_{\text{输出}})$ ,可求得  $(R_B - R_0)/R_0 \Big|_{\text{max}} = -11.6\%$ 。

### 2.2.3 巨磁电阻传感器输出电压 $V_{\text{输出}}$ 与其工作电压 $V_+$ 的关系

由最小二乘法拟合得  $V_{\text{输出}} = 0.029 V_+$ ,相关系数为 0.999。即在相同磁感应强度条件下,

传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$  与传感器的工作电压  $V_+$  成正比。说明在一定范围内，工作电压不是影响巨磁电阻值的因素。

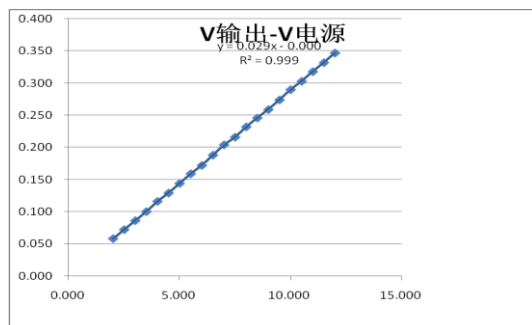


图3 传感器输出电压与其工作电压的关系

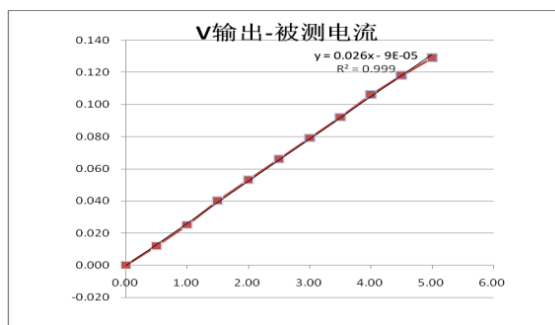


图4 传感器输出电压与被测电流的关系

#### 2.2.4 巨磁电阻传感器输出电压 $V_{\text{输出}}$ 与通电导线电流 $I$ 的关系

由最小二乘法拟合得到  $V_{\text{输出}} = 0.026I$ ，相关系数为 0.999，即巨磁电阻传感器的输出电压  $V_{\text{输出}}$  与被测电流  $I$  成正比。因此，可以用巨磁电阻传感器测量未知电流。

#### 2.2.5 巨磁电阻传感器工作电压 $V_+$ 与输出电压 $V_{\text{输出}}$ 的关系

测定待测直流电流时，传感器电源电压对于传感器输出的影响。

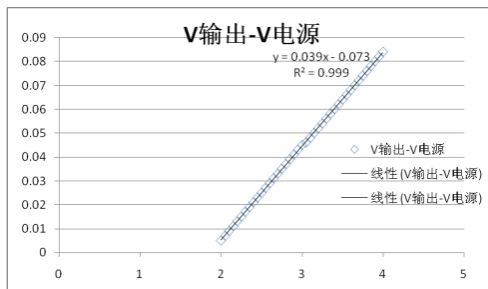


图5 传感器输出电压传感器工作电压的关系

由最小二乘法拟合得  $V_{\text{输出}} = 0.039V_+$ ，相关系数为 0.999。即在被测电流一定的条件下，传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$  与传感器的工作电压  $V_+$  成正比。

### 3 结束语

近年来，各种不同类型的巨磁电阻传感器相继被研发成功。它们可应用于位移、角度、电流及磁场等物理量的测量。本实验即是采用了多层膜巨磁电阻进行实验。多层膜巨磁电阻<sup>[6-8]</sup>线性范围较其他种类巨磁电阻最宽，因此适合用作测量譬如位移传感器。本文从磁场与巨磁电阻阻值的关系、巨磁电阻灵敏度的计算，巨磁电阻传感器输出电压与其工作电压的关系、通电导线电流  $I$ 、输出电压的关系进行了研究。该仪器可为高校物理实验提供一种研究磁电阻传感器磁阻特性和应用的新手段，帮助学生了解巨磁电阻效应的原理及应用，将在物理实验教学中发挥积极作用。

参考文献:

- [1] 李国栋。当代磁学[M]。北京: 科学技术出版社, 1999。
- [2] 姜宏伟。巨磁电阻效应[J]。首都师范大学学报(自然科学版), 2007, 28(6): 1-3。
- [3] 赖武彦。巨磁电阻引发硬盘的高速发展—2007年诺贝尔物理学奖简介[J]。自然杂志, 2007, 29(6): 348-352。
- [4] 张朝民。巨磁电阻效应实验仪的研制与应用[J]。物理实验, 2009, 29(6): 16-28。
- [5] 郭皓。20世纪物理学的奇葩-磁电子学[J]。现代物理知识, 1999, 11(6): 2-5。
- [6] 周勋。磁电阻效应的研究进展[J]。物理实验, 2000, 20(9): 13-14。
- [7] 倪敏, 许美新, 时晨。新型磁电阻效应实验仪研制及应用[J]。实验技术与管理, 2012, 29(5): 76-79。
- [8] 李文涛, 谢致薇, 杨元政, 陈先朝。薄膜巨磁电阻效应及其研究进展[J]。材料导报, 2010, 24(15): 29-38。

## Research and application on FD-GMR-B-type experimental instrument

Guo Lin<sup>a</sup>, YI Yan<sup>a</sup>, YANG Xian-jie<sup>a</sup>, PU Hong-yu<sup>a</sup>, Li Chuan-tao<sup>b</sup>

(a. School of information engineering; b. Demonstration Center of Physics Experiment,  
China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** GMR material is one of the fastest and most rapid development of new magnetic materials, because of its unique properties and is used in various electronic products and sensors. In this paper, we use experimental methods for measuring the relationship between GMR and magnetic induction density and other relevant variables to explain the mechanism and characteristics of the giant magnetoresistance effect. Building a bridge to better understand its applications, and can be used in college physics experiment teaching.

**Key words:** GMR; magnetic induction density; coil current; physics experiment

# 基于 T 型表面等离子体波导的双向分光器

陈 靖, 陈宗强, 钱 钧, 孙 骞

(南开大学 物理科学学院实验中心, 天津 300071)

**摘 要:** 利用时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)研究了基于金属-绝缘体-金属(metal-insulator-metal, MIM)结构的 T 形表面等离子体波导的分光特性。研究表明, 调节入射光波长可以实现左右两个方向分光。改变结构中圆形共振腔的直径可以使双向分光比均达到 100: 1 以上。本文中设计的结构具有良好的双向分光效果。

**关键词:** 表面等离子体; 双向分光器; 时域有限差分法

## 1 引言

当代信息科技日新月异的发展对光子器件的尺寸和集成度都有着很高的要求, 这要求器件在亚波长尺度上完成信息的传输和处理。传统的光学器件由于衍射极限的限制, 无法满足这一需求。基于表面等离子体的光子器件可以突破衍射极限, 实现亚波长尺度上的光信息传输。这为纳米集成光子器件的设计开发带来了曙光和机遇。

分光器是光子集成回路中最重要的无源器件之一。目前的光学器件按照原理主要分为熔融拉锥型和平面波导型, 它们的尺寸过大, 不利于器件的集成化。本文提出基于表面等离子体波导的 T 型分光器, 实现了微纳尺度下的大角度双向分光。本实验作为研究型实验题目, 以前沿科学研究热点为实验教学内容, 有利于本科生了解当代科研热门方向、学习逐步细化问题的科研方法, 培养创新能力、科研技能等综合实验素质。

## 2 基本原理

表面等离子体(surface plasmon polaritons, SPPs)是局域在金属表面的一种自由电子和光子相互作用形成的混合激发态<sup>[1,2]</sup>。在这种相互作用下, 自由电子在与其共振频率相同的光波照射下发生集体振荡。这种表面电荷振荡与光波电磁场之间的相互作用就构成了具有独特性质的 SPPs, 光能被束缚在空间尺寸远远小于其自由空间波长的区域。利用 SPPs 的这种特性设计高集成度的纳米光子器件, 可以实现纳米尺度的光子集成。基于 SPPs 模式的 MIM 结构相比于其他结构, 具有更小的模式尺寸, 是目前被研究者们广泛研究的结构之一。基于 MIM 结构的光子器件的开发, 例如: 光开关<sup>[3,4]</sup>、光传感<sup>[5,6]</sup>、滤波器<sup>[7,8]</sup>、分光器<sup>[9,10]</sup>等, 在理论研究和实验研究方面都取得了众多突破, 成为新一代纳米集成光路的重要元件。

本文采用 FDTD 法模拟 T 型波导的分光特性。FDTD 是一个常用的模拟技术<sup>[11]</sup>, 其方法主要是将时间与空间网格化, 在格点间距很小的极限情况下, 将函数的微分运算转换成差分运算。运用在麦克斯韦方程时, 给定一初始场, 可模拟电磁波与材料的相互作用, 与此电磁波随时间的演化行为。FDTD 方法是直接对于麦克斯韦方程组求解, 并且除了在时间和空间上的数值离散处理以外, 没有采用任何物理上的近似, 这表明了 FDTD 方法在理论上是

---

**基金资助:** 教育部物理学基地人才培养基金(No. J0730315), 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)(No. 20110031120005), 国家基础科学人才培养基金(No. J1103208, No. J1210027)

**作者简介:** 陈靖(1980-), 女, 天津市人, 南开大学物理科学学院讲师, 博士, 研究方向为: 纳米光子学、非线性光学。



一个非常精确的方法。迄今为止，FDTD 法作为基本的模拟方法被研究工作大量的使用。

### 3 结构及模拟分析

本文中环形谐振器由一个 T 型 MIM 波导、一个圆形共振腔和一个方形共振腔组成，如图 1 所示。灰色和白色区域分别表示 Ag 和空气；T 型 MIM 波导宽度  $W=200\text{nm}$ ；圆形共振腔直径  $D=200\text{nm}$ ；方形共振腔边长  $L=200\text{nm}$ 。波导和环形波导的耦合距离均为  $d=5\text{nm}$ 。空气的折射率  $n=1$ ，Ag 的介电常数可以由 Lorentz-Drude 模型给出<sup>[12]</sup>：

$$\varepsilon_m = \varepsilon_\infty - \sum_{m=0}^5 \frac{G_m \Omega_m^2}{\omega_m^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma_m}, \quad (1)$$

其中  $\varepsilon_\infty$  为频率无限大时对应的相对介电常数， $G_m$  为振子强度， $\Omega_m$  为等离子体频率， $\omega_m$  为谐振腔共振频率， $\Gamma_m$  为阻尼因数， $\omega$  为入射光角频率。上述所有的参数的选取均来源于文献<sup>[12]</sup>。

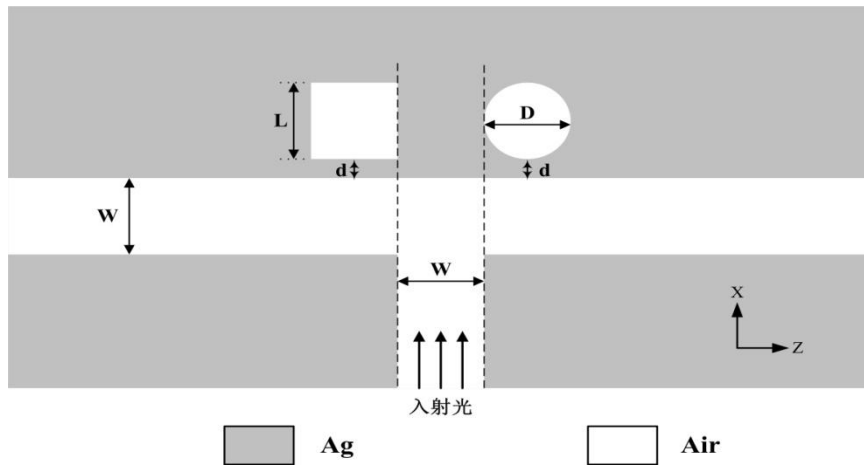


图 1 结构示意图

入射光从 T 型波导底端沿 X 轴方向以 TM 模式入射，入射光电场量的振幅为  $1\text{V/m}$ ，其半高全宽为 (FWHM) 与 MIM 波导宽度相等。利用 FDTD 方法模拟 T 型波导的分光特性，根据计算经验，FDTD 模拟计算中使用的元胞大小  $dx=dz=2\text{nm}$ 。这样的元胞不但可以达到所需的计算精度，同时在数值模拟所需要的时间也是可以接受的。

当入射波长满足 T 型波导与方形共振腔耦合条件时，光波向左传输；当入射波长满足 T 型波导与圆形共振腔耦合条件时，光波向右传输。利用这一特性，可以实现不同波长下的双向分光。图 2 为 T 型双向分光器的双向透射情况。光向左传输的透射率为  $T(L)$ ，光向右传输的透射率为  $T(R)$ 。由透射谱图 2. (a) 可知在波长为  $690\text{nm}$  时（分光波长），T 型波导和矩形共振腔有强耦合作用，光波向左传输，该结构的分光比，即左右透过率之比为  $T(L):T(R) = 32:1$ 。当波长为  $807\text{nm}$  时，T 型波导和圆形共振腔具有强耦合作用，光波向右传输，分光比为  $T(R):T(L) = 307:1$ 。它们的场强分布如图 2. (b)-(c) 所示。由此，我们设计的分光器具有明显的分光效果。

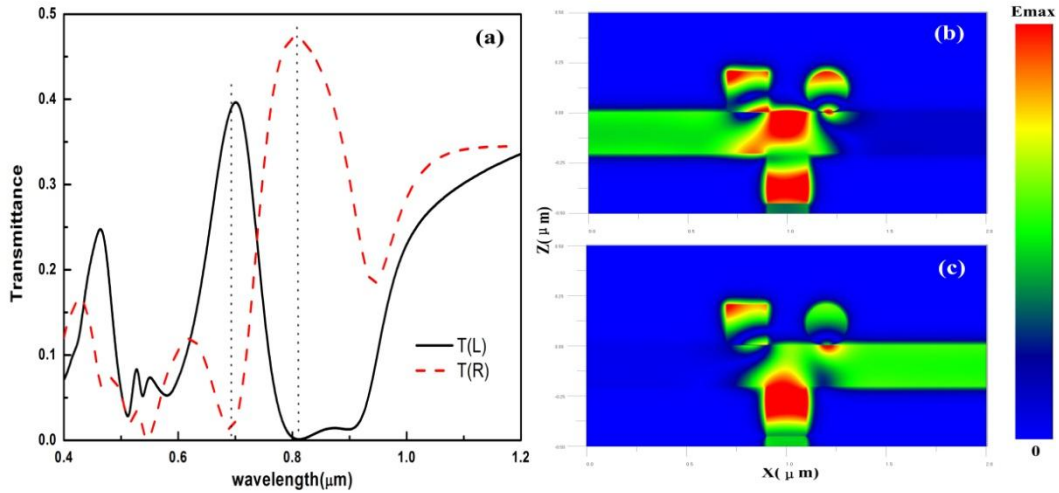


图 2. T 型分光器的双向透射谱 (a); 磁场  $H_y$  分布图 (b) 入射波长  $\lambda = 695\text{nm}$ , (c) 入射波长  $\lambda = 807\text{nm}$

下面，通过改变圆形共振腔直径  $D$  来优化分光器的双向分光比。改变圆形共振腔直径为  $D=160\text{nm}$ ,  $180\text{nm}$ ,  $120$  和  $240\text{nm}$ ，其他结构参数保持不变，其双向透射谱如图 3 所示。分光波长及分光比见表 1，模拟结果表明，随着  $D$  的减小，光在共振腔中的传播长度将会减小，欧姆损耗也会随之减小。因此，向左方向的透射率将会增大。这种情况下，分光波长发生蓝移。向左传输的分光比增大，向右传输的分光比减小。随着  $D$  的增大，光在共振腔中的传播长度将会增大，欧姆损耗也会随之增大。因此，向右方向的透射率将会减小。这种情况下，分光波长发生红移，向左传输情况下和向右传输情况下的分光比都会降低。根据表 1 综合考虑分析，在圆形共振腔直径  $D=160\text{nm}$  时，左右两个方向具有最好的分光效果，两个方向的分光比都可以达到 100: 1 以上。

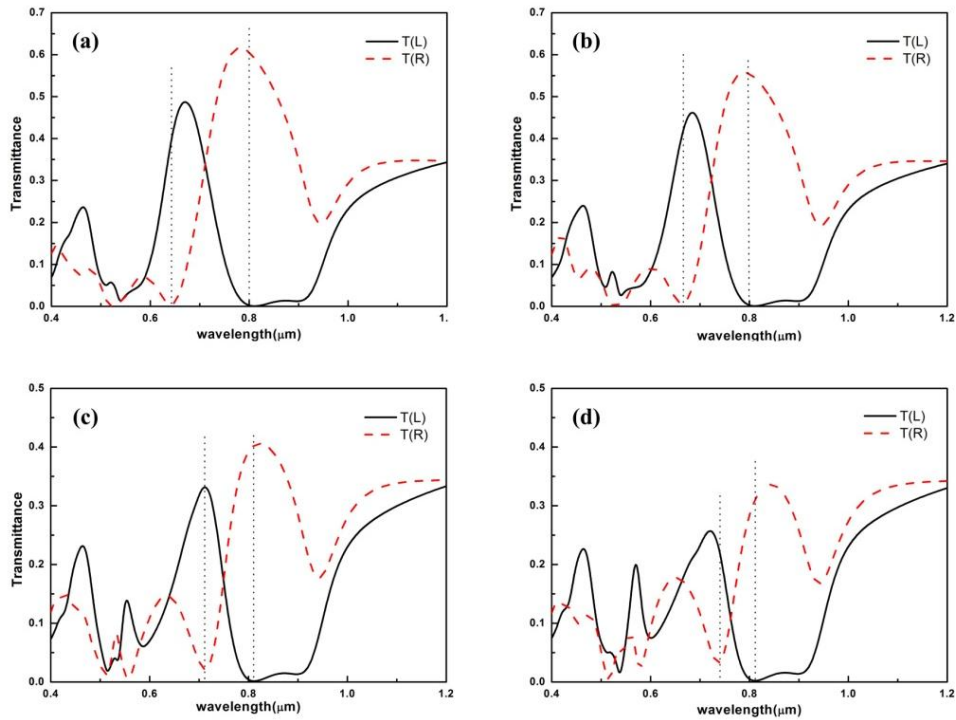


图 3 T 型分光器双向透射谱，圆形共振腔直径：(a)  $D=160\text{nm}$ , (b)  $D=180\text{nm}$ , (c)  $D=220\text{nm}$ , (d)  $D=240\text{nm}$ 。

表 1 T 型分光器双向分光比

D (nm)	向左传输		向右传输	
	分光波长(nm)	T(L):T(R)	分光波长(nm)	T(R):T(L)
160	643	101:1	797	109:1
180	666	45:1	798	116:1
200	690	32:1	807	307:1
220	710	14:1	809	184:1
240	738	7:1	810	77:1

#### 4 结束语

本实验利用 FDTD 方法模拟了基于 T 型 MIM 波导的分光器的分光特性。研究表明，通过调节入射波长，可以实现双向分光。调整结构中的圆形共振腔直径，可以优化左右两个方向的分光比均达到 100: 1 以上。基于 SPPs 的分光器具有强局域性、小尺度等特点。这些特性显示了其在纳米光子集成中应用的巨大潜力。学生通过本实验的学习，深入理解基于 SPPs 的 T 形双向分光器的基本原理。通过对结构参数的分析研究，学习科研的基本思维方式，掌握分析实验数据和推断实验结果的方法，培养学生的创新能力、科研技能等综合实验素质。

#### 参考文献：

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. Nature, 2003, 424 (6950): 824–830.
- [2] Lezec H J, Degiron A, Devaux E, et al. Beaming light from a subwavelength aperture [J]. Science, 2002, 297 (5582): 820–822.
- [3] Veronis G and Fan S. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides [J]. Appl Phys Lett, 2005, 87 (13): 131102-1-3
- [4] Zhou W, Huang X. Active Control of Optical Signals in the Plasmonic Waveguides [J]. Inte J Electr Energ, 2013, 1 (4): 304-307.
- [5] Brolo A G, Gordon R, Leathem B, et al. Surface Plasmon Sensor Based on the Enhanced Light Transmission through Arrays of Nanoholes in Gold Films [J]. Langmuir, 2004, 20 (12): 4813-4815.
- [6] Lee D, Yim H, Lee S, et al. Tiny surface plasmon resonance sensor integrated on silicon waveguide based on vertical coupling into finite metal-insulator-metal plasmonic waveguide [J]. Opt. Express, 2011, 19 (21): 19895-19900.
- [7] Lu H, Liu X, Mao D, et al. Tunable band-pass plasmonic waveguide filters with nanodisk resonators [J]. Opt. Express, 2010, 18 (17): 17922-17927
- [8] 陈靖, 陆文强, 孙骞. 表面等离子体环形共振器的滤波性质[J]. 物理实验, 2012, 32(7): 6-9.
- [9] Zhang X, Li Z, Chen J, et al. A dichroic surface-plasmon-polariton splitter based on an asymmetric T-shape nanoslit [J]. Opt. Express, 2013, 21 (12): 14548-14554.

- [10] Wang G, Lu H. Unidirectional excitation of surface plasmon polaritons in T-shaped waveguide with nanodisk resonator [J]. Opt. Commun, 2012, 285 (21): 4190-4193.
- [11] Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. Antennas and Propagation [J]. IEEE Transactions on, 1966, 14(3): 302-307.
- [12] Rakic A D, Djuricic A B, Elazar J M, et al. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectric devices [J]. Appl Opt, 1998, 37 (22):5271-5283.

## **A bidirectional splitter based on a surface-plasmon-polariton T-shape waveguide**

**Abstract:** The splitter characteristic of a T-shape waveguide base on metal-insulator-metal (MIM) structures is simulated by using finite-difference time-domain method. A bidirectional splitting effect can be obtained by adjusting incident wavelength. Splitting ratios are tunable by changing the diameter of the disk resonator. With proper selection of the diameter, bidirectional splitting ratios of our structures can be achieved up to 100:1.

**Key words:** surface plasmon polaritons; bidirectional splitter; finite-difference time-domain method

# 针对不同类型样品的原子力显微镜实验教学研究

王中平, 谢宁, 张宪峰, 张增明, 孙腊珍

(中国科学技术大学 物理学院物理实验教学中心, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 利用磁控溅射法在硅衬底沉积金属铝作为光学薄膜样品, 硅衬底表面制备单分散的国家标准物质, DNA 分散在云母片表面的生物样品, 作为不同组的学生进行实验的研究样品, 在室温下以不同型号原子力显微镜的轻敲模式进行样品的图像扫描, 然后不同组的同学对实验结果进行比较讨论, 进一步学习掌握原子力显微镜的表征内容。本实验结合了近代的样品制备技术, 标准化的知识以及生物样品的制备方法和现代化的表征测试手段, 其内容设置合理, 实验先进, 适合拓展学生的认知领域, 非常适合本科生的研究型实验教学。

**关键词:** 原子力显微镜; 标准样品; 金属薄膜; DNA

## 1 引言

显微镜具有很高的分辨本领和放大倍数, 是研究物质宏观结构的有力工具。17 世纪初应用于科学研究, 显微镜的发明大大扩展了人类的视野, 把人类的视野从宏观引入到微观, 直接导致了 19 世纪细胞学、微生物学等学科的建立。显微镜的发展大致可分为三代: 第一代显微镜—光学显微镜 (Optical Microscopy, OM): 17 世纪末荷兰人 L. Antoni van 首先研制成功了第一台光学显微镜, 把人们带进了五彩缤纷的微观世界。但由于光波的性质, 光学显微镜的分辨能力非常有限, 光的衍射效应使尺寸小于光波长一半的物体的细节变得不清晰。第二代显微镜—电子显微镜 (Electron Microscopy, EM): 在 1924 年法国物理学家德布罗意提出物质波概念的思想指导下, 采用高能电子束代替光束, 1931 年鲁斯卡研制成功世界上第一台电子显微镜, 开创了人类研究微观世界的新纪元。但电子显微镜也存在着很多不足, 例如高速电子容易透入物质深处, 低速电子又容易被样品的电磁场偏折, 故电子显微镜很少能对表面结构有所揭示, 表面物理的迅速发展又急需一种能够观测物质表面结构的显微术, 因此 80 年代诞生了第三代显微镜—扫描隧道显微镜 (Scanning Tunneling Microscopy, STM)<sup>[1-5]</sup>, 1982 年 IBM 公司苏黎世实验室的 G Bining 博士和 H Rohrer 博士研制成功了世界第一台 STM, 其工作原理是基于量子力学中的隧道效应。STM 的出现, 使人类能够实时观察单个原子在物质表面的排列状态和与表面电子行为有关的物理、化学性质。STM 具有高分辨率, 能够获得表面三维图像, 可工作在大气、真空、溶液环境下, 工作温度可以改变。STM 工作时要检测针尖和样品之间隧道电流的变化, 因此它只能直接观察导体和半导体的表面结构, 不能在绝缘表面工作。为了弥补 STM 的这一不足, 1986 年 Bining、Quate 和 Gerber 发明了第一台原子力显微镜 (Atom force microscopy, AFM)<sup>[6-10]</sup>。原子力显微镜 (AFM) 是继扫描隧道显微镜 (STM) 之后发明的一种具有原子级高分辨的新型仪器。它是观察表面形貌的一种新型扫描探针显微镜 (Scanning Probe Microscopy, SPM), 即使用一个尖锐的探针在样品表面扫描, 在扫描过程中记录探针与样品的相互作用, 从而得到样品的表面信息。在 AFM 的基础上, 又相继发明了扫描近场光学显微镜 (SNOM)、摩擦力显微镜 (FFM) 等一系列的显微镜。表 1 给出了扫描探针显微镜家族的各显微镜之间的比较<sup>[2, 5]</sup>。

**作者简介:** 王中平 (1976-), 男, 山东临沂人, 副教授, 博士, 凝聚态物理。

表 1 扫描探针显微镜家族成员之比较

名称	检测信号	分辨率
扫描隧道显微镜 (STM)	探针—样品间的隧道电流	0.1 nm (原子级分辨率)
原子力显微镜 (AFM)	探针—样品间的原子力	
横向力显微镜 (LFM)	探针—样品间相对运动横向作用力	
磁力显微镜 (MFM)	磁性探针—样品间的磁力	10 nm
静电力显微镜 (EFM)	带电荷探针—带电样品间静电力	1 nm
近场光学显微镜 (SNOM)	光探针接收到样品近场的光辐射	100 nm

原子力显微镜不但具有高分辨率，能从原子尺度观察导体和半导体表面的原子形貌，而且几乎可以对所有的表面（导体、半导体以及绝缘体）成像，包含聚合物、陶瓷、复合材料、玻璃和生物样品，并可以在大气和液体环境下无损伤地直接观察物体，对各种材料和样品进行纳米区域的物质性质包括形貌进行探测，现已广泛应用于半导体、纳米功能材料、生物、化工、食品、医药等研究领域，成为科学研究的基本工具，具有广阔的应用前景和强大的生命力<sup>[2-5, 11-14]</sup>。

AFM 是以 STM 基本原理发展起来的扫描探针显微镜。AFM 扫描能提供各种类型样品的表面状态信息，其优点是在大气条件下，以高倍率观察样品表面，可用于几乎所有样品（对表面光洁度有一定要求），而不需要进行其他制样处理，就可以得到样品表面的三维形貌图像。并可对扫描所得的三维形貌图像进行粗糙度计算、厚度、步宽、方框图或颗粒度分析。结合 AFM 样品制备技术与 AFM 表征技术的近代物理实验，融入研究性实验的各个环节，采用不同组别的学生制备不同类型的样品，利用 AFM 进行表面形貌的表征，再结合实验结果进行课堂讨论，让学生掌握 AFM 的基本原理的同时，掌握了样品制备技术和学习了 AFM 测试表征的表面状态信息。

## 2 实验原理

AFM 是一种以物理学原理为基础，通过扫描探针与样品表面原子的相互作用而成像的新型表面分析仪器。AFM 与 STM 最大的差别在于并非利用电子隧道效应，而是利用原子之间的范德华力的作用来呈现样品的表面特性<sup>[2]</sup>。假设两个原子中，一个处在悬臂的探针尖端，另一个是在样品的表面原子，它们之间的范德华作用力会随距离的改变而变化，其作用力与距离的关系曲线如图 1 所示，当原子与原子相互接近时，彼此电子云斥力的作用大于原子核与电子云之间的吸引力作用，所以整个合力表现为斥力的作用；反之若两原子分开有一定距离时，其电子云斥力的作用小于彼此原子核与电子云之间的吸引力作用，故整个合力表现为引力的作用。利用这个力的性质，可以让针尖与样品处于不同的间距，从而实现 AFM 不同的工作模式如图 1 的下图 (a), (b), (c) 所示，(a) 接触模式(contact mode)：探针针尖始终与样品表面保持紧密的接触，而相互作用力表现为排斥力。扫描时，悬臂施加在针尖上的力有可能破坏样品的表面结构，因此力的大小范围在  $10^{-10} \sim 10^{-6}$  N。若样品表面柔嫩而不

能承受这样的力, 便不宜选用接触模式对样品表面进行成像。(b) 非接触模式( non-contact mode): 针尖距离样品表面上方 5~10 nm 的距离处振荡。样品与针尖之间的相互作用由范德华力控制, 原子之间表现为吸引力, 力的大小在  $10^{-12}$  N 左右, 样品不会被破坏, 而且针尖也不会被污染, 特别适合于研究柔嫩物体的表面。(c) 轻敲模式( tapping mode): 针尖和样品的间距几到十几纳米, 原子间表现为吸引力, 针尖在样品表面上方以其共振频率振荡, 针尖仅仅是周期性地短暂地接触或敲击样品表面。这就意味着针尖接触样品时所产生的侧向力被明显地减小了。因此当检测柔嫩的样品时, AFM 的敲击模式是最好的选择之一。表 2 清楚地给出 AFM 的三种扫描模式(接触模式、轻敲模式、非接触模式)的相互作用力、分辨率以及对样品的影响的比较。在原子力显微镜的系统中, 是利用微小探针与待测物之间交互作用力, 来呈现待测物的表面之物理特性。针尖和样品之间的作用力  $F$  与微悬臂的形变  $d$  之间遵循虎克定律:  $F = -kd$  (1)。式中,  $k$  代表微悬臂的弹性常数,  $d$  为微悬臂的弯曲形变距离。

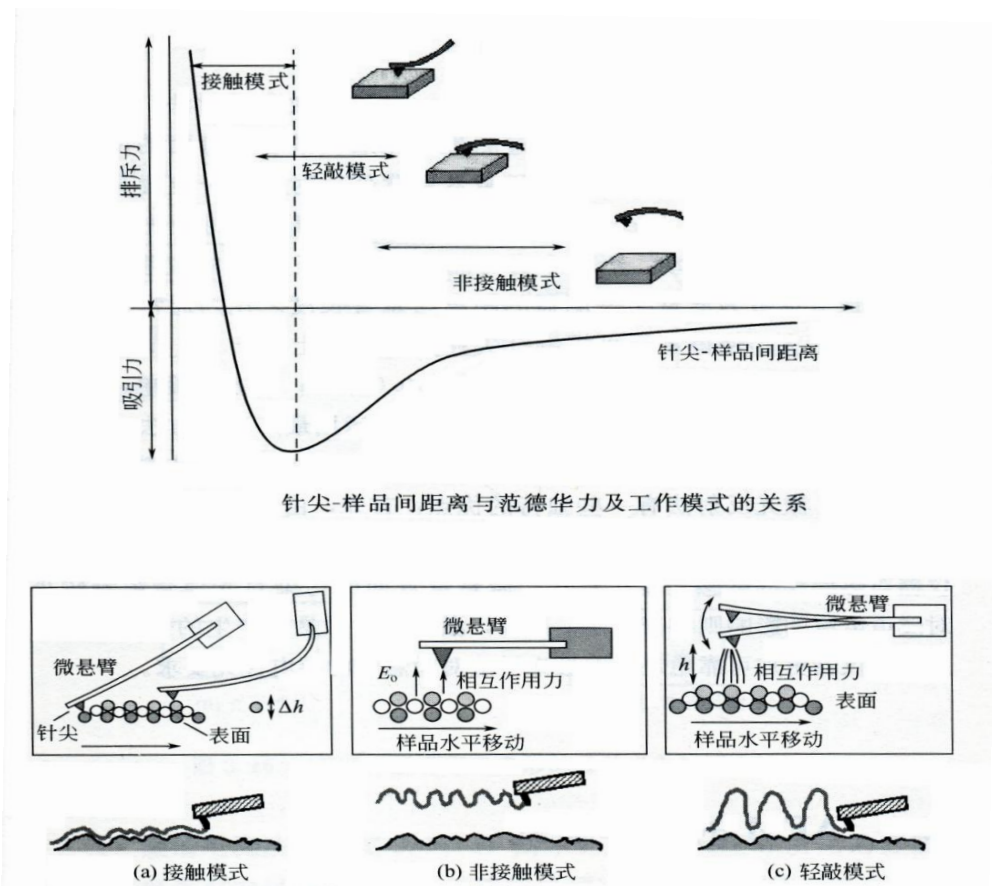


图 1 原子力显微镜的针尖-样品间距离与范德华力及工作模式[(a) 接触模式; (b) 非接触模式; (c) 轻敲模式]的关系图<sup>[1]</sup>

表 2 不同扫描模式的相互作用力、分辨率以及对样品的影响

比较项目	接触模式	非接触模式	轻敲模式
针尖与样品作用力	恒定	变化	变化
分辨率	最高	最低	较高
对样品影响	可能损伤样品	无损伤	无损伤

图 2 给出了原子力显微镜的结构简图。它是将一个对微弱力极敏感的微悬臂一端固定，另一端有一微小的针尖，针尖与样品的表面轻轻接触。由于针尖尖端原子与样品表面原子间存在极微弱的排斥力，通过扫描时控制这种力的作用，使带有针尖的微悬臂对应于针尖与样品表面原子间作用力的等位面而在垂直于样品的表面方向起伏运动测出表面的形貌。利用激光反射检测法，可以测得微悬臂对应于扫描各点的位置变化，从而可以获得样品的表面形貌的信息。AFM 的关键组成部分是一个头上带有一个用来扫描样品表面的尖细探针的微小悬臂（cantilever）。这种悬臂大小在数十至数百微米，通常由硅或者氮化硅构成，其上载有探针，探针之尖端的曲率半径则在纳米量级。当探针被放置到样品表面附近的地方时，悬臂上的探针头会因为受到样品表面的力而遵从胡克定律弯曲偏移。激光二极管的光线聚焦在悬臂的背面上。当悬臂在力的作用下弯曲时，反射光产生偏转，使用位敏光电检测器偏转角。然后通过计算机对采集到的数据进行处理，从而得到样品表面的三维图像。完整的悬臂探针，置放于在受压电陶瓷扫描器控制的样品表面，在三个方向上以精度水平 0.1 nm 或更小的步宽进行扫描<sup>[11-16]</sup>。当在样品表面详细扫描（XY 轴）时，悬臂的位移反馈控制的 Z 轴作用下保存固定不变。以对扫描反应是反馈的 Z 轴值被输入计算机处理，得出样品表面的观察图像（3D 图像）。

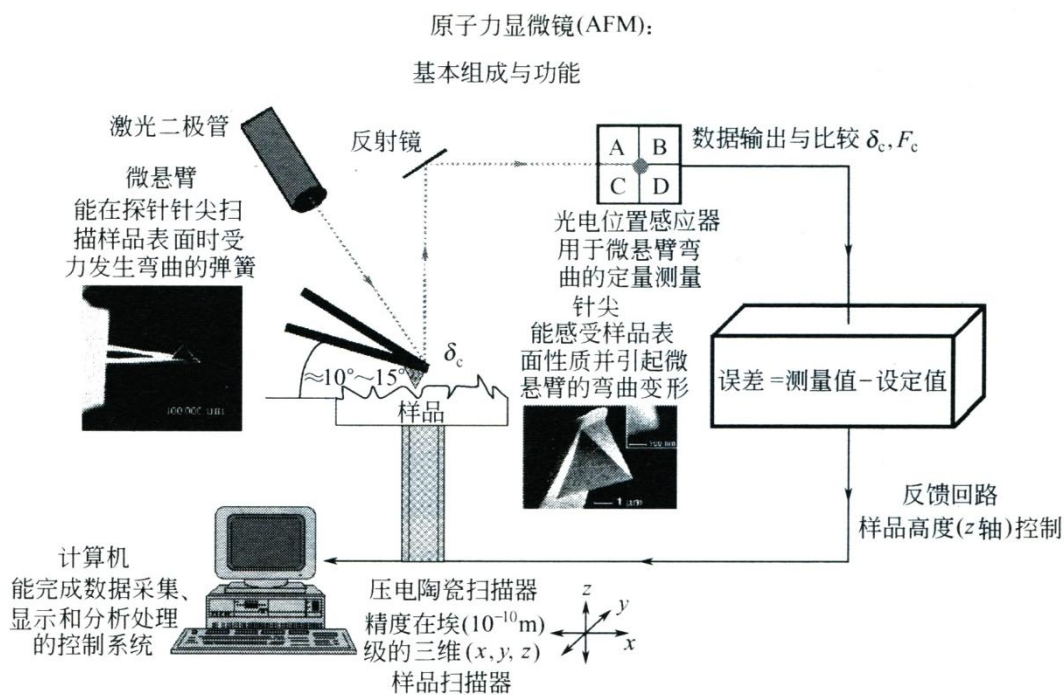


图 2 原子力显微镜结构简图<sup>[1]</sup>

### 3 实验装置和方法

用于实验教学使用的原子力显微镜有两种型号：分别为国产的扫描探针显微镜系统（广州本原，CSPM5500 型）和进口原子力显微镜（日本精工，Nanocute II）。其中国产的 CSPM 型扫描探针显微镜可以作为扫描隧道显微镜（STM，横向 0.1 nm，垂直 0.01nm）教学科研实验使用；也可以作为原子力显微镜（AFM，横向 0.2nm，垂直 0.1nm）教学实验科研使用。轻敲模式的探针购买自 BudgetSensors，悬臂弹性系数 40 N/m，共振频率 300 kHz。样品在室温下以轻敲模式在空气中成像。所有图像采集的扫描频率为 1 Hz。

金属铝薄膜样品制备采用磁控溅射法制备（北京泰科诺科技有限公司的高真空磁控溅射镀膜机 JCP-350M3）。聚苯乙烯微球粒度标准物质（350 nm 和 60 nm）采购自中国石油大学



(北京) 标准化研究室。DNA 分散到云母片上的样品采用直接稀释分散处理和冰水冷却结合的方法。

#### 4 分析讨论

图 3 给出了通过磁控溅射方法控制时间沉积的不同厚度的金属铝薄膜的 AFM 图像, 图中 (a) 的沉积薄膜厚度为 20 nm, 图 (a) 正下方对应的是其三维图像; 图中 (b) 的沉积薄膜厚度为 10 nm, 图 (b) 正下方对应的是其三维图像; 图中 (c) 的沉积薄膜厚度为 5 nm, 图 (b) 正下方对应的是其三维图像。由图中可以分析得出, 随着沉积时间的增加, 沉积厚度相应增加, 图 (c) 的金属铝的纳米颗粒尺寸较小, 大概 7-10 nm 左右, 表面起伏较大, 均匀性较差, 图 (b) 的纳米颗粒尺寸增加到 10-15 nm 左右, 表面粗糙度仍然很大, 均匀性差, 图 (a) 的纳米颗粒尺寸增加到 15-20 nm 左右, 颗粒的均匀性较好。从图中可以得出, 通过 AFM 图像, 可以直观的得出表面的纳米颗粒的尺寸大小、颗粒均匀分布情况以及表面粗糙程度。根据不同沉积时间或沉积厚度的控制, 通过 AFM 图像的扫描观察, 可以确定所制备的薄膜的沉积的具体工艺参数, 可以更好的控制薄膜的质量。这样学生既学习了薄膜样品制备的技术手段, 同时也掌握关于薄膜材料的表面表征的方法。

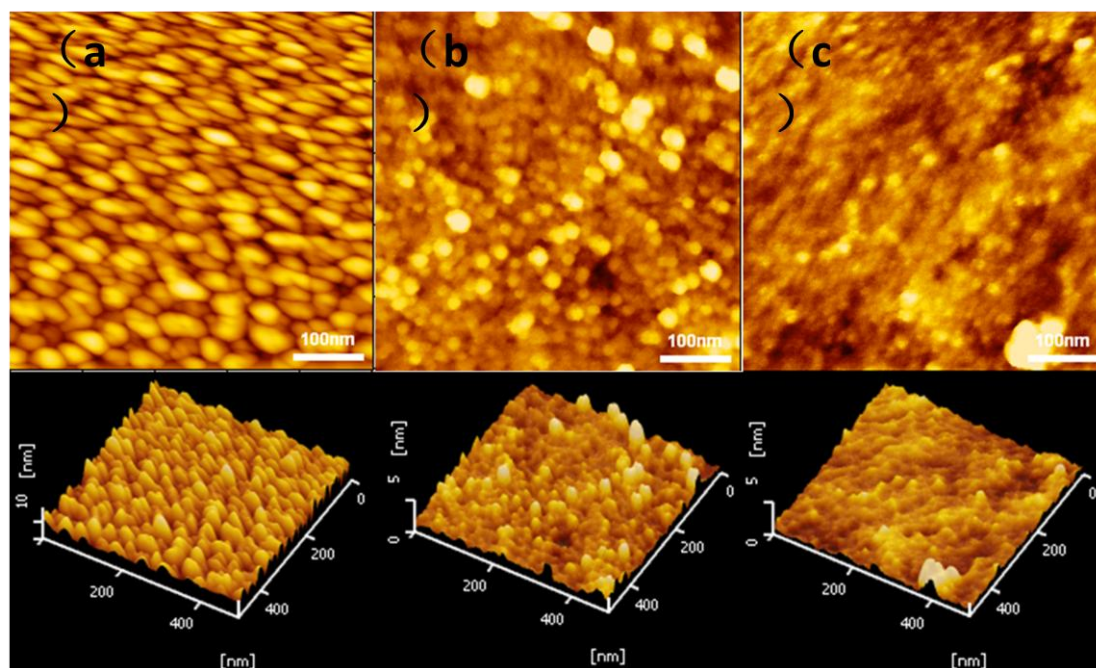


图 3 沉积在硅衬底上的金属铝薄膜的原子力显微镜 (Nanocute II) 扫描图像, (a) 厚度 20 nm; (b) 厚度 10 nm; (c) 厚度 5 nm

图 4 给出了国家级标准物质聚苯乙烯微米纳米球颗粒的 AFM 图像, 图中 (a) 为 350 nm 的聚苯乙烯微球的 AFM 图像和图中 (b) 为 60 nm 聚苯乙烯纳米球。而标准物质 reference material(RM)是一种已经确定了具有一个或多个足够均匀的特性值的物质或材料, 作为分析测量行业中的“量具”, 在校准测量仪器和装置、评价测量分析方法、测量物质或材料特性值和考核分析人员的操作技术水平, 以及在生产过程中产品的质量控制等领域起着不可或缺的作用。通过利用原子力显微镜表征单分散的标准物质, 可以由已知的标准物质的颗粒尺寸, 对原子力显微镜扫描图像的标度进行标定, 保证测量结果的准确性。图中给出的 350 nm 的标准物质的粒径均匀性非常好, 但是 60 nm 的标准物质的粒径均匀性就相对较差, 这就说明在制备标准物质时粒径越小, 其均匀性就越难保证, 其不确定度就会增大。通过这个实验让

学生掌握如何确定扫描图像的标度的准确性，以及学会正确操作使用原子力显微镜。

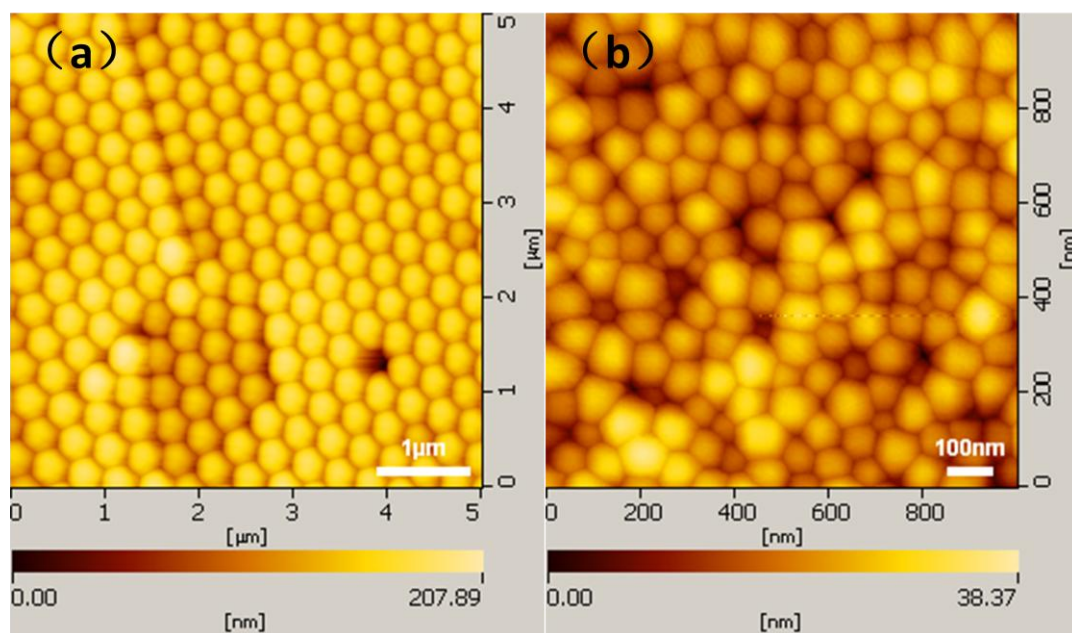


图4 标准物质的原子力显微镜（Nanocute II）扫描图像，（a）350 nm 的聚苯乙烯微球和（b）60 nm 聚苯乙烯纳米球

AFM 对生物材料样品制备有一定的要求，包括：表面平整，高度起伏 $\leq 10\mu\text{m}$ ，衬底表面具有一定的硬度且表面平滑，如用新鲜解离的云母片等，样品在基底表面要求相对均匀、分散。氮气展平，吹干。固定好的样品置于 AFM 的扫描器上，即可进行生物大分子表面形态结构的成像观测。图 5 给出了双螺旋结构的 DNA 扭转形成 DNA 超螺旋结构的三级结构的 AFM 图像。相当于其三级结构。图 6 给出了 DNA 分子伸展状态的 AFM 图像，内插图给出了局部选择放大得到的 DNA 分子的精细结构的 AFM 图像，其单节点的尺寸在 30 nm 左右。采用滴加  $\text{Ni}^{2+}$  在云母片上来固定与展开 DNA 分子，在一定程度上能破坏 DNA 超螺旋结构，便于 DNA 分子的舒展，有利于成像。该实验既能让学生掌握原子力显微镜的原理和使用方法，同时学习一些基本的生物样品制备方法，以及如何利用原子力显微镜表征生物样品。利用原子力显微镜在不同的工作模式，不同的环境下可以得到生物样品的表面面貌，表面特性以及动力学过程等信息。

通过不同组的学生对不同样品的制备和原子力显微镜扫描观察，各组的学生都有各自对原子力显微镜的测试表征的认识以及相关样品的制备知识，以各自的实验结果为基础，进行相互讨论，加深学生对原子力显微镜的基本原理和操作的理解和掌握，同时学习不同样品的制备技术和方法。把实验教学与实验技能、实验知识贯穿起来，活跃课堂教学氛围，充分调动学生的学习兴趣 and 爱好，并体现在整个教学的各个环节中去。

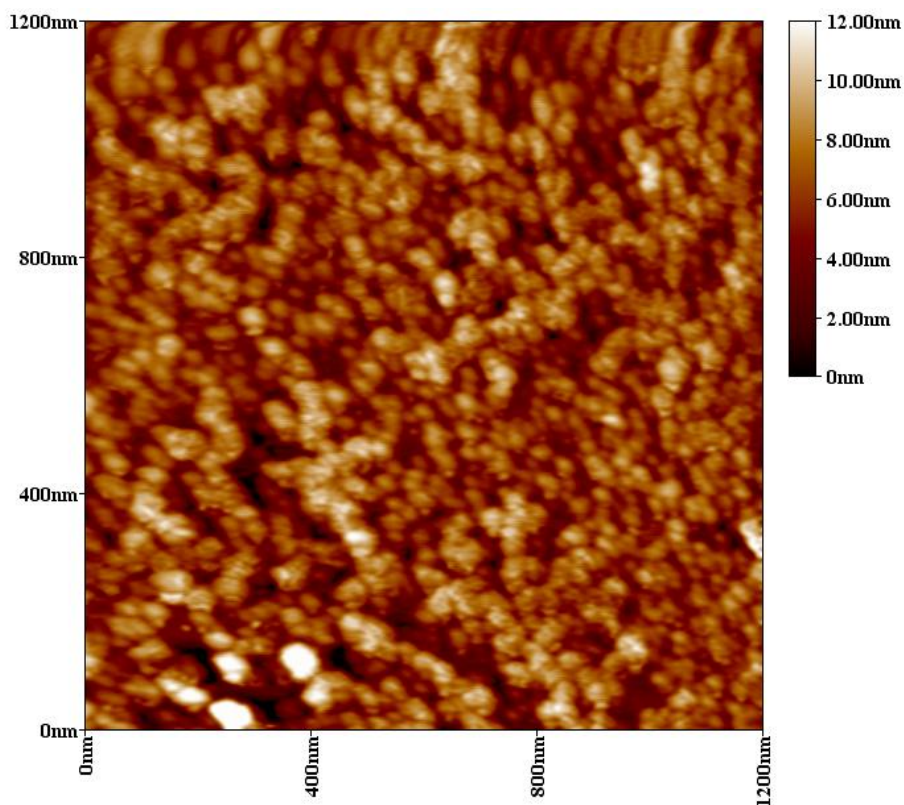


图 5 分散在云母片上的 DNA 的原子力显微镜（CSPM5500）扫描图像

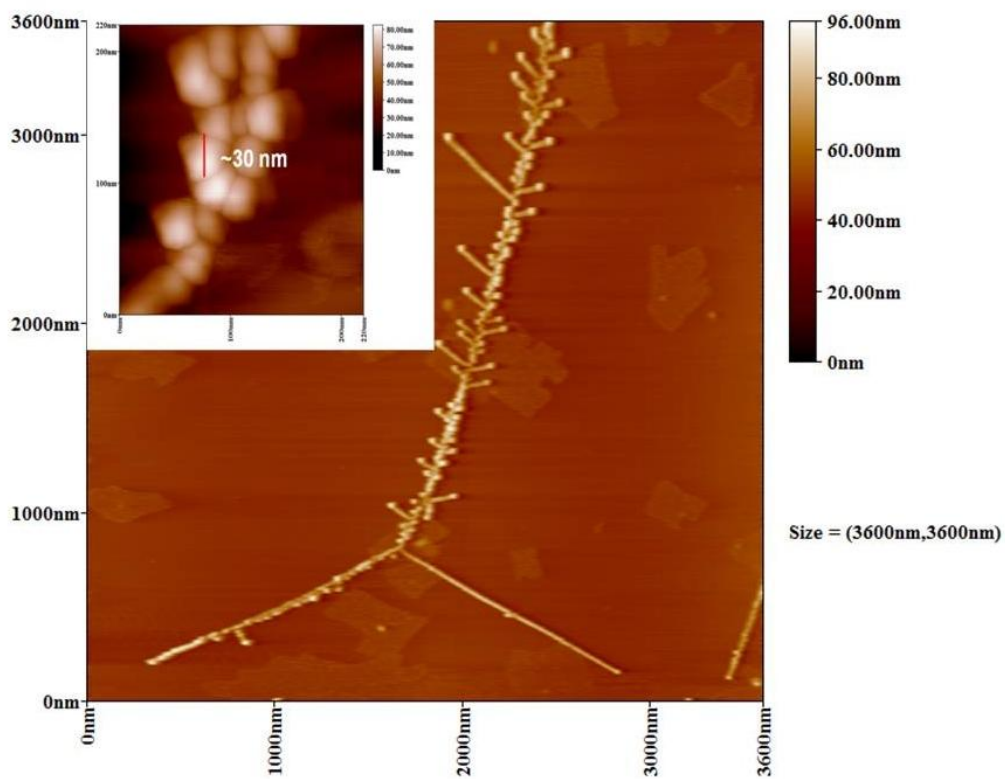


图 6 分散在云母片上的伸展开来的 DNA 样品的原子力显微镜（CSPM5500）扫描图像  
（内插图为选定区域的原子力显微镜扫描图像）

## 5 结束语

原子力显微镜几乎可以对所有的物体进行研究,其具有原子级高分辨率,可以观察单个原子层的局部表面结构,因而可直接观察到表面缺陷,表面重构、表面吸附体的形态和位置等,可实时得到实空间中样品表面的三维图像,这种可实时观察的性能可用于表面扩散等动态过程的研究。近年来,随着科学技术的不断改进和发展,许多新型原子力显微镜工作模式不断涌现,与其他技术(如拉曼光谱等光学技术)联用,将会进一步拓展在各学科的应用,AFM 的功能以及应用范围也将不断的扩大和深入,必将推动科学技术的巨大进步。在大学物理实验教学中,先后面向本科生开设扫描隧道显微镜实验和原子力显微镜实验,在把近代物理实验技术引进实验教学课堂的同时,使用现代化的实验教学方法优化实验教学模式,加以拓宽学生的知识层面,使学生在课堂上所学的理论知识和实验中观察的现象有机结合在一起,从而激发学生对研究性实验学习的兴趣,提高了对理论知识探究的积极性,为学生发挥创造性思维奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] 严隽珏。扫描隧道显微镜[J]。物理实验, 1989, 9 (4): 177-179。
- [2] 彭昌盛, 宋少先, 谷庆宝。扫描探针显微技术理论与应用[M]。北京: 化学工业出版社, 2007。
- [3] 冉诗勇, 王艳伟, 杨光参。原子力显微镜扫描成像 DNA 分子[J]。物理实验, 2011, 31 (11): 1-4。
- [4] 白春礼。扫描隧道显微术及其应用[M]。上海: 上海科技出版社, 1992。
- [5] 白春礼, 田芳, 罗克。扫描力显微镜[M]。北京: 科学出版社, 2000。
- [6] 杨旭刚, 杨潇。原子力显微术及其应用[M]。北京: 化学工业出版社, 2012。
- [7] 蔡德斌, 刘方新, 谢宁, 等。STM 教学实验样品的拓展[J]。物理实验, 2007, 27 (6): 11-13。
- [8] 熊正焯, 丘翠环, 张鸿, 等。用扫描隧道显微镜 (STM) 观察纳米粉体的形貌[J]。物理实验, 1999, 20 (6): 3-5。
- [9] 冉诗勇, 王艳伟, 杨光参。DNA 分子力学性质的测量[J]。物理实验, 2011, 31 (7): 1-4。
- [10] 白春礼。原子力显微镜的研制和应用[J]。中国科学院院刊, 1990, 4: 340-343。
- [11] 马孜, 吕百达, 肖琦, 等。光学薄膜表面形貌的原子力显微镜观察[J]。电子显微学报, 2000, 19 (5): 704-708。
- [12] 王中平, 张权, 朱玲, 等。CCD 成像辅助激光散斑实验[J]。物理实验, 2010, 30 (10): 11-14。
- [13] 王琦, 周肇伟。扫描隧道效应显微镜的发展[J]。物理实验, 1988, 8 (8): 136-138。
- [14] 王中平, 张权, 朱玲, 等。激光散斑照相法测量压电陶瓷管的电压响应位移特性[J]。物理实验, 2013, 33 (3): 39-42。
- [15] 谷坤明, 汤皎宁, 李冀, 等。扫描探针显微镜应用于材料纳米摩擦学研究的若干技术问题[J]。物理实验, 2007, 27 (2): 11-15。
- [16] 林璋, 王琛, 冯喜增, 白春礼。亚精胺诱导 DNA 凝聚的有序性的 AFM 研究[J]。电子显微学报, 1999, 18 (1): 106-110。

## The Experimental Teaching Study Aimed at Different kinds of Samples by Atom Force Microscopy

WANG Zhong-ping, XIE Ning, HU Yong, ZHANG Zeng-ming, SUN La-zhen  
(Physics Experiment Teaching Center, School of Physical Sciences, University of Science and  
Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The students in different groups perform the experiments of atom force microscopy using different kinds of samples including metal or metal oxide optical thin film samples deposited on silicon substrate by magnetron sputtering, the reference materials sample dispersed on surface of silicon substrate, DNA or biological samples dispersion on mica surface etc at the same time. The different groups obtain different types of sample image by atom force microscopy with at room temperature by tapping mode or contact mode, and then they compare the experimental results and discuss each other, further study and master the characterization of atomic force microscopy. The experiment combines the technology of modern sample preparation, standardization of knowledge as well as the biological sample preparation methods and the characterization of modern testing means, its content is arranged reasonably, advanced, suitable for development of cognitive field of students, research experiment teaching for undergraduates.

**Key words:** Atom force microscopy; Reference material; Metal thin film; DNA

# 利用有限元法模拟 MIM 波导的光传输特性

陈宗强, 刘丽军, 陈 靖, 孙 骞  
(南开大学 物理科学学院实验中心, 天津 300071)

**摘 要:** 利用有限元法模拟金属-绝缘体-金属(MIM)波导的光传输性质, 研究了 MIM 波导中加入矩形谐振腔后的不同表面等离子基元模式间的干涉特性。结果表明: 通过在 MIM 波导中引入矩形腔可以调控透射光的波型, 实现纳米尺度上的高度灵敏光学折射率传感器。

**关键词:** 表面等离子基元; 有限元法; 传感器

## 1 引言

纳米光子学通常是指研究结构在亚微米尺度(特别在小于 100nm 尺度)下, 光子与物质或者器件相互作用的科学。表面等离子激元(Surface plasmon polaritons, SPPs)是在介电常数符号相反的两种介质面(通常用金属与绝缘体)上存在的一种电磁表面波的模式, 可以打破衍射极限的限制。在适当的金属与介质组成的光波导结构中, 光可以被束缚在亚波长的尺度之下。因此, 利用金属与介电界面上的表面等离子基元可以制作高度集成的纳米器件。目前, 对表面等离子激元的研究已经被称为表面等离子体学(Plasmonics), 是当前纳米光子学的主要分支之一。金属-绝缘体-金属(metal-insulator-metal, MIM)结构是一种典型的表面等离子激元波导, 利用这种波导结构的特性, 人们已经在理论或实验中设计了多种表面等离子激元光学器件<sup>[1]</sup>。

我们知道, 真空中光的速度为  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ , 远远高于自由电子的速率, 所以用光子进行通讯, 可以极大地提高通信的效率。为了满足人们日益增长的对信息处理的需求, 集成光路替代现有的集成电路是一种可行的办法。这需要人们可以像控制电子一样操控光子, 并在微小尺度下制作出各种性能的光学器件, 以实现微型化高密度的集成光路, 随着科技的进步, 以前纳米技术领域中只能进行理论研究的光子学的一些原理与器件, 现在可以进行设计与制作。随着计算机的广泛应用以及计算功能的强大, 人们可以在这些设备制造之前, 将这些纳米光子学器件进行精确的设计。

基于变分原理的有限元法是研究纳米光子学的强大工具, 在目前的大学物理试验中, 并没有关于设置 MIM 波导中光传输的相关实验。在当今的科技前沿里, 纳米光子学是热点之一, 我们的想法是将本单位的科研成果转化成以研究性为目的实验教学。将大学物理实验与科技前沿相结合, 有利于培养学生的创新能力, 开阔学生的视野, 锻炼学生的科研技能等综合素质。

## 2 基本原理

如图 1(a), MIM 波导是结构的三层平板光波导<sup>[2,3]</sup>。在这种波导中, 表面等离子激元的光场能很好地束缚在介质层里, 从而打破衍射极限。在一定波长下, 当介质层厚度大于表面等离子基元基模所支持的最小厚度时, 会产生高阶模式, 波导对光的束缚能力变差; 当介质层比较薄(仅支持表面等离子激元的基模)时, 波导对光的束缚能力可达到深亚波长的尺寸, 光

**基金资助:** 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)(No. 20110031120005); 国家基础科学人才培养基金(No. J1103208, No. J1210027)

**作者简介:** 陈宗强(1986-), 男, 山东省平邑县人, 南开大学物理科学学院教师, 博士, 研究方向为: 纳米光子学。

斑比较小。如在波长为 1550nm，波导宽度为 50nm，传输距离约在百微米量级，而光斑尺寸小于 100nm。这种波导只支持表面等离激元的横磁波（TM）模式，基模的磁场分量如图 1（b）所示。这种波导结构已经满足微纳光子集成的需要，并且由于其弯曲损耗也比较小，被广泛的应用于纳米光子学器件的研究。金属的介电常数可以用 Drude 模型描述：

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}. \quad (1)$$

其中， $\omega_p$  为金属的等离子体频率，金属的碰撞频率用  $\gamma$  表示，用来表征材料的损耗， $\varepsilon_{\infty}$  描述电子带间跃迁引起的介电常数。常用的贵金属采用的银，银的各个参数分别为  $\varepsilon_{\infty}=3.7$ ， $\omega_p=9.1\text{eV}$ ， $\gamma=18\text{MeV}^{[4]}$ 。

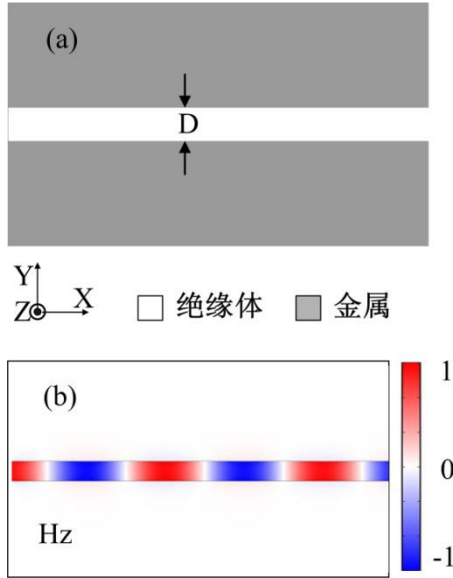


图 1 (a) MIM 波导结构示意图，(b) MIM 波导中支持基模的磁场 Hz 分量

共振现象是经典力学与量子力学的一个普遍特征。在光与物质的相互作用中，有一类共振对频率的依赖性可以用 Lorentzian 公式来表示：

$$T(\omega) \propto \frac{\gamma^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \gamma^2}. \quad (2)$$

式中  $\gamma$  表示共振的宽度， $\omega_0$  表示共振的位置。由于这种共振只是强度之和的简单叠加，因此它的谱线是对称的。最早观察到非对称线型的现象要追溯到 1902 年发现的 Wood 异常<sup>[5]</sup>。1935 年 Beutler 在 Rydberg 的原子谱线中也发现了非对称的线型<sup>[6]</sup>。后来，Fano 基于量子干涉理论提出了著名的 Beutler-Fano 公式，从理论上完美的解释了这一现象。Fano 指出从基态自离子化到分立态的跃迁模式与从基态到连续态的跃迁模式发生的干涉，导致了这种非对称的线型<sup>[7,8]</sup>。关于 Fano 共振的微观机制，通常解释为孤立态与连续态之间发生的干涉与耦合，由此引发的相消或者相长。与公式（2）相比，Fano 共振对频率的依赖性可以表示为<sup>[8]</sup>：

$$T(\omega) \propto \frac{(F\gamma + \omega - \omega_0)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \gamma^2}. \quad (3)$$

其中， $F$  是所谓的 Fano 系数，用来衡量谱线的非对称度。产生的机制是由在孤立态的共振位置两侧的相位是相反的，所以当孤立态与连续态（或者宽谱）发生耦合与干涉的时候，会

产生相干相长与相干相消，从而产生不对称的陡峭线型。

在现代光信息处理的领域，特别是纳米光子学器件与集成光路的研究中，理论分析和数值模拟是加快设计过程与降低开发成本的一个有效的手段。分析计算求解实际物理环境中的麦克斯韦方程组边值问题，通常只有一些经典的问题有解析解。由于实际环境的复杂性，往往需要数值解来研究在实际环境下的电磁波的特性。随着计算机技术的迅速发展，有限元法 (Finite Element method, FEM) 是数值计算中一中很重要的方法，近年来被越来越多的研究人员所利用。其核心思想是，以变分原理为基础，把实际中需要求解的电磁场的 Maxwell 方程组微分方程转化为相应的变分问题，即泛函求极值问题。需要把要分析的区域划分为许多三角形(每个三角形成为一个基元)，每个基元内的场用多项式来表达，然后加入不同基元间场的连续条件，就可得到整个横截面的场分布。

有限元法的计算步骤主要分为以下：

- 1) 确定实际问题所定义的区域、激励和边界条件，根据具体情况决定问题的描述方程。
- 2) 对整个区域离散化，即将区域用节点和有限元（二维中通常为三角形或者矩形单元，三维中通常为四面体或者长方体）表示。
- 3) 对于有限元依次进行局部处理，即根据特殊的函数求得某个有限元局部激励矩阵和局部系数矩阵。
- 4) 将某个单元的局部激励矩阵和局部系数矩阵的各个元素相加，代入到整体激励矩阵和整体系数矩阵中，从而形成求解节点势函数数值的矩阵方程。
- 5) 对如此形成的矩阵方程用线性代数方法加以求解，便能得到各个节点的势函数值。
- 6) 利用有限元法的势函数分布进行后处理。

有限元计算是一个比较复杂与费时的过程，本实验用到的是有限元的商用软件 COMSOL Multiphysics 4.3a 的版本，给研究人员以很大的方便，使得大家从编程和数据图像处理中解放出来，将更多的时间和精力放在改进算法与解决实际问题中去。

### 3 数值模拟计算

利用有限元法研究二维 MIM 波导结构如图 2。波导的宽度为  $D$ ，矩形腔的长度为  $L$ ，高度为  $H$ 。整个结构是上下对称的。介电材料选取的是水，金属选取的是银。入射光从图 2 中左边入射，光从右边出射，为了激发表面等离子基元，入射光选取的是 TM 模式的平面波。

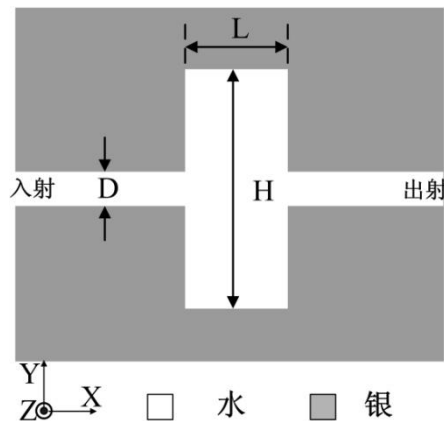


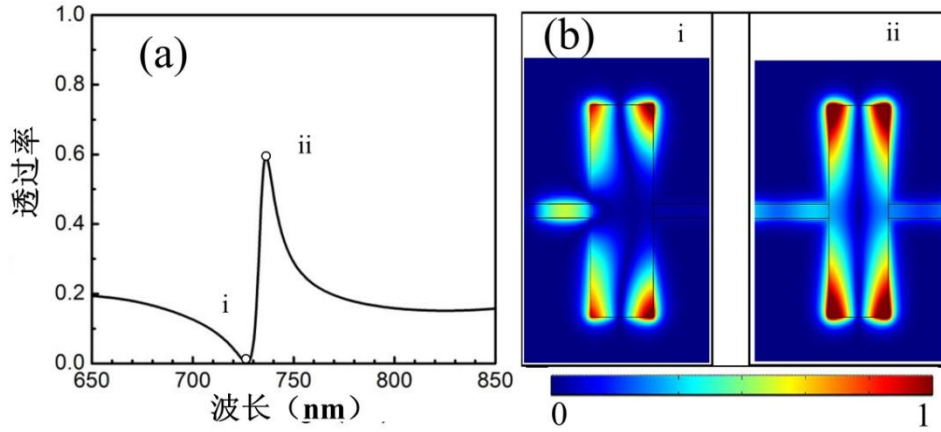
图 2 MIM 波导与矩形腔的耦合结构示意图

图 3 是利用有限元法计算的图 2 对称结构（参数取  $D=50\text{nm}$ ， $L=220\text{nm}$ ， $H=760\text{nm}$ ）的透射谱线。由于 TM 模式的电磁波磁场只有  $z$  方向的分量，我们这里定义透射率  $T$ ：



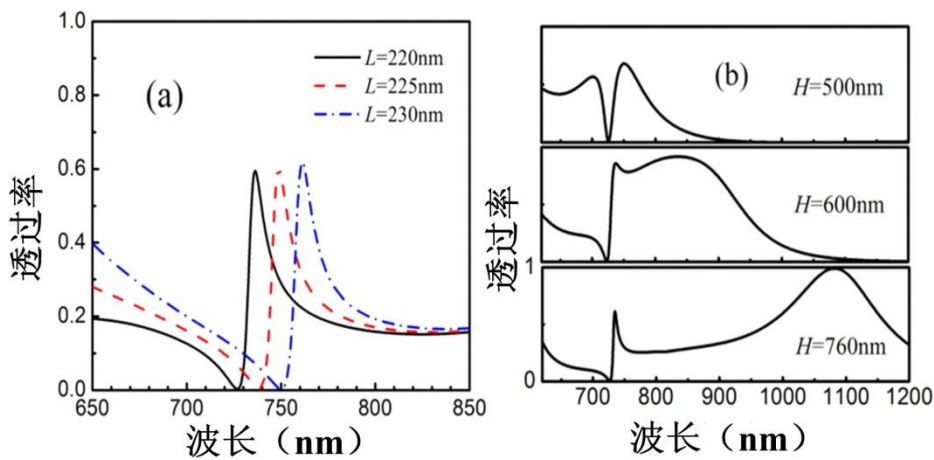
$$T = |\mathbf{H}_{z,out}|^2 / |\mathbf{H}_{z,in}|^2 \quad (4)$$

这里， $|\mathbf{H}_{z,in}|$ 和 $|\mathbf{H}_{z,out}|$ 分别为入射光与出射光的磁场模的强度。这个谱线是个典型的 Fano 共振谱线，包含一个极大值点（ $i=736\text{nm}$ ）与一个极小值点（ $i=727\text{nm}$ ）。其中，最大值点与最小值点的波长差别仅有  $9\text{nm}$ 。图 3（b）展示了 Fano 共振谱线中最大值点与最小值点的磁场模的分布。



(a) Fano 共振的透射谱线；(b) 谱线的透射  $i=727\text{nm}$  以及  $i=736\text{nm}$  处的磁场模的分布  
图 3 Fano 共振的透射谱线与场分布

图 4 给出了金属矩形腔的尺寸的变化对 Fano 共振的透射谱线的影响。图 4（a）代表当  $H$  固定为  $760\text{nm}$ ， $L$  分别为  $220\text{nm}$ ， $225\text{nm}$  以及  $230\text{nm}$  时，Fano 共振峰的变化。这说明，在  $L$  变化较小时，共振峰位置会发生变化，并且峰位的移动是线性变化的。图 4（b）则代表当  $L$  固定为  $760\text{nm}$ ， $H$  分别为  $500\text{nm}$ ， $600\text{nm}$  以及  $760\text{nm}$  时，Fano 共振峰的变化。与仅改变  $L$  不同， $H$  对 Fano 共振的谱线的影响比较大。图中宽谱共振的峰位改变的很大，窄谱共振峰位几乎不变。当宽谱共振的峰位等于窄谱共振峰位时，透射谱线出现了类 EIT 的谷（对应图中  $H=500\text{nm}$ ）；当宽谱共振峰位远离窄谱共振峰位时，透射谱线出现了一个陡峭的下降（对应图中  $H=600\text{nm}$ ）；当宽谱共振峰位进一步远离窄谱共振峰位时，透射谱线出现了一个极大值与极小值（对应图中  $H=760\text{nm}$ ）。出现不同谱线的物理机制是宽谱共振模式与窄谱共振模式的干涉与耦合，出现类 EIT 的谷的原因归因于法珀腔谐振子<sup>[9]</sup>。



(a) 固定  $H=760\text{nm}$  下， $L$  的影响；(b) 固定  $L=760\text{nm}$  下， $H$  的影响  
图 4 矩形腔的尺寸对 Fano 共振的透射谱线的影响

我们利用了 MIM 波导与金属矩形谐振腔直接耦合激发的方式，在矩形谐振腔中激发出宽谱共振模式与窄谱共振模式，通过这两种模式的干涉与耦合，实现了 Fano 共振。通常把能收集、测量并传递信息的器件称为传感器。由于这种结构的共振谱线对其填充介质有敏感的依赖关系，并且由于 Fano 共振独特的陡峭线型，下面我们研究这种结构在折射率传感器上的应用。纳米传感器对折射率的灵敏度(sensitivity)，这里我们表示为  $S_\lambda$ 。纳米传感器的灵敏度的单位是 nm/RIU，它表示每改变 1 个单位的折射率共振峰位改变的大小。图 5 (a) 表示的是矩形腔中填充改变介质 0.01 折射率单位的频谱响应，图 5 (b) 的斜率代表灵敏度，它是线性变化的。我们所提出的纳米传感器灵敏度约为 530nm/RIU。

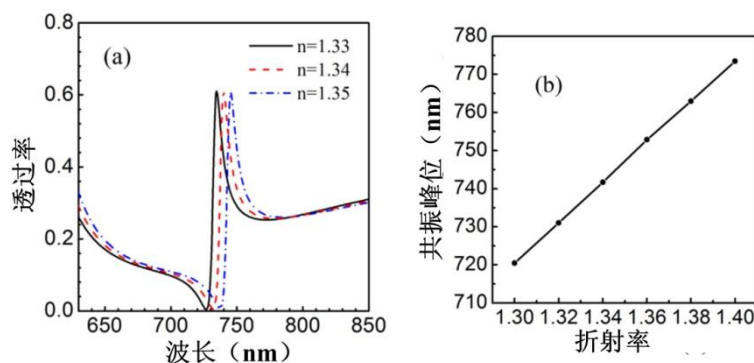


图 5 (a) 矩形腔中填充不同折射率的介质的频谱响应; (b) 共振峰位与折射率变化的线性关系

#### 4 结束语

本实验利用有限元法模拟 MIM 波导的光传输性质，研究了 MIM 波导中引入矩形谐振腔后的不同表面等离基元模式间的干涉特性。结果表明：通过在 MIM 波导中引入矩形腔，可以实现窄带共振模式与宽带共振模式的耦合与干涉，从而实现 Fano 共振来调控透射光的波型；通过 Fano 共振的陡峭线型可以实现纳米尺度上的高度灵敏光学折射率传感器，传感器的灵敏度为 530nm/RIU。学生通过该实验的学习，可以深刻理解 Fano 共振干涉峰的特点，并利用 Fano 共振的原理来设计光学折射率传感器。这有利于培养学生研究纳米尺度下光学微结构方法，有利于培养学生分析问题解决问题的能力，有利于培养学生创新能力以及科学思维。

#### 参考文献:

- [1] Zalevsky Z, Abdulhalim I. Integrated Nanophotonic Devices [M]. UK: Elsevier, 2010:175-233.
- [2] Kurokawa Y, Miyazaki H T. Metal-insulator-metal plasmon nanocavities: Analysis of optical properties [J]. Phys Rev B, 2007, 75(3): 035411-1-13.
- [3] Verhagen E, Dionne J A, Kuipers L, et al. Near-field visualization of strongly confined surface plasmon polaritons in metal-insulator-metal waveguides [J]. Nano Lett, 2008, 8(9): 2925-2929.
- [4] Zhanghua H, Forsberg E, Sailing H. Surface Plasmon Bragg Gratings Formed in Metal-Insulator-Metal Waveguides [J]. IEEE Photonics Tech L, 2007, 19(2): 91-93.
- [5] Wood R W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum [J]. Phil Mag, 1902, 4(396): 696-402.
- [6] Beutler H. Über Absorptionsserien von Argon, Krypton und Xenon zu Termen zwischen den beiden Ionisierungsgrenzen  $^2P_3^{20}$  und  $^2P_1^{20}$  [J]. Z Physik, 1935, 93(3-4): 177-196.
- [7] Fano U. Sullo spettro di assorbimento dei gas nobili presso il limite dello spettro d'arco [J]. Nuovo Cim, 1935, 12(3): 154-161

- [8] Fano U. Effects of Configuration Interaction on Intensities and Phase Shifts [J]. Phys Rev, 1961, 124(6): 1866-1878.
- [9] Chen Z, Qi J, Chen J, et al. Fano resonance based on multimode interference in metal-insulator-metal waveguide and its application to plasmonic nanosensor [J]. Chin. Phy. Lett., 2013, 30(5): 057301-1-3.

## Simulation on interference characteristic of metal-insulator-metal structure by finite element method

CHEN Zong-qiang, LIU Li-jun, CHEN Jing, SUN Qian  
(School of Physics, Nankai University, Tianjin 310071, China)

**Abstract:** The interference characteristic of metal-insulator-metal (MIM) structure and the rectangular resonant cavity is simulated by using finite element method. The results show that the line-shape of output light can be modulated in the structure of introduction of a rectangular cavity embedded in MIM waveguide. The highly sensitive optical refractive index sensor can be realized in nano-scale.

**Key words:** Surface plasmon polaritons; finite element method; Sensor

# 钠原子光谱漫线系的研究

李 斯, 毕 超, 戴继福, 冯 洁, 杨卫平

(云南师范大学 a. 物理与电子信息学院 b. 国家物理实验教学示范中心, 云南 昆明 650500)

**摘 要:** 本文在对钠原子光谱漫线系进行精确测量的基础上, 较为全面地研究了该线系的一些特点, 如波数、波数差、固定项、量子缺和该线系双重结构不同成分的强度比等, 特别地, 在计算固定项和量子缺时运用 Excel 软件, 使繁杂的求解过程得到简化。通过对钠原子光谱漫线系的研究, 既有利于加深我们对该线系的认识和理解, 又有助于采用相同的方法来学习和研究其他线系。

**关键词:** 钠原子; 光谱; 漫线系

## 1 引言

光谱学研究已经有两百多年的历史, 钠原子光谱则是物理教学中的重要内容之一, 作为近代物理实验中一个相当重要的实验, 详细分析该实验对学生认识和理解谱线特点, 特别是训练学生进行光谱研究都有重要意义。目前, 大部分研究是针对钠原子光谱的精细结构<sup>[1]</sup>, 少有单独就某一具体线系进行研究。本文通过实验, 在对钠原子光谱进行精确测量的基础上, 选取了谱线中的漫线系并对其特点进行较为全面的研究。

## 2 实验原理

### 2.1 理论分析

#### 2.1.1 原子光谱的线系

对于钠原子, 我们可以用有效量子数  $n^*$  来统一描述原子实极化和轨道贯穿的总效果。若不考虑电子自旋和轨道运动的相互作用引起的能级分裂, 可把光谱项表示为

$$T_{nl} = \frac{R}{n^{*2}} = \frac{R}{(n - \Delta_l)^2} \quad (1)$$

上式的  $\Delta_l$  称为量子缺; 理论计算和实验观测都表明, 当  $n$  不很大时, 量子缺的大小主要取决于  $l$ , 而与  $n$  的关系很小, 在本实验中近似认为它是一个与  $n$  无关的量<sup>[2]</sup>。

由上能级跃迁到下能级时, 发射线的波数可表示为

$$\tilde{\nu} = \frac{R}{n_1^{*2}} - \frac{R}{n_2^{*2}} = \frac{R}{(m - \Delta_{l'})^2} - \frac{R}{(n - \Delta_l)^2} \quad (2)$$

式中  $n_2^*$  与  $n_1^*$  分别为上、下能级的有效量子数,  $n$ 、 $\Delta_l$  与  $m$ 、 $\Delta_{l'}$  分别为上下能级的主量子数与量子缺,  $l$  和  $l'$  分别为上、下能级所属轨道量子数。

**基金项目:** 2013 年地方高校国家级大学生创新创业训练计划项目 (201310681004, 201210681005) 资助课题

**作者简介:** 李 斯 (1991-), 男, 本科生, 云南大理人, 主要从事物理实验方面研究。

**通信作者:** 杨卫平 (1958-), 男, 博士, 教授, 云南昆明人, 主要从事多光谱成像技术应用、颜色科学与工程方面的研究。

在式（2）中  $m, l'$  是不变的，第一项称为固定项，以  $A_{ml'}$  表示；第二项称为可变项，因此式（2）可写成

$$\tilde{\nu} = A_{ml'} - \frac{R}{(n - \Delta_l)^2} \quad (3)$$

若令  $m, l'$  固定，而  $n$  依次改变（ $l$  的选择定则为  $l' - l = \pm 1$ ），则可得到一系列的  $\tilde{\nu}$  值，从而构成一个光谱线系。在光谱学中通常用  $ml' - nl$  这种符号表示线系，当  $l = 0, 1, 2, 3 \dots$  时，分别以  $S, P, D, F \dots$  表示。因此，钠原子光谱漫线系表示为  $3P - nD (n = 3, 4, 5 \dots)$ 。

### 2.1.2 钠原子光谱漫线系精细结构的相对强度比

在实验室中，我们通常使用电等光源拍摄原子光谱，因此在这种情况下谱线的强度就只考虑自发辐射跃迁。钠原子从上能级  $m$  自发跃迁至下能级  $n$  的辐射光谱强度为：

$$I_{mn} = N_m A_{mn} h\nu_{mn} \quad (4)$$

式中  $N_m$  为处于上能级的原子数目， $h\nu_{mn}$  为上、下能级的能量差， $A_{mn}$  为单位时间内原子从上能级  $m$  自发跃迁到下能级  $n$  的跃迁几率。

漫线系光谱是在  $3^2P_{3/2,1/2} - n^2D_{5/2,3/2}$  之间跃迁辐射所形成的光谱，它的上下能级都是双重线结构，如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

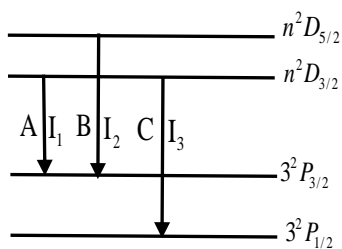


图 1 漫线系能级跃迁图

设图 1 中的三个谱线分别为 A、B、C，为了便于讨论，将漫线系跃迁图分解为图 2(a)、(b)。图 2(a)是将 A、B 谱线合为  $nD$  跃迁到  $3^2P_{3/2}$  的一条谱线，C 为  $nD$  跃迁到  $3^2P_{1/2}$  的谱线。这两条谱线为双重能级跃迁到单层能级，类似于主线系的跃迁模型。跃迁到同一能级的所有谱线的强度和正比于该能级的统计权重  $g$ ，即为电弧或辉光放

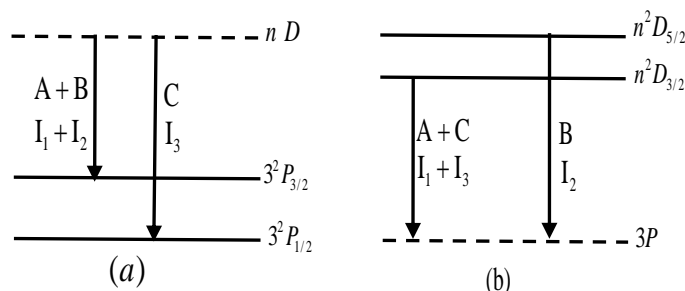


图 2 漫线系能级跃迁图分解图

$$\frac{I_A+I_B}{I_C} \approx \frac{N_{j_1}}{N_{j_2}} \approx \frac{g_{j_1}}{g_{j_2}} = \frac{2 \times j_1 + 1}{2 \times j_2 + 1} = \frac{2 \times 3/2 + 1}{2 \times 1/2 + 1} = 2:1 \quad (5)$$

图 2(b)则是将 A、C 谱线视为  $n^2D_{3/2}$  能级跃迁到  $3P$  能级所辐射的一条光谱线, B 谱线为  $n^2D_{5/2}$  能级跃迁到  $3P$  能级所辐射的谱线。这个跃迁过程与锐线系的跃迁过程相似, 均为单层能级跃迁到双重能级过程, 可得

$$\frac{I_A+I_C}{I_B} = \frac{A_{j_1}}{A_{j_2}} = \frac{g_{j_1}}{g_{j_2}} = \frac{2 \times j_1 + 1}{2 \times j_2 + 1} = \frac{2 \times 3/2 + 1}{2 \times 5/2 + 1} = 2:3 \quad (6)$$

上式(5)(6)联立得:

$$I_A : I_B : I_C = 1:9:5 \quad (7)$$

但由于  $\lambda_A$  和  $\lambda_B$  相距很近, 通常无法分开, 两个成分合二为一, 其波长用  $\lambda_{AB}$  表示, 这个成分比  $\lambda_C$  的波长要长, 这时有:

$$\frac{I_C}{I_{AB}} = \frac{5}{1+9} = \frac{5}{10} = 1:2 \quad (8)$$

即漫线系双重短波成分与长波成分的强度比是 1:2。

## 2.2 数据处理

根据实验测得的漫线系的波长, 分别计算出它们的平均波长、波数, 这些波数可表示如下:

$$\tilde{\nu} = \frac{R}{(m - \Delta_{P'})^2} - \frac{R}{(n - \Delta_I)^2} \quad (9)$$

将(9)变形为:

$$\frac{R}{(m - \Delta_{P'})^2} = \tilde{\nu} + \frac{R}{(n - \Delta_I)^2} \quad (10)$$

上式中左边为固定项, 右边为可变项  $A_{m'}$ 。

对于漫线系(3P—nD)而言,  $n=4,5$ , 有:

$$\tilde{\nu}_4 + \frac{R}{(4 - \Delta_D)^2} = \tilde{\nu}_5 + \frac{R}{(5 - \Delta_D)^2} \quad (11)$$

式(11)等于固定项  $A_{3P}$ , 要求出式(11)的  $\Delta_D$ , 使等式两边的值之差的绝对值最小(或满足一定要求), 利用 Excel 的“单变量求解”功能, 可轻松解决此问题<sup>[4]</sup>。

## 3 实验仪器和内容

WGD-8/8A 型多功能光栅光谱仪、汞灯、钠灯及电源, 本实验使用的 WGD-8A 型多功能

光栅光谱仪,属于反射式光栅光谱仪,光路见图3。

本实验用 WGD-8A 型光栅光谱仪,钠灯,汞灯,计算机以及光电倍增管软件记录钠原子光谱。实验系统框图如图4所示。将汞灯放置在 WGD-8A 光栅光谱仪入口狭缝前,使发出的光直接进入狭缝,狭缝宽度 $\leq 0.30mm$ ,调节高压在 300-900V 之间,软件增益在 2-6 之间,采集次数在 1-50 之间,点击“单程”进行整体采集汞原子光谱,正常情况下,在 570nm-585nm 会出现双峰,以左边缘作为起始波长,右边缘作为终止波长,点击“单程”,实现从起始波长到终止波长的扫描。扫描结束后,读出汞的相邻两个峰值,已经理论值分别为 576.96nm 和 579.07nm,根据测得的数值与标准值比较,对差值进行校正,至此完成了校正。校正结束后,接下来进行测量钠原子漫线系的波长,首先要将汞灯换为钠灯,波长的扫描间隔设置为 0.01nm,将钠灯放在 WGD-8A 光栅光谱仪入口狭缝前,狭缝宽度 $\leq 0.30mm$ ,高压调节在 300V-1000V 之间。要测量漫线系的峰位,根据“波长参考表”来进行设置起始波长和终止波长。在调节的过程中,如果得到的波长效果不佳,要适当的调节高压,狭缝,增益,采集次数,以适应不同强度的峰。

WGD-8A 光栅光谱仪是采用平面反射光栅作为分光原件,具有光电倍增管和 CCD 两种接受原件,通过光电转换将数据送至单片机进行预处理后,再将数据传递给计算机通过软件分析,最终绘出光谱分析所需曲线。

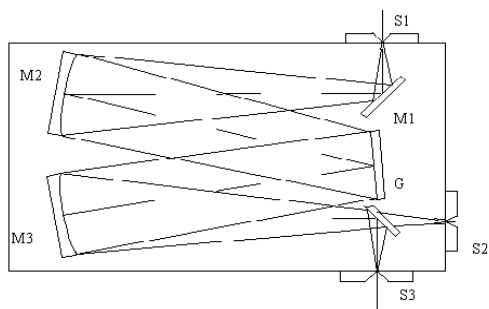


图3 光学原理图<sup>[5]</sup>

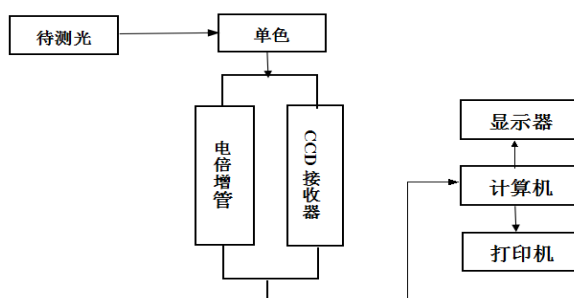


图4 系统框图

#### 4 数据处理与结果分析

传统的数据处理的方法是借助于计算器、里德伯表,计算平均波长、波数、波数差、量子数和光谱项等,具体操作如下所示。

我们将测得的平均波长值换算成波数,在每一个线系中,相邻两条谱线的波数差为

$$\tilde{\nu} = \frac{R}{(m-\Delta_r)^2} - \frac{R}{(n-\Delta_l)^2} = \frac{R}{(n-\Delta_l)^2} - \frac{R}{(n+1-\Delta_l)^2} \quad (12)$$

为了方便起见,另  $n-\Delta_l=m+a$ ,其中  $m$  为整数,  $a$  为正小数,则上式可以改写为

$$\Delta\tilde{\nu} = \tilde{\nu}_{n+1} - \tilde{\nu}_n = \frac{R}{(m+a)^2} - \frac{R}{(m+1+a)^2} \quad (13)$$

$\Delta\tilde{\nu}$  既已求出( $R=109737.31\text{ cm}^{-1}$ ),则,根据上式即可算出  $(m+a)$ 。为了方便起见,借助里德伯表直接读出  $m$  和  $a$ 。表中列出了所有各  $m$  和  $a$  对应的的光谱项值  $a$  已经相同而  $m$  相差 1 的两个项值之差  $\Delta\tilde{\nu}$ 。故可由所求的  $\Delta\tilde{\nu}$ ,用内插法求出对应的  $m$  和  $a$ ,然后由  $n-\Delta_l=m+a$  求出量子数亏损  $\Delta_l$ 。

整个数据的处理过程比较繁琐,费时费力。此次我们将通过利用 Excel 软件来处理钠原子光谱的实验数据,具体处理方法如附录中所示。

通过电脑软件,我们可以采集到漫线系的波长,并且计算出对应的平均波长和波数。

表 1 钠原子光谱漫线系实验数据记录表

序号	跃迁能级	波长(nm)	平均波长(nm)	波数( $\text{cm}^{-1}$ )
1	3P-4D	568.12	568.39	17593.55
		568.66		
2	3P-5D	497.87	498.01	20079.92
		498.22		
3	3P-6D	466.88	466.71	21426.58
		466.71		
4	3P-7D	449.40	449.69	22237.54
		449.69		

将测得的平均波长换算为波数后,我们将通过利用 Excel 软件求解出波数差、固定项,并利用其“单变量求解”功能求解出量子缺,求解的结果如表 2 所示。

表 2 利用 Excel 软件处理数据结果记录

序号	跃迁能级	$n$	波数( $\text{cm}^{-1}$ )	波数差( $\text{cm}^{-1}$ )	固定项	量子缺
1	3P-4D	4	17593.55	2486.36	24487.51	0.0102
2	3P-5D	5	20079.92		24487.51	0.0102
3	3P-6D	6	21426.58	810.96	24485.31	0.0102
4	3P-7D	7	22237.54		24483.67	0.0102

在理论上,我们可以利用谱线跃迁的强度和定则来估算出漫线系的相对强度,即漫线系双重线的短波成分和长波成分强度比为 1:2。

在实验中,我们则可以利用该实验的电脑软件,根据谱线图采用积分的方法计算出每个线系下面的面积,求得的相应的面积就是该谱线相应的强度,进而再算出强度比,计算结果如表 3 所示。

通过实验我们可以得知,在误差允许的范围内,漫线系短波成分和长波成分的光谱强度比满足 1:2,与理论值基本相符。



表3 漫线系强度比理论值与实验值数据记录

序号	跃迁能级	短波与长波强度比	
		理论值	实验值
1	3P-4D	0.5	0.4985
2	3P-5D	0.5	0.4953
3	3P-6D	0.5	0.5035
4	3P-7D	0.5	0.4943

## 5 总结

本文基于钠原子光谱实验,对光谱中的漫线系进行较为全面的分析和研究。通过测量漫线系 3P-4D, 3P-5D, 3P-6D, 3P-7D 这四个能级跃迁的波长,从而计算出波数、波数差、固定项、量子缺和双重结构短波成分和长波成分的强度比,在计算的过程中有力地借助了 Excel 软件,特别是在求固定项和量子缺时,使繁杂的计算过程更为简便。最后,对谱线图进行积分计算出每个线系下的面积,在误差允许范围内较为精确地验证了钠原子光谱漫线系双重结构短波成分和长波成分的强度比满足 1:2。在对钠原子光谱进行精确测量的基础上,我们采用 Excel 软件简化计算过程、提高计算精度,这也为今后学习和研究其他线系有一定意义。

### 参考文献:

- [1] 黄创高, 莫其逢, 黄国文, 高英俊。钠原子光谱与精细结构[J]。广西物理, 2007, 1。
- [2] 吴先球, 熊予莹。近代物理实验教程[M]。2 版。北京: 科学出版社, 2009: 41~48。
- [3] 葛芳芳, 朱旭森, 喻平。碱金属原子光谱精细结构的相对强度[J]。重庆师范学院学报: 自然科学报, 2001, 12。
- [4] 郭金水, 曹慧珍。利用 Excel 快捷处理钠原子光谱实验数据[J]。赣南师范学院学报: 自然科学报, 2003, 3。
- [5] 吴先球, 熊予莹。近代物理实验教程[M]。2 版。北京: 科学出版社, 2009: 41~48。

## Research of sodium atomic spectrum diffuse series

LI Si, BI Chao, DAI Ji-fu, ZHENG Yong-gang, FENG Jie, YANG Wei-ping  
(School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University,  
Yunnan 650500, China)

**Abstract:** This paper comprehensively studied the characteristics of the sodium atomic spectrum diffuse series on the basis of accurate measurement of it, such as wave number, wave number difference, fixed items, quantum defect, diffuse series intensity of dual structure of different composition ratio; in particular, calculating the fixed items and quantum defect by use of Excel software, the calculation procedure is greatly simplified. Through the study of the sodium atomic spectrum diffuse series, it help us to deepen our understanding of the diffuse series, it also help us to use the same method to study and research the other series.

**Key words:** sodium atomic; spectrum; spectrum diffuse series

# 软 X 射线光学表面散射检测

陈淑妍, 程 丽, 张 杨, 苏丽萍, 李 昆  
(哈尔滨工程大学 物理实验中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 本文应用自行研制的软 X 射线反射率计, 分别针对不同的反射镜样品, 在不同的工作波段及掠射角的情况下进行软 X 射线波段掠入射光学表面散射的实验研究。经过数据处理后, 从实验的角度分别分析了掠射角、波长和粗糙度几个因素对软 X 射线掠入射表面散射的影响, 给出相应的实验结果。

**关键词:** 软 X 射线, 表面散射, 表面粗糙度, 掠入射光学系统

## 1 引言

光学表面散射一直是光学研究领域一个重要的基本问题, 近年来由于科学技术的迅速发展, 人们对所用仪器性能指标的要求越来越高, 光散射现象越来越受到人们的关注。

所谓光散射就是一束光通过介质时, 其中一部分光偏离主要传播方向的现象。如图 1 所示, 当一束光入射到粗糙表面上, 反射光中除了镜向反射光以外, 还有散射光。散射光主要通过以下几方面降低光学系统性能: 1. 一些散射光根本无法传播到焦平面, 因此减小了到达像面的光通量; 2. 大角度散射会产生杂光, 从而降低了图像对比度或信噪比; 3. 小角度散射会使图像变得模糊, 降低了光学系统的分辨率。

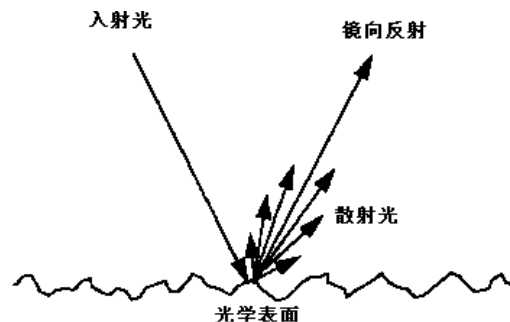


图 1 光学表面入射光的反射示意图

表面缺陷、表面污染可带来光学散射, 另外光子之间的相互作用、自由电子或表面等离子体干扰都会造成散射。然而, 散射光对光学系统性能的影响和它的来源无关<sup>0~0</sup>。

一般来说, 任何一个光学系统中, 偏离主光线方向上的几乎所有其他方向都存在散射光。在大多数的光学应用场合, 光散射是光学系统的非设计因素, 对整体的光学性能起负面影响。同时, 光学散射的分布与反射光和透射光主光线分布一同构成了光波与各种光学元件相互作用后的所有宏观信息分布, 从而为研究光学系统的一些性质提供了客观途径。

长期以来, 各国研究人员在光学散射方面作了很多尝试和工作, 一方面通过合理的设计和加工, 来减少光学散射对光学系统性能的负面影响, 另一方面又利用光学散射来了解光学系统本身的一些性质。这两方面的工作是相辅相成的, 也正是由于这个原因, 长期以来光学散射研究一直受到人们的重视。随着高新技术的发展和推动, 无论是理论上还是实际应用上,

**资助项目:** 哈尔滨工程大学实验教学改革与实验技术研究立项(SYJG20131102)

**作者简介:** 陈淑妍, 女, 吉林省吉林市人, 讲师, 主要研究方向: 短波段望远镜关键技术。

人们对于光学散射的认识和掌握也在不断深化中<sup>0</sup>。

本文采用自行研制的软 X 射线反射率计，分别在不同条件下对两块不同的样品进行了掠入射光学表面散射实验，得到丰富的实验数据，并对这些实验数据进行处理，给出相应的实验结果。

## 2 表面散射的测量实验

### 2.1 实验仪器：软 X 射线反射率计

在光学表面散射的实验中，表面散射对反射镜的影响体现在反射镜的有效面积上。基于现有的设备和实验条件，我们采用软 X 射线反射率计来对掠入射光学表面散射进行测量。

软 X 射线反射率计由激光等离子体光源、掠入射光栅单色仪、样品室、真空系统、光电探测电路及计算机控制软件等几个部分组成，其结构示意图如下图 2 所示。激光等离子体光源产生的软 X 射线经过掠入射光栅单色仪，获得需要的工作波长的单色光；然后经过准直并进入样品室内；样品室内的样品工作台可以实现平动和旋转；准直光经过待测反射镜的反射后，通过转动通道电子倍增器，便可以实现对光散射分布的测量。同时，还有一个监视探测器对光源不稳定性进行监测和校正。

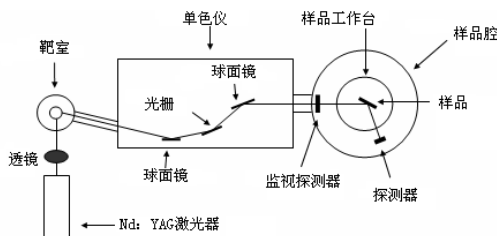


图 2 软 X 射线反射率计结构示意图

### 2.2 样品

本次实验中，根据光学材料和表面形态，选用了两块不同的反射镜样品。两块样品都是平面镜，一块是微晶玻璃材料的，另一块是硅片。一般来说，光学镜面材料应该具有如下几个特点：(1)极好的形状稳定性，使镜面获得并长期保持十分精确的镜面形状。(2)热膨胀系数接近于零，使镜面形状不受环境温度的变化而变化。(3)应该具有一定硬度和强度，以承受加工及运输时的应力。(4)应该可以抛光并在真空室中进行镀膜。微晶玻璃由于具有极低的热膨胀系数、良好的热稳定性、尺寸稳定性及高的机械强度而成为大型光学仪器反射镜的优质材料；而硅片则是一种常用的光学镜面材料。

就软 X 射线光学系统而言，低频面形误差的散射使像核的能量传递到邻近的几格衍射环中，但不使点扩散函数的中心宽度加大，只是降低了弥散斑的中心强度，因此低频面形误差对于掠入射光学表面散射的影响通常可以忽略不计。在进行表面散射实验之前，我们首先采用 WYKO 表面轮廓仪分别针对两块测试样品的表面粗糙度进行了测定，测定的结果如图 3 所示，其中 (a) 为硅反射镜待测样品，(b) 为微晶玻璃反射镜待测样品。从两个图中可以看出，硅待测样品的总体表面粗糙度均方根值为 1.3nm，而微晶玻璃待测样品的总体粗糙度均方根值为 1.5nm。

另外，我们测定了两块样品的表面自相关函数 (ACV)，如图 4 所示，(a) 为硅反射镜待测样品，(b) 为微晶玻璃待测样品。同时，我们也测得了两块样品的功率谱密度函数 (PSD)，如图 5 所示，其中选用的低频截止空间频率为：20.000 (1/m)，高频截止空间频率为：1.000 (1/μm)。

下面我们简单介绍一下光学表面散射的实验过程。

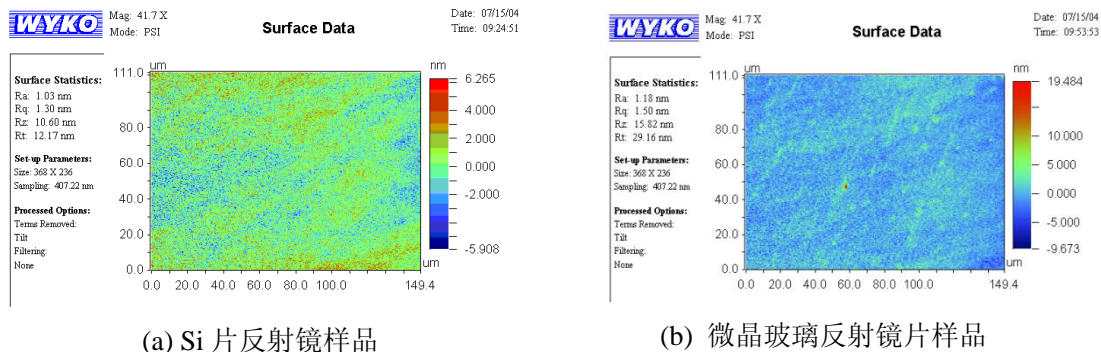


图 3 WYKO 测得的表面微粗糙度

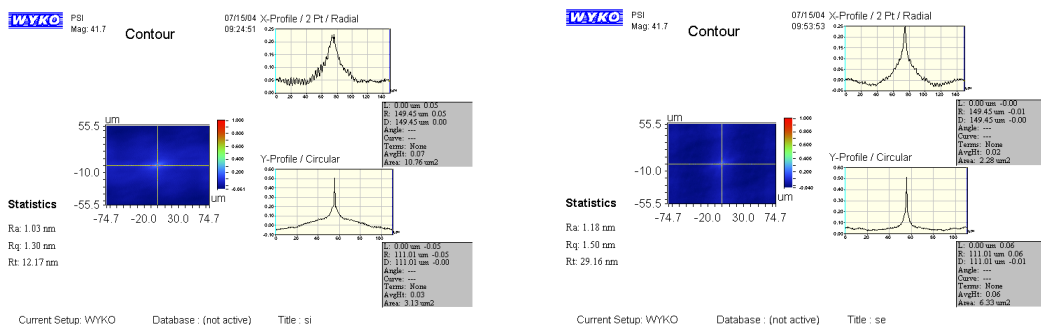


图 4 样品的表面自相关函数（ACV）

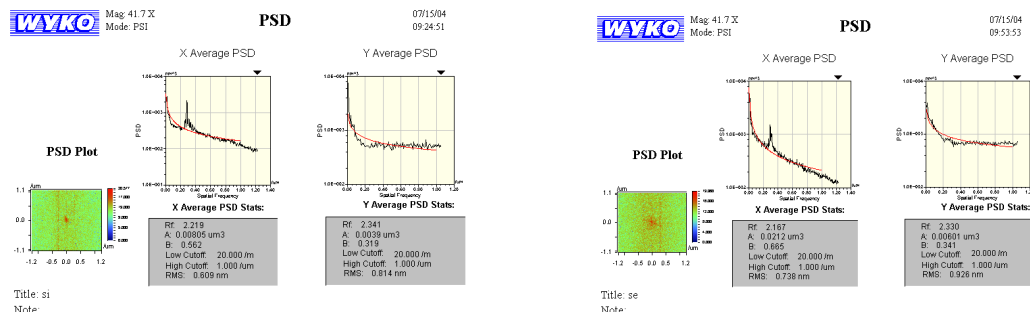


图 5 功率谱密度函数（PSD）

### 2.3 实验过程

在表面散射实验进行之前，首先要将整个软 X 射线反射率计系统调整好，对好光路，同时也要把待测样品的方位调整好；然后开始抽真空，一般抽到  $10^{-3}$  pa 压，高压至少要到 1000v，随后开始进行表面散射实验。

实验时，保持待测样品方位不变，转动探测器扫描入射光束入射到待测样品后散射光的分布，如图 6 所示，主探测器在半圆周上转动的角度  $\eta$  是散射角  $\theta$  和入射角  $\theta_0$ （即掠射角  $\phi$  的余角）的差，其中方向余弦坐标  $\beta$  和  $\beta_0$  分别为：

$$\beta = \sin(\theta), \quad \beta_0 = \sin(\theta_0)$$

因为探测器是具有 1mm 中心孔的通道电子倍增器，为了避免实验中因为数据重叠而带来处理上的麻烦，自制了一个狭缝，放在主探测器前面，狭缝的宽度应在满足光强的条件下根据弥散斑的直径来取。本次实验中取狭缝的宽度为 0.6mm，而探测器所在圆周的半径为 175mm，因此宽度为 0.6mm 的狭缝相当于探测器转动 0.2° 所走的弧长，刚好和试验中探测器转动的步长一致。另外，测量过程中，主探测器转动的角度总是样品转动角度的二倍。

实验中，两个探测器对应两个不同的数据通道，一组是入射光经反射镜掠入射后的光强，另一组是监控探测器的数据，用来校正光源的不稳定性。在测量过程中，首先将待测样品从光路中移开，记录下入射光被监控探测器测量的信号和主探测器测量的信号，并用监测探测器的信号归一化主探测器的信号来消除光源的不稳定性，即二者的比值对于光源来说是稳定的，可以看作是入射光信号；然后，将待测样品移入光路，记录下入射光束被监控探测器测量的信号，及光束上部分被待测样品散射后主探测器测量的信号，同样使用监测探测器的信号来归一化主探测器的信号，即二者的比值可以看作散射光信号。把入射光信号和散射光信号相对比，以此来分析待测样品的表面散射特性。

在实验进行中，首先测量不同波长的表面散射角度分布，即针对同一待测样品，在掠射角不变的情况下，对不同波长的入射光进行表面散射的实验；然后改变掠射角，再继续测量不同波长的表面散射分布；当几个掠射角分别测量完后，关掉系统，更换不同的待测样品，重新抽真空，加高压至少到 1000v，重复前一块待测样品的实验过程。

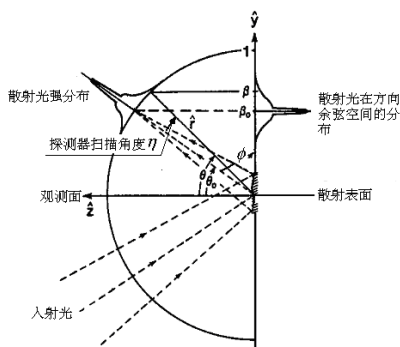
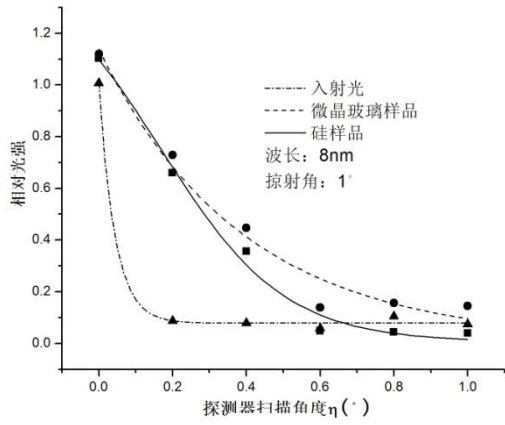


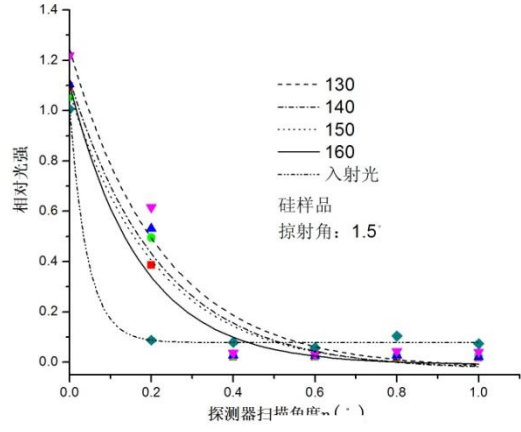
图 6 散射测量的几何结构示意图

### 3 实验数据

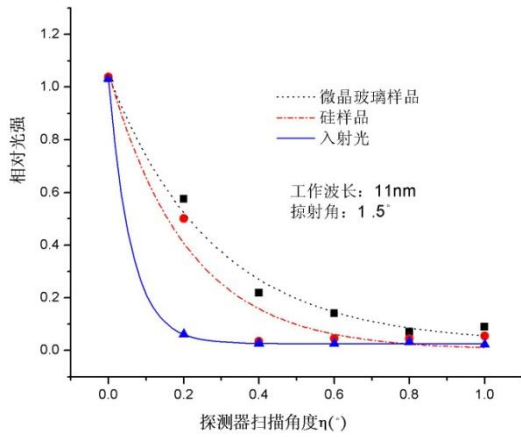
实验测得的数据分别为两组不同通道的数据，通道 1 是主探测器对应的数据通道，通道 2 为监控探测器对应的数据通道，用通道 2 的数据对通道 1 的数据进行归一化后，得到光的相对光强分布。根据测得数据归一化后的相对光强（即最后一列）得到图 7 (a)，其中横座标是探测器的扫描角度  $\eta$ 。根据同样的处理方式得到图 (b) 和图 (c)，分别是波长 11nm、掠射角为 1.5° 和波长 16nm、掠射角为 2° 条件下两块样品的相对光强分布。图 8 分别表示了不同样品在同样波长和掠射角条件下表面散射的相对光强分布；图 9 为相同掠射角和表面形态的条件下，不同波长的表面散射角度分布，图 a 是硅样品在掠射角为 1.5° 条件下，13nm、14nm、15nm、16nm 四个波段的表面散射角度分布及入射光的分布；图 b 和图 c 是微晶玻璃样品在掠射角为 1° 和 2° 条件下，8nm、9nm、10nm、11nm 四个波段和 13nm、14nm、15nm、16nm 四个波段的散射光角度分布。



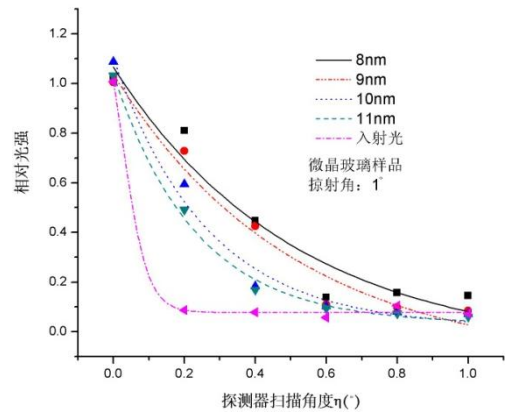
(a)



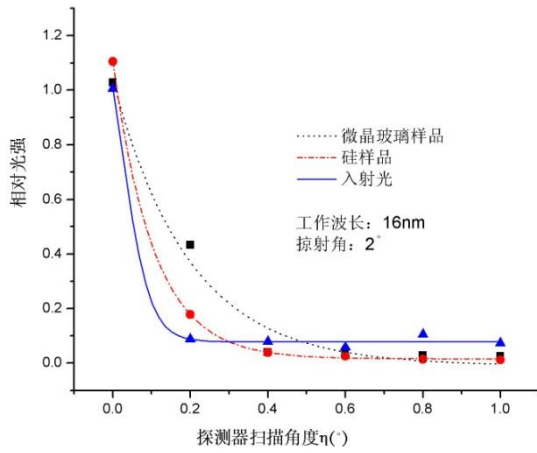
(a)



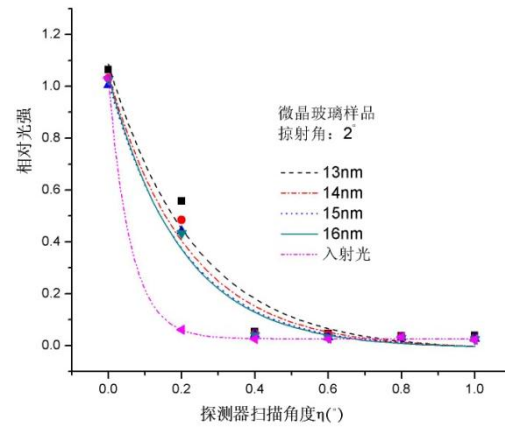
(b)



(b)



(c)



(c)

图 7 不同表面粗糙度的相对光强分布

图 8 不同波长的相对光强

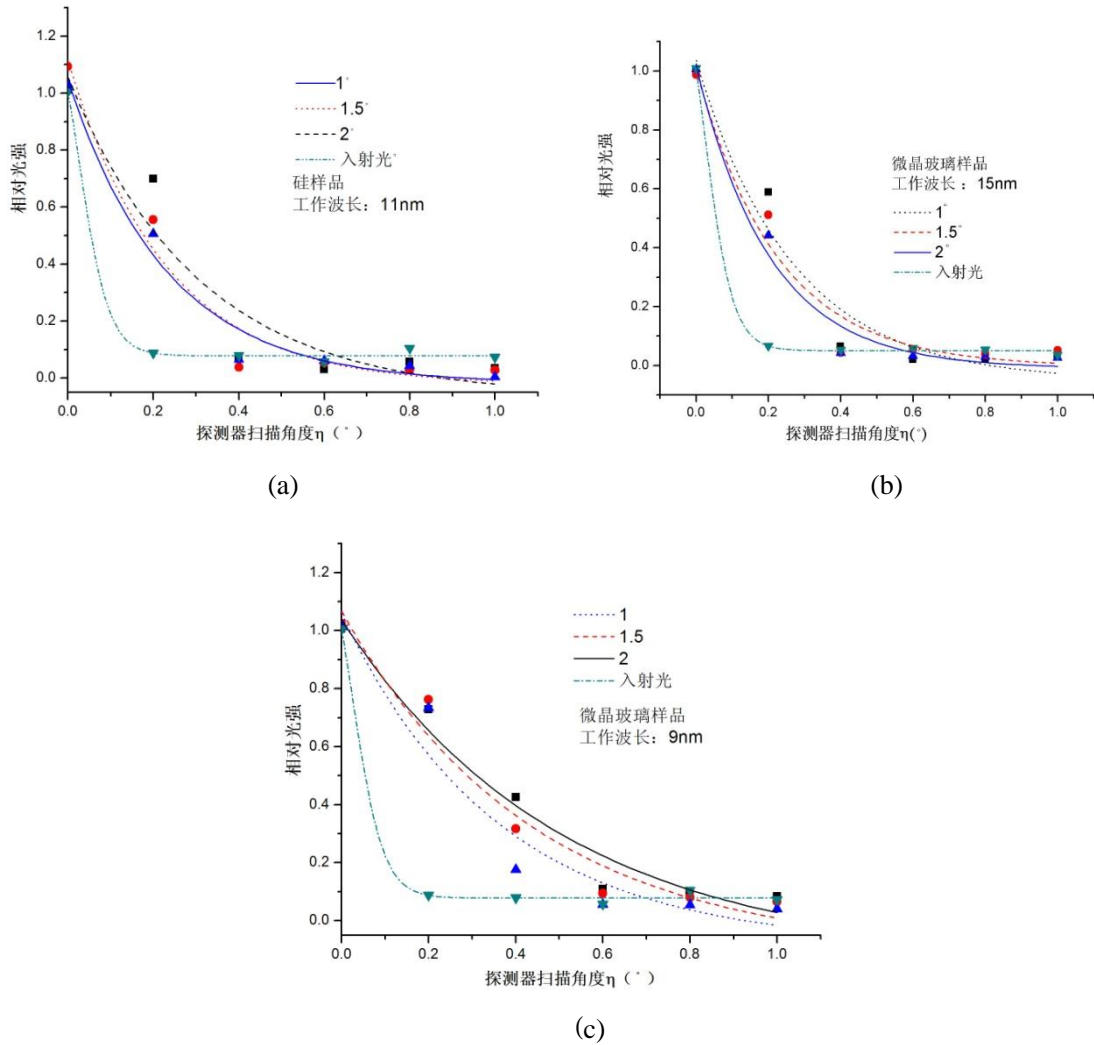


图 9 不同掠射角的相对光强分布

#### 4 实验结论

从图 7 可以看出, 在软 X 射线波段, 随着表面粗糙度的增加, 掠入射光学表面散射越来越严重。这样, 我们从实验的角度充分证明了增加表面粗糙度会加重掠入射光学表面散射程度, 严重影响了掠入射光学成像系统的成像质量。

既然表面粗糙度对表面散射的影响很大, 对于工作波段很短的光学系统来说, 提高光学表面加工工艺水平, 降低表面粗糙度, 以便降低由散射造成的光损失, 来提高光学系统成像质量尤为重要。

从图 8 中可以看出, 对于表面粗糙度  $\sigma$  相同的光学表面, 在掠射角  $\phi$  不变的情况下, 随着掠入射光波长的减小, 光学表面散射呈现越来越严重的趋势, 由表面散射所造成的光损失也越来越大, 严重降低了光学性能。我们可以看出, 当入射光工作波段减小时, 几何像差对光学性能的影响不变, 衍射对光学系统光学性能的影响降低, 而光学表面散射对光学系统光学性能的影响却在增加, 因此对于工作波段很短的光学系统, 特别是软 X 射线或极紫外光学系统, 光学表面散射的研究非常重要。

从图 9 中可以看出, 随着掠射角的增大, 掠入射光学表面散射程度越来越严重, 因此也可以通过减小掠射角来降低由于光学散射所带来的掠入射光学成像系统成像质量的降低。

参考文献:

- [1] 赵择卿, 陆大年, 杨定超。光散射技术[M]。纺织工业出版社, 1987: 1-2。
- [2] J E Harvey. Light-scattering characteristics of optical surfaces, Ph. D. Dissertation, U. Arizona, 1976: 1-4.
- [3] J E Harvey. Modeling the image quality of enhanced reflectance X-Ray multilayers as a surface power spectral density filter function, Applied Optics, 1995, Vol. 34, 3715-3726.
- [4] P. L Thompson, J E Harvey. Systems Engineering Analysis of Aplanatic Wolter Type I X-ray Telescopes, Opt. Eng, 2000, 39: 1677-1691.
- [5] James E. Harvey, Cynthia L. Vernold Andrey Krywonos etc, Diffracted radiance: a fundamental quantity in nonparaxial scalar diffraction theory. Applied Optics, 1999, 38: 6469-6481.
- [6] James E Harvey, Kristin L Lewotsky, Anita Kotha. Effects of surface scatter on the optical performance of x-ray synchrotron beam-line mirrors. Applied Optics, 1995, 34: 3024-3032.

## Soft X-Ray optical surface scattering phenomena

CHEN Shu-yan, CHENG Li, ZHANG Yang, SU Li-ping, LI Kun

(The physics experiment center, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In this paper, Soft X-ray optical scattering distribution is measured by a soft X-ray reflectometer installed by my lab, for different sample mirrors, wavelenth and grazing angle. By dealing with experimental data, surface microroughness, wavelength and grazing angle effects on surface scattering is computered and analyzed, and get corresponding experimental result.

**Key words:** soft X-ray; surface scatter phenomena; surface profiles; grazing incidence imaging systems



# 微波布拉格衍射中立方晶体晶面衍射测量与模型选取 讨论

徐春阳, 陈文婷, 王晓栋, 张志华, 方 恺, 赫 丽  
(同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092)

**摘 要:**在微波布拉格衍射实验中,通过对立方晶体模型晶格常数参数选取,测定(110)面入射角与衍射强度变化关系,来验证衍射极大值在随入射角变化而变化的过程是否满足布拉格定律。同时可在一定入射角变化范围内,限定衍射级数的大小,讨论只改变接收端角度时,(100)面与(110)面衍射极大值时晶格常数所在范围,并从理论上给出同时测定两晶面可限定的衍射级数与晶格常数的范围。

**关键词:**微波; 布拉格衍射; 立方晶体; 晶面

布拉格衍射,又称 X 射线衍射的布拉格形式,最早由威廉 劳伦斯 布拉格及威廉 亨利 布拉格于 1913 年提出,他们早前发现了固体在反射 X 射线后产生的晶体线,而这项定律正好解释了这样一种效应。他们发现,这些晶体在特定的波长及入射角时,反射出来的辐射会形成集中的波峰,称布拉格尖峰。布拉格衍射这个概念同样适用于中子衍射及电子衍射<sup>[1]</sup>。用微波模拟 X 射线,入射到晶体模型时衍射的现象,同 X 射线对晶体的布拉格衍射现象相似。微波模拟布拉格衍射实验中,通过入射一定频率的微波,投射到相应点阵组成的晶面上,发生布拉格衍射,接收测定相应衍射波强度来反应衍射强度。

本文以晶格常数变化验证立方晶体中(110)晶面衍射极大值对应入射角由布拉格公式得到微波波长,与讨论探究接收端同时测定(100)面与(110)面衍射波晶格常数范围为两主要目的,对微波布拉格衍射实验,进行一定程度的拓展与补充。

## 1 仪器与原理概述

### 1.1 实验仪器

实验采用微波分光计装置进行实验,按示意图(如图 1)组装仪器。

微波信号源选用等幅工作状态,提供单一波长微波, $\lambda=32.02\text{mm}$ 。

衰减器改变发射微波幅度,刻度盘指数越大,对微波衰减越大,输出信号越小。

振荡器波导口输出微波信号由发射喇叭发射,发射喇叭发射信号的电矢量偏振方向与发射喇叭窄边平行,安装在固定臂上。

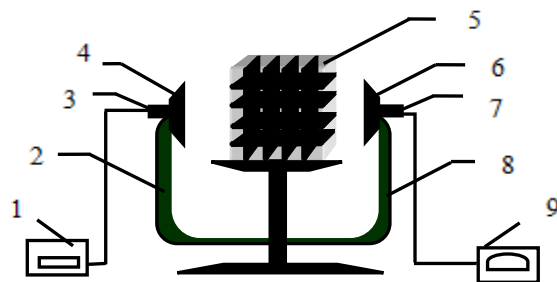
经过晶面衍射,调整活动臂角度接收喇叭可接收到相应微波信号,由二极管整流后输出直流信号,微安表可显示经整流输出的直流电信号<sup>[2]</sup>。

---

**资助项目:** 同济大学教学改革研究与建设项目, 同济大学精品实验项目

**作者简介:** 徐春阳(1993-),男,北京人,同济大学物理科学与工程学院应用物理专业 2011 级本科生。

**通讯作者:** 王晓栋(1984-),男,江苏江阴人,同济大学物理科学与工程学院助理教授,博士,主要从事材料物理方面研究和大学物理教学工作。



1 微波信号源 2 固定臂 3 衰减器 4 发射喇叭 5 立方晶体模型 6 接收喇叭  
7 检波器 8 活动臂 9 微安表  
图 1 微波布拉格实验装置示意图

## 1.2 实验原理

当电磁辐射或亚原子粒子波的波长，与进入的晶体样本的原子间距长度相若时，就会产生布拉格衍射，入射物会被系统中的原子以镜面形式散射出去，并会按照布拉格定律所示，进行相长干涉。对于晶质固体，波被晶格平面所散射，各相邻平面间的距离为  $d$ 。当被各平面散射出去的波进行相长干涉时，它们的相位依然相同，因此每一波的路径长度皆为波长的整数倍。进行相长干涉两波的路径差为  $2d\sin\theta$ ，其中  $\theta$  为散射角。由此可得布拉格定律产生相长干涉的条件<sup>[3]</sup>：

$$2d\sin\theta = k\lambda, \quad k=1,2,3\dots \quad (1)$$

整数时，才是极大干涉。方程（1）称为晶体衍射的布拉格公式。

实验中最简单晶体结构(如图 2 所示)，两种易于进行测量的晶面，(100)面和(110)面。一般而言，晶面指数为  $(n_1n_2n_3)$ ，其相邻的两个晶面间距为  $d = a / \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}$ <sup>[4]</sup>， $a$  为晶格常数，即晶胞边长。实验中通过设置一定的参数  $a$  选取适合 3 厘米微波布拉格衍射的晶体模型。

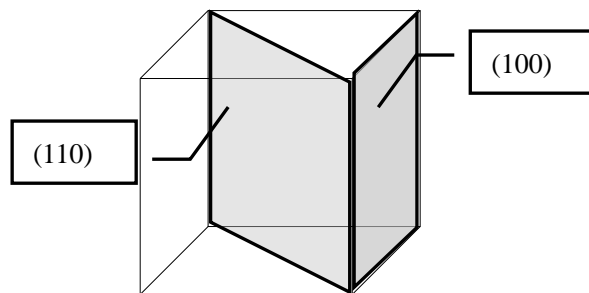


图 2 最简立方晶面示意图

## 2 参数讨论与实验探究

### 2.1 (100) 面和 (110) 面测定异同

(100) 面和 (110) 面在本实验中成  $45^\circ$  角关系，当选取法线方向垂直于 (110) 时，各个晶面与法线方向角度关系如图 3 所示。

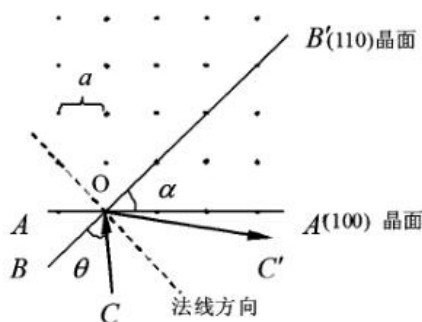


图3 (100)面和(110)面衍射时角度关系<sup>[5]</sup>

(1) 式中当用入射角  $\beta$  代替散射角  $\theta$  时, (1) 式改写为

$$2d\cos\beta = k\lambda, \quad k=1,2,3\dots \quad (2)$$

在测定 (100) 晶面衍射极大值时, 晶面即平行于相应点阵组成的外表面, 在选定一定范围内的入射角时, 相应法线与反射角组成的平面与晶体模型 (100) 面点阵组成表面垂直, 测定 (100) 面入射角  $\beta$  与衍射强度  $I$  关系时在  $20^\circ \sim 70^\circ$  间可以得到一级衍射极大值与二级衍射极大值。对应  $k=1,2$  代入 (2) 式, 得到衍射级数对应的入射角。以  $a=4.0\text{cm}$  晶体模型为例时计算(100)晶面一级衍射极大、二级衍射极大所对应的入射角  $\beta$  理论值为  $66.4^\circ$  与  $36.8^\circ$ 。

在测定 (110) 晶面衍射极大值时, 法线方向与测定 (100) 晶面时法线方向相差  $45^\circ$ 。由 (2) 式移项可得

$$\cos\beta = \frac{k\lambda}{2d} \leq 1, \quad k=1,2,3\dots \quad (3)$$

即衍射级数与晶面间距需满足的条件。

现有  $a=3.4\text{cm}$  与  $a=4.0\text{cm}$  晶体模型, 对应晶面间距  $d$  设为  $d_1, d_2$ , 此时  $d = \frac{a}{\sqrt{2}}, d_1=2.4\text{cm}, d_2=2.8\text{cm}$ 。  $\lambda=32.02\text{mm}$ : 当  $k=1$  时,  $\frac{\lambda}{2d_1} < 1$  与  $\frac{\lambda}{2d_2} < 1$  均满足 (3) 式条件; 当  $k=2$  时,  $\frac{2\lambda}{2d_1} > 1$  与  $\frac{2\lambda}{2d_2} > 1$ , 均不满足 (3) 式条件。由此可得当  $k=3,4,5\dots$  均不能满足 (3) 式条件, 即所选取两个不同晶格常数的晶体模型, 测定 (110) 面衍射极大值时, 只有一级衍射极大。

### 2.2 不同晶格常数的 (110) 面衍射极大值测定

选取  $a=3.4\text{cm}$  晶体模型, 当法线方向垂直于晶体模型 (110) 面时, 调整入射角, 通过旋转活动臂使之与法线方向夹角与入射角相等, 测定入射角与衍射波强度关系, 得到表 1 变化关系。通过作图软件得到 (110) 面入射角  $\beta$  与衍射强度  $I$  关系曲线 (如图 4 所示)。

表 1  $a=3.4\text{cm}$  (110) 面入射角  $\beta$  与衍射强度  $I$  变化关系

$\beta/^\circ$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
$I/\mu\text{A}$	2	0	2	6	7	7	8	11	16	25	37
$\beta/^\circ$	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	
$I/\mu\text{A}$	37	47	44	42	36	25	18	12	7	6	

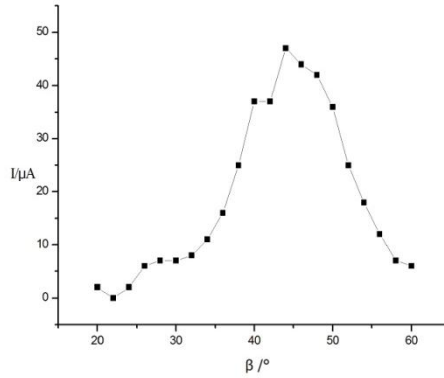


图4  $a=3.4\text{cm}$  (110) 面入射角  $\beta$  与衍射强度  $I$  关系曲线

由(3)式通过射角  $\beta$  与衍射强度  $I$  关系曲线可得一级衍射极大值对应入射角所求得  
的微波波长

$$\lambda_1 = 2d_1 \cos \beta = \sqrt{2} a_1 \cos \beta = 33.69 \text{mm}$$

相对误差为:

$$E_1 = \left| \frac{\lambda_1 - \lambda}{\lambda} \right| \times 100\% = 5\%$$

选取  $a=4.0\text{cm}$  晶体模型, 入射波经 (110) 晶面衍射后透过挡板到达接收喇叭, 通过旋  
转活动臂使之与法线方向夹角与入射角相等, 通过微安表读出示数, 测定测定入射角与衍射  
波强度关系得, 到表2变化关系。通过作图软件得到 (110) 面入射角  $\beta$  与衍射强度  $I$  关系曲  
线 (如图5所示)。

表2  $a=4.0\text{cm}$  (110) 面入射角  $\beta$  与衍射强度  $I$  变化关系

$\beta/^\circ$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
$I/\mu\text{A}$	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	4
$\beta/^\circ$	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	
$I/\mu\text{A}$	6	6	12	22	44	84	97	60	51	25	

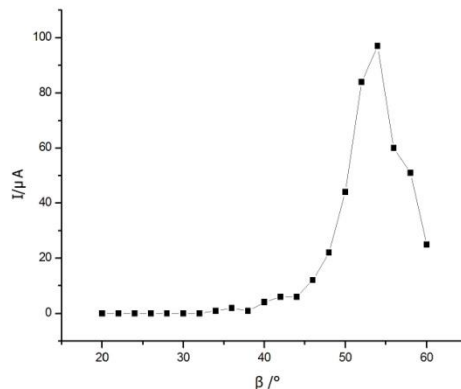


图5  $a=4.0\text{cm}$  (110) 面入射角  $\beta$  与衍射强度  $I$  关系曲线

由(3)式通过射角 $\beta$ 与衍射强度 $I$ 关系曲线可得一级衍射极大值对应入射角所求得的微波波长

$$\lambda_2 = 2d_2 \cos\beta = \sqrt{2}a_2 \cos\beta = 33.25\text{mm}$$

相对误差

$$E_2 = \left| \frac{\lambda_2 - \lambda}{\lambda} \right| \times 100\% = 4\%$$

$a=3.4\text{cm}$ 与 $a=4.0\text{cm}$ 两个晶格常数不同的晶体模型在微波布拉格衍射中测定(110)面一级衍射极大值对应入射角计算所得的微波波长与理论波长吻合较好,在实验仪器与测量精度允许误差范围内,实验结果符合布拉格衍射定律。

### 2.3 接收端同时测定(100)面与(110)面衍射波参数讨论

#### 2.3.1 角度限定与参数讨论

对于每一入射角 $\beta$ ,当不改变晶体模型角度,只旋转接收喇叭,欲接收(100)面与(110)面衍射强度。由图3分析,当入射波为CO时,设OB为起始边,图示 $\theta$ 角度值在 $(0,45^\circ)$ 间。当测定(110)面时, $\theta$ 取值范围在 $(0,90^\circ)$ 间,入射角 $\beta$ 为 $(90^\circ-\theta)$ ;当测定(100)面时, $\theta$ 取值范围在 $(-45^\circ,45^\circ)$ 间,入射角 $\beta$ 为 $(45^\circ-\theta)$ 。

则 $\theta$ 取值范围限定在 $(0,45^\circ)$ 内,(100)面满足

$$2a \cos\beta = 2a \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) = k_1 \lambda \in (\sqrt{2}a, 2a) \quad (4)$$

(110)面满足

$$\frac{2a \cos\beta}{\sqrt{2}} = \frac{2a \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}{\sqrt{2}} = k_2 \lambda \in (0, a) \quad (5)$$

由(4)式(5)式限定关系,讨论 $k_1$ 、 $k_2$ 取值关系。

#### 1) $k_1=k_2=1$ 测量情况讨论

当 $k_1=k_2=1$ 时,(5)式极大值 $a$ 小于(4)式极小值,不可能满足晶面角度不变,同时测量(100)面与(110)面一级衍射极大值。

#### 2) $k_1=2, k_2=1$ 测量情况讨论

当 $k_1=2, k_2=1$ 时,发现满足同时测量两晶面衍射极大值条件,即(4)式满足

$$2\lambda \in (\sqrt{2}a, 2a)$$

(5)式满足

$$\lambda \in (0, a)$$

(100)面测定二级衍射极大值,(110)面测定一级衍射极大值时,晶格常数可满足范围为

$$a \in (32.02, 45.29)\text{mm}$$

可以同时测定(100)面二级衍射极大与(110)面一级衍射极大。

在可限定衍射级数范围内 $k_1=2, k_2=1$ 已满足实验理论需要,故可选定上述参数进行两晶面的同时测定。

### 2.3.2 同时测定两晶面衍射波意义与局限性

对于每一入射角  $\beta$ ，当采用不改变模型角度，只旋转接收喇叭，测定（100）面和（110）面衍射极大时，可以减少因模型角度转动造成的误差，在测定微波波长过程中，可以提高测量效率，为观测带来便利。

同时，因模型转动角度有限，在观测微波布拉格衍射取较大范围散射角衍射强度变化情况时，并不适用。

## 3 结论

本文通过对立方晶体中（110）面晶体模型尺寸参数选取，测定入射角与衍射强度变化关系，结果较好的满足了实验预期。不同晶格常数的改变符合布拉格定律反应的衍射级数与微波波长的关系。同时本文另一重要目的，探究接收端同时测定（100）面与（110）面衍射波参数讨论也给出了相应衍射级数与晶格常数所取范围的关系，在微波布拉格散射实验中，为测定与探究（100）面与（110）面衍射极大值与测定微波波长提供新思路。

### 参考文献：

- [1] John M. Cowley. Diffraction physics (North-Holland, Amsterdam) ISBN 0-444-10791-6.
- [2] 近代物理实验讲义[Z]. 同济大学物理科学与工程学院, 2014: 35-40.
- [3] H P Myers. Introductory Solid State Physics. Taylor & Francis, 2002. ISBN 0-7484-0660-3.
- [4] 陆栋, 蒋平, 徐至中. 固体物理学[M]. 上海市: 上海科学技术出版社, 2003: 8-10.
- [5] 何颖卓, 香莲, 等. 关于微波布拉格衍射实验中（110）晶面衍射极大值测量的探讨[J]. 长春理工大学学报（自然科学版）, 2013: 62-64.

## Study on Measuring the Cubic Crystal Diffraction and Choosing the Cubic Crystal Mode in Microwave Bragg Diffraction

XU Chun-yang, CHEN Wen-ting, WANG Xiao-dong, ZHANG Zhi-hua, FANG Kai, HE Li  
(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In microwave Bragg diffraction experiments, through changing the conditions of the cubic crystal lattice constant, and measuring the relationship between the incident angle and diffraction intensity of (110) face, we prove that the range of the diffraction maximum conforms to the Bragg's law. Meanwhile, with the limited diffraction orders, we discuss the range of crystal lattice constants of (100) and (110) face if only changing the receiver angle, and also present the limited range of the diffraction orders and the crystal lattice constant in detail.

**Key Words:** Microwave; Bragg Diffraction; Cubic Crystal; Crystal Face

# X-ray Computed Tomography(X-CT)分辨率的研究

周震, 苏卫锋, 冀敏

(复旦大学物理教学实验中心, 上海 200433)

**摘要:** 研究了 X-CT 成像仪器 (Leybold Didactic 554800, 554821) 的使用方法, 并且用直接测试方法测试了本台仪器的系统空间分辨率, 得到了符合标示参数的结果。分析了影响观察者对图像清晰度感受的一些因素。

**关键词:** X-CT; 空间分辨率; 密度分辨率

## 1 引言

“X 射线计算机断层扫描成像”是医学四大成像技术之一, 对于医学院学生或者将来从事与医学影像相关工作的学生来说, 了解其工作原理是非常有用而且必要的。我校在“医学物理实验”课程(上海市精品课程)中开设了此实验, 并且深受学生欢迎。分辨率是描述 X-CT 成像的一个重要指标, 在临床上体现出对细小病灶或生理结构的观察、诊断能力。分辨率越高, 对细节的观察力越强。然而在实验过程中发现, 不少学生对于分辨率的概念还不够清晰, 因此对于本仪器的分辨率的研究有助于教学工作的进一步开展。

## 2 实验仪器及原理

X-CT 像与传统的 X 射线透射像不同, 透射像是从一个方向上投影, 得到的是重叠像, 而 X-CT 像则是利用多方向的投影数据, 重建出的断层图像, 图像清晰没有重叠。X-CT 运用了 X 线扫描和采集投影值的物理技术, 依据物质关于 X 射线的吸收规律建立物理模型, 采用一定的算法, 经计算机运算处理, 求解出衰减系数值在某断层的二维分布矩阵后, 再转为图像上的灰度分布。从而实现建立断层解剖图像的现代医学成像技术。

实验仪器图如图 1 所示, 左侧的仪器是 X 光机, 由 X 光管、荧光屏、控制区以及操作区(样品摆放区)构成; 右侧则是装有照相机的暗箱, 实验需确保在暗箱关闭的状态下进行。

连接计算机后, 可以通过计算机设置实验参数, 并自动扫描获取实验数据(如图 2 所示)。

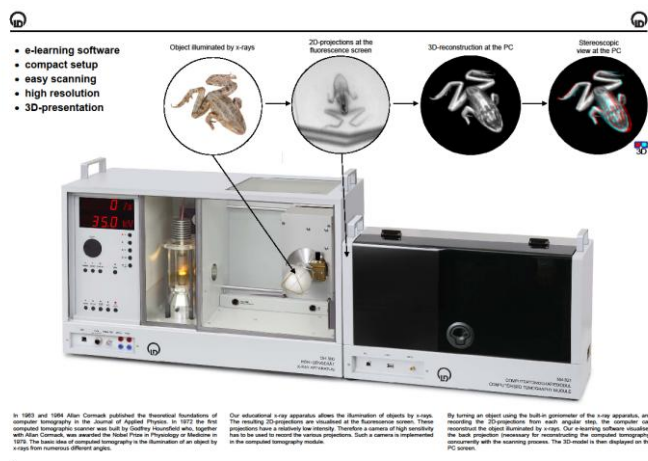
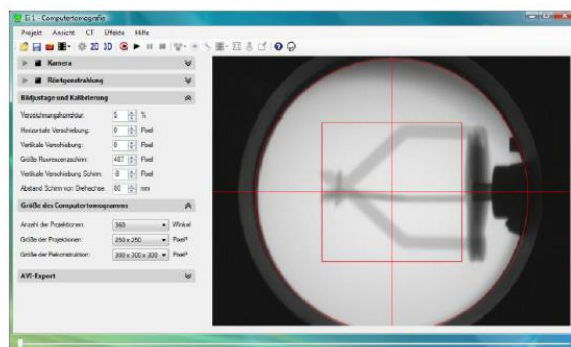


图 1 X-CT 成像仪



An adjusted computed tomography module with the empty object holder.

图 2 计算机操作界面

在 X-CT 成像中，分辨率是评价成像质量的一个重要指标。分辨率主要分为两种：

- 1) 空间分辨率：也称几何分辨率，是指从 CT 图像中能够分辨特定的最小几何细节的能力，它定量的表示为能分辨的两个细节特征的最小间距。
- 2) 密度分辨率：表示不同物质密度差异、或对 X 射线透射度微小差异的量。常用百分比表示，即可分辨的对比度。

本文着重讨论最佳密度分辨率下影响空间分辨率的因素。

### 3 实验设计与方法

仪器的说明书上标注的分辨率是 0.25mm，为实验验证是否能分辨出线度为 0.25mm 的物体，首先要找出获得最佳分辨率的实验条件，为此，需要如下几个步骤。

#### 1) 最佳仪器参数设置

参数的设置主要有 3 个方面：

- a. X 光机工作参数设置，包括管电压（High Voltage）及阳极电流（Anode Current）；
- b. 图像调整与矫正，包括失真度矫正（Distortion correction）、水平平移（Horizontal Shift）、垂直平移（Vertical Shift）、荧光屏尺寸（Size of fluorescent screen）、屏幕垂直平移（Vertical shift of screen）；
- c. CT 图像的参数设置，包括投影数目（Number of projections）、投影尺寸（Projection size）及再构图像尺寸（Reconstruction Size）的设置。

实验中需要根据样品材质、大小，合理设置以上参数，让每一次测量样品都能得到力所能及最清晰的成像。

#### 2) 样品材质的选择

充分考虑到材料的易加工性、精细程度、X 光在此材料内的衰减状况、X 光透射性是否良好等。

#### 3) 样品形状的设计

测试空间分辨率通常用对具有周期性结构的标准试件进行扫描成像，分析 CT 图像中按一定规律排布的像，通常有圆孔、线对、条形孔等。

分辨成排圆孔大小法：等大等间距的圆孔依次排列，每列圆孔直径逐渐由小增大，观察能分辨的最小圆孔直径。

分辨线对数法：线对间距逐渐由小增大，观察能分辨的最小线对间距。

### 4 实验结果与分析

#### 1) 最佳仪器参数的设置



对于不同的样品，需要设置不同的失真度矫正以期最佳效果。如小夹子为+3%，而青蛙标本为-7%。对于其它参数的设置，保证照相机镜头与取景屏幕最切合即可。



图3 小夹子 X-CT 成像图



图4 小青蛙 X-CT 成像图

## 2) 样品材质的选择

有机玻璃与铜丝。有机玻璃平滑清晰，对 X 光的衰减系数较为合适，成像清晰，缺点为加工较难。铜丝易精细加工，但密度过大，成像时会产生放射状或带状伪影。好在因为足够细，实验中并未出现伪影现象。

## 3) 样品形状的设计

因加工困难，在设计时采用了成角度铜丝和成排线对数两种方法计算最小分辨率，模版形状如图 5 所示。

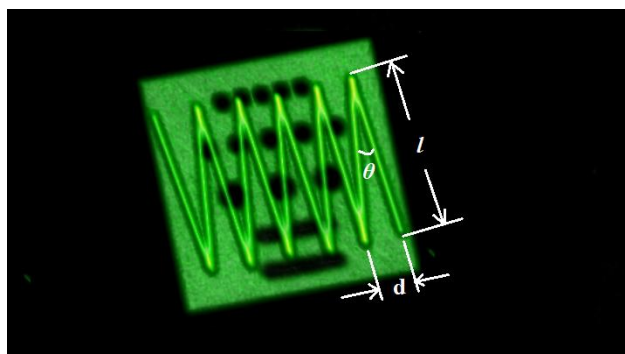


图5 设计样品图

## 4) 结果分析

成角度铜丝：如表 1 所示，通过测量铜丝交合处的长度  $l$  与角度  $\theta$  计算可分辨的最小间距。

$$d = 2l \sin \frac{\theta}{2},$$

$$\bar{d} = 0.31\text{mm}$$

线对：间距  $d=0.2\text{mm}$  无法分辨。间距  $d=0.4\text{mm}$  可分辨。单根铜丝  $d=0.2\text{mm}$  可以分辨。

表 1 成角度铜丝分辨率计算数据表

$\theta/^\circ$	$l/\text{mm}$	$d/\text{mm}$
17	1.1	0.32
16	1.1	0.31
16	1.0	0.28
15	1.2	0.31
15	1.2	0.31
15	1.1	0.29
15	1.2	0.31
16	1.2	0.33
14	1.3	0.32

## 5 实验结论和分析

对于不同的样品，需要设置不同的失真度矫正以期最佳效果。

实验仪器能分辨出 0.2mm 的铜丝，仪器参数中所标注出的空间分辨率约为 0.25mm 可以接受。

对小青蛙标本等材质，因为薄厚、各部分的衰减系数也不尽相同，影响了密度分辨率，使得原本能分辨出的部分无法分辨。为了减少检测分辨率过程中的人为干预，也可通过 CT 的调制传递函数（Modulation Transfer Function, MTF）进行测量。

影响空间分辨率的因素：

1) 与仪器设备有关

空间分辨力受到探测器的数量和质量因素的影响，探测器排列越多，间隔越小，数据采集点也就越多。另外，射线源尺寸、探测器孔径、机械系统精度等也是影响因素。

2) 与图像重建的演算法有关

不同的重建矩阵大小、数据采集系统和重建算法也会导致图像的空间分辨率不同。通常，X-CT 图像重建方法为滤波反投影法，即将投影函数卷积处理使之更平滑。选取的滤波越精细，图像也更易被分辨。

影响密度分辨率的因素：

1) 与信噪比有关

CT 的 X 线信息量和噪声是影响图像分辨率的重要因素。信息量即 X 线穿过样品后到达探测器的光子数量。光子量减少，噪声增加。增加 X 线量也就增加图像信息量，同时也就降低了图像的噪声。

2) 与断层厚薄有关

影响 CT 图像密度分辨率的另一重要因素即样品的几何尺寸。断层厚，探测器可接收到较多的 X 线光子数，也就得到了很好的密度显示。

## 6 小结

X-CT 的空间分辨率近似为 0.25mm，标注的参考值可以接受。观察者无法分辨原因有参数设置不佳和低密度分辨率影响观测等。在排除人为影响，仪器精度得到保证的情况下，重建算法是否高效精确是很大的影响因素之一。

参考文献:

- [1] 苏卫锋, 冀敏. 物理实验[J]. 2012, 32(增刊): 57-59.
- [2] 冀敏, 陆申龙. 医学物理实验[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2009.
- [3] Operating instructions. Leybold Didactic, 554821.
- [4] 郭志敏, 倪培军. 兵器材料与工程[J]. 2010, 33(2): 113-117.

## Resolution of X-ray computed tomography (X-CT)

ZHOU Zhen, SU Wei-feng, JI Min

(Department of Physics, Fudan University)

**Abstract:** The operating instructions of computed tomography module (Leybold Didactic 554800, 554821) were cleared. The spatial resolution of this apparatus is measured in a direct way, and a reasonable result was gained. Finally, some factors which affect the observation were studied.

**Key words:** X-CT; spatial resolution; contrast resolution;

# 垂直磁场对光抽运信号的影响

陈森<sup>a</sup>, 王点庄<sup>b</sup>, 曹庆睿<sup>b</sup>, 张师平<sup>a</sup>, 吴平<sup>a</sup>

(北京科技大学 a. 数理学院 应用物理系; b. 材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 保持扫场和垂直磁场合成的叠加磁场大小一定, 定量研究了地磁场的垂直分量抵消不同时叠加磁场方向变化角度 $\Delta\theta$ 对光抽运信号幅度的影响规律。结果表明: 光抽运信号幅度随叠加磁场方向变化角度 $\Delta\theta$ 的增大而增大, 当 $\Delta\theta = 180^\circ$ 时, 即地磁场的垂直分量完全抵消时, 光抽运信号幅度最大, 并从量子理论的观点解释了这一规律, 解决了光泵磁共振实验教学过程中的一个难点。

**关键词:** 光抽运; 扫场幅度; 垂直磁场

## 1 引言

光抽运是借助于光辐射获得原子基态超精细结构能级或塞曼子能级间粒子数的非热平衡分布的实验方法, 作为一种非常有用的实验手段, 对于精确频率测量、能级的精细和超精细结构研究以及激光的发现等方面起着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。在光泵磁共振实验中, 光抽运改变了磁能级上的粒子数分布, 使更多的粒子参与磁共振, 另一方面采取光探测的方法而不直接测量射频量子, 从而克服了磁共振信号弱的缺点, 把探测灵敏度提高了七八个数量级<sup>[3-4]</sup>。光抽运信号的强弱对磁共振实验的结果至关重要, 是进行磁共振实验的关键条件, 目前在实验教学中均是利用垂直线圈完全抵消地磁场垂直分量的条件下观察光抽运信号, 而地磁场垂直分量抵消不同时对光抽运信号幅度的影响过程关注较少, 尤其是光抽运信号幅度变化规律, 这不仅是学生学习理解光泵磁共振过程遇到的一个难点, 也是教学中的一个难点。本文定量研究了地磁场垂直分量抵消不同时, 扫场和垂直磁场合成的叠加磁场对光抽运信号的影响, 并用量子理论观点给出了解释。

## 2 实验现象

以气态<sup>87</sup>Rb为例, 它在受左旋圆偏振光 $D_1\sigma^+$ 照射时, 遵循光跃迁选择定则:

$$\Delta F = 0, \pm 1; \Delta M_F = +1$$

激发 $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$ 能级的跃迁, 由于 $5^2P_{1/2}$ 各塞曼子能级磁量子数最高为 $M_F = +2$ , 因此基态 $M_F = +2$ 子能级上的粒子不能发生跃迁。而由 $5^2P_{1/2} \rightarrow 5^2S_{1/2}$ 的向下跃迁中,  $\Delta M_F = 0, \pm 1$ 的各跃迁都是可能的, 对 $M_F = +2$ 能级也不例外。这样经过若干循环之后, 基态 $F = 2, M_F = +2$ 子能级上的粒子数就将大大增加, 这就是光抽运效应。经过一定弛豫时间后, 原子会保持在偏极化的状态, 此时如若改变磁场方向, 原子偏极化被打破, 再次发生上述光抽运过程。当铷原子气体处于垂直方向磁场为 0, 水平方向存在方波扫场时, 可观察到标准光抽运信号如图 1 所示。

**基金项目:** 北京科技大学研究型教学示范课建设项目(KC2014YJX30); 北京科技大学教育教学改革与研究项目(JG20112M39, JG20112M57)

**作者简介:** 陈森(1978-), 男, 河南濮阳人, 北京科技大学物理系工程师, 硕士, 主要从事物理实验教学工作。

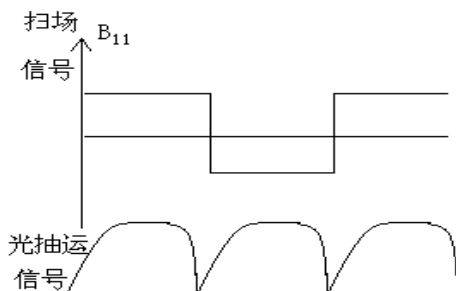


图 1 光抽运信号

实验中发现垂直磁场对光抽运信号有很大影响，当垂直方向磁场 $B_{\perp} = 0$ 时，即地磁场的垂直分量被抵消，光抽运信号有最大值。如果不抵消地磁场的垂直分量，无论增大或减小垂直方向亥姆霍兹线圈的输出信号，都会使光抽运信号减弱，此时原子所处环境磁场如下图 2 所示， $B_{//}$ 是扫场上半周期磁场， $B'_{//}$ 是扫场下半周期磁场， $B_{\perp}$ 是垂直方向总磁场， $B$ 、 $B'$ 是扫场和垂直磁场合成的叠加磁场， $\Delta\theta$ 是扫场在一个完整周期内与垂直场合成的叠加磁场方向变化的角度。

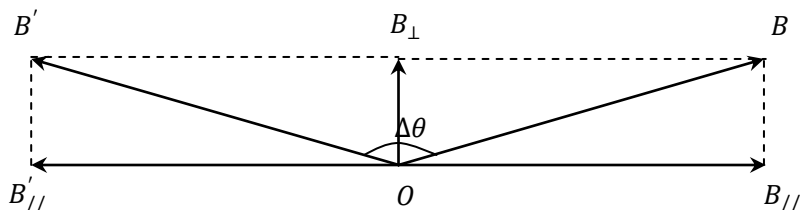


图 2 磁场矢量图

由图 2 可以看出，垂直方向磁场不为零时，在一个完整的扫场周期内扫场和垂直磁场合成的叠加磁场不再沿水平方向变化，叠加磁场方向变化的角度 $\Delta\theta$ 小于  $180^{\circ}$ ，说明扫场和垂直磁场合成的叠加磁场方向变化角度影响光抽运信号幅度。

### 3 研究方法

实验所用仪器为大华无线电仪器厂生产的 DH807A 型光泵磁共振实验仪，通过减小扫场幅度，增加垂直线圈电流，保持叠加磁场 $B$ 大小一定，测量叠加磁场方向变化不同角度 $\Delta\theta$ 对应的光抽运信号幅度，数据如下表 1 所示。叠加磁场等效电流：0.220A，叠加磁场方向变化角度 $\Delta\theta$ ： $180^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，步长： $10^{\circ}$ ； $I$ 为光抽运信号幅度，垂直磁场线圈净电流指抵消地磁场垂直分量（0.071A）后的电流。

表 1 叠加磁场方向变化不同角度时的光抽运信号幅度

$\Delta\theta / ^{\circ}$	垂直磁场线圈净电流/A	扫场幅度/A	$I/mV$
180	0.000	0.220	81.2
170	0.019	0.219	80.4
160	0.038	0.217	78.4
150	0.057	0.213	69.4
140	0.075	0.207	58.0
130	0.093	0.199	48.2
120	0.110	0.191	39.5

110	0.126	0.180	32.2
100	0.141	0.169	24.2
90	0.156	0.156	19.3
80	0.169	0.141	14.1
70	0.180	0.126	12.7
60	0.191	0.110	11.6
50	0.199	0.093	9.9
40	0.207	0.075	8.7
30	0.213	0.057	6.4

由表 1 得到光抽运信号幅度与叠加磁场方向变化不同角度 $\Delta\theta$ 的关系，如图 3 所示：

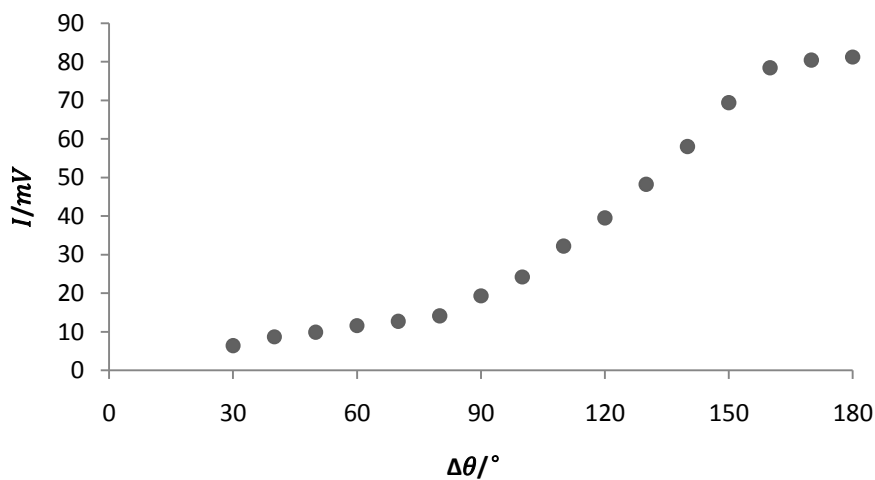


图3 光抽运信号幅度与叠加磁场方向变化角度关系图

由图 3 可以看出，光抽运信号幅度随叠加磁场方向变化角度 $\Delta\theta$ 的增大而增大，当 $\Delta\theta = 180^\circ$ 时，即地磁场的垂直分量完全抵消时光抽运信号幅度最大。

为了进一步描述光抽运信号幅度与叠加磁场方向变化角度 $\Delta\theta$ 的关系，将横坐标由 $\Delta\theta$ 改为 $1 - \cos\Delta\theta$ ，得到如图 4 所示拟合曲线。

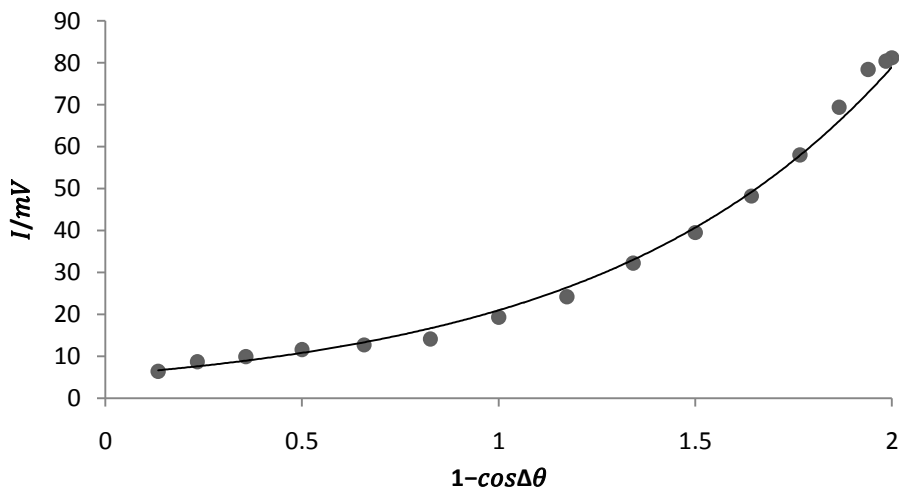


图 4 光抽运信号幅度与 $1 - \cos\Delta\theta$ 拟合曲线

由图 4 可以看出, 光抽运信号幅度与  $(1 - \cos\Delta\theta)$  存在指数函数关系:  $I = 5.5691e^{1.3259(1-\cos\Delta\theta)}$  ( $R^2 = 0.992$ ), 即光抽运信号幅度正比于  $e^{1-\cos\Delta\theta}$ 。

考虑到  $\Delta\theta = 0^\circ$ , 即叠加磁场方向不发生改变时, 原子始终处于偏极化的状态, 此时光抽运信号幅度  $I = 0$ , 对拟合方程进行修正, 可得到下面  $I$  与  $\theta$  的关系:

$$I = k_1 [e^{k_2(1-\cos\Delta\theta)} - 1]$$

其中  $k_1$ 、 $k_2$  为独立的待定系数, 与叠加磁场  $\vec{B}$  有关。为了更清晰地表示  $I$  与  $\Delta\theta$  的规律, 再令  $A = k_1 e^{k_2}$ 、 $B = -k_2$ 、 $C = -k_1$ , 则上式可改写为:

$$I = Ae^{B\cos\Delta\theta} + C$$

其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  亦为待定系数 (只有两个是独立的)。此式即为光抽运信号幅度随叠加磁场方向变化角度  $\Delta\theta$  的规律关系方程。

#### 4 分析与讨论

由上述可知, 光抽运信号幅度随叠加磁场方向变化角度  $\Delta\theta$  的增大而增大。对于这一规律, 可从量子理论出发加以解释。

经过一定弛豫时间后,  $^{87}\text{Rb}$  原子达到偏极化的平衡态, 取叠加磁场  $\vec{B}$  的方向为  $z$  轴正向, 量子数  $M_z$  有 5 种不同的取值, 此时  $(\hat{L}^2, \hat{L}_z)$  构成一组力学量完全集, 对应本征函数  $\Psi_{m_{iz}}$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ), 原子的波函数可表示为

$$\Psi = C_1\Psi_{m_{1z}} + C_2\Psi_{m_{2z}} + C_3\Psi_{m_{3z}} + C_4\Psi_{m_{4z}} + C_5\Psi_{m_{5z}}$$

其中,  $\{\Psi_{m_{iz}}\}$  为一组基矢量, 构成一个希尔伯特空间。  $C_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 为归一化后的概率振幅,  $|C_i|^2$  表示原子处于相应  $\Psi_{m_{iz}}$  态的概率, 从宏观上讲, 它可反映处于各塞曼子能级上的原子的个数。假设  $\Psi_{m_{1z}}$  为  $M_F = +2$  对应的本征函数, 则由原子的偏极化可知,  $|C_1|^2 \gg |C_i|^2$  ( $i = 2, 3, 4, 5$ )。

设  $t'$  时刻叠加磁场方向改变了  $\Delta\theta$  角, 取变化后叠加磁场  $\vec{B}'$  的方向为  $z'$  轴正向, 原有的希尔伯特空间转动一定的角度, 新空间的基矢量为  $\{\Psi_{m_{iz}'}\}$ , 同样对应原子处于各子能级的本征态。此时原子的波函数可表示为

$$\Psi' = C_1'\Psi_{m_{1z}'} + C_2'\Psi_{m_{2z}'} + C_3'\Psi_{m_{3z}'} + C_4'\Psi_{m_{4z}'} + C_5'\Psi_{m_{5z}'}$$

由于原子的状态随时间的变化是连续的, 则  $t'$  时刻叠加磁场方向改变时, 有

$$\Psi = \Psi'$$

因此波函数在新的希尔伯特空间中各基矢量上的投影发生改变, 即  $C_i \neq C_i'$ , 此时能量的可能取值仍是不变的, 即  $\Delta\theta$  角未使原子能级发生变动, 却使原子处于各能级的概率发生变化, 导致原子的偏极化被打破, 引发宏观上的光抽运现象。以  $\Delta\theta = 180^\circ$  时为例, 此时磁量子数完全相反,  $|C_i|^2$  到  $|C_i'|^2$  的改变最剧烈, 原子偏极化被打破的程度最大, 因此光抽运信号的幅度最强; 而当  $\Delta\theta < 180^\circ$  时, 磁量子数并非完全相反,  $|C_i|^2$  到  $|C_i'|^2$  的改变不如  $\Delta\theta = 180^\circ$  时剧烈, 原子偏极化被打破的程度较小, 得到的光抽运信号的幅度变小。

#### 5 结束语

在经典的光泵磁共振实验的基础上, 保持扫场和垂直磁场合成的叠加磁场大小一定, 定量研究了地磁场的垂直分量抵消不同时叠加磁场方向变化角度  $\Delta\theta$  对光抽运信号幅度的影响,

给出了光抽运信号幅度随叠加磁场方向变化角度 $\Delta\theta$ 的变化规律，得到了光抽运信号幅度与 $\Delta\theta$ 的关系方程。光抽运信号幅度随叠加磁场方向变化角度 $\Delta\theta$ 的增大而增大，当 $\Delta\theta = 180^\circ$ 时，即地磁场的垂直分量完全抵消时光抽运信号幅度最大，并从量子理论的观点解释了这一规律，解决了光泵磁共振实验教学过程中的一个难点。

#### 参考文献：

- [1] 贺凌翔，王育竹。光抽运效应的实验演示[J]。中国激光，2004，31(1)：25-28。
- [2] 于力，张永生，刘晶儒，等。光抽运XeF(C-A)蓝绿激光器[J]。中国激光，2001，28(3)：205-208。
- [3] 吴平。理科物理实验教程[M]。北京：冶金工业出版社，2010：239-248。
- [4] 侯清润，曾蓓，张薇薇，等。磁场对光抽运信号的影响[J]。物理实验，2001，21(12)：9-12。

## Influence of vertical magnetic field on optical pumping signal

CHEN Sen<sup>a</sup>, WANG Dian-zhuang<sup>b</sup>, CAO Qing-ru<sup>b</sup>, ZHANG Shi-ping<sup>a</sup>, WU Ping<sup>a</sup>

(a. Department of applied Physics, School of Mathematics And Physics; b. Materials Science and Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The influence of superimposed magnetic field on optical pumping signal amplitude was studied quantitatively with superimposed magnetic field direction change angle  $\Delta\theta$  when the vertical component of geomagnetic field isn't completely offset, keeping superimposed magnetic field formed by scanning field and vertical magnetic field in a certain size. Results showed that optical pumping signal amplitude increases with superimposed magnetic field direction change angle  $\Delta\theta$  increases, When  $\Delta\theta=180^\circ$ , namely the vertical component of geomagnetic field completely offset, optical pumping signal range is the biggest, and explain this rule from the view of quantum theory, a difficult problem of optical pumping magnetic resonance experiment teaching process was solved.

**Key words:** optical pumping; amplitude of sweep field; vertical magnetic field



# 核磁共振及其成像实验

姚红英

(复旦大学 物理学系, 上海 200433)

**摘要:**介绍了复旦大学物理教学实验中心用 0.5 T 上海纽迈 NMI20 核磁共振分析仪所做的饱和恢复法测大豆油的纵向弛豫时间  $T_1$ , CPMG 方法测量大豆油的横向弛豫时间  $T_2$  及猪肉的自旋回波成像实验.

**关键词:**核磁共振成像; 弛豫时间; 自旋回波

## 1 引言

核磁共振系指受电磁波作用的原子核系统在外磁场中磁能级之间发生共振跃迁的现象. 1939 年首次被拉比(I.I. Rabi)在高真空中的氢分子束实验观察到, 并用于测量核磁矩, 为此他获得了 1944 年的诺贝尔物理学奖. 1946 年伯赛尔(E.M. Purcell)和布洛赫(F. Bloch)两个小组独立地用吸收法和感应法分别在石蜡和水这类一般状态的物质中观察到氢核( $^1\text{H}$ , 质子)的核磁共振, 这项重大发明使得他们分享了 1952 年的诺贝尔物理学奖. 20 世纪 70 年代初, 保罗·劳特布尔通过引入梯度场获得二维核磁共振图像, 彼得·曼斯菲尔德又进一步发展了有关梯度场的理论, 由于上述贡献他们二人荣获 2003 年诺贝尔生物学医学奖. 1977 年研制成人体核磁共振断层扫描仪(NMR-CT), 获得人体软组织的清晰图像. 本实验通过对纵向弛豫时间常数  $T_1$  及横向弛豫时间常数  $T_2$  的测定以及自旋回波成像的研究, 使学生对 NMR 的基本原理有一清晰的了解, 对核磁共振成像作一初步接触.

## 2 实验原理及仪器

### 2.1 核磁共振现象

原子核系统在外磁场中发生能级分裂, 在一定射频场作用下吸收其能量发生能级跃迁的现象, 叫做核磁共振. 由物理学理论得知核磁共振的条件是射频场的频率等于

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (1)$$

$\omega_0$  为外磁场中原子核所做的拉莫尔进动的频率,  $\gamma$  为旋磁比, 代表原子核的本性,  $B_0$  为外磁场大小.

### 2.2 磁化强度矢量 $M$

在核磁共振过程中会有一个物理量产生, 它是个矢量, 在没有加射频场时, 这个矢量方向在外磁场  $B_0$  方向上, 即 Z 轴方向. 这个矢量被称为磁化强度矢量  $M$ , 如图 1 所示.

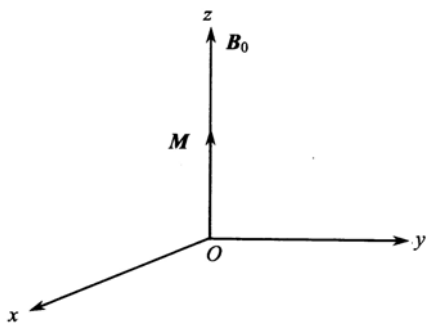


图 1 磁化强度矢量  $M$

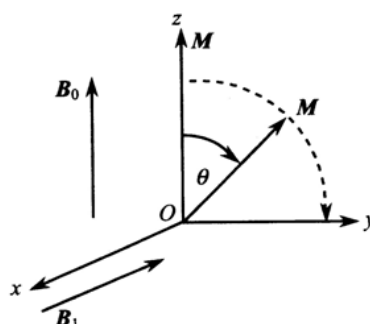


图 2  $M$  向  $xOy$  平面翻转

在  $x$  轴加上一个射频场之后, 磁化强度矢量  $M$  会向  $xOy$  平面偏转, 如图 2 所示. 偏转的角度  $\theta$  与脉冲作用时间  $\tau$ 、脉冲磁场的强度  $B_1$  和质子的旋磁比有关.

$$\theta = \gamma B_1 \tau \quad (2)$$

使  $M_0$  偏转到  $xOy$  平面上的射频脉冲称为  $90^\circ$  脉冲, 使  $M_0$  偏转到  $z$  轴负方向上的射频脉冲称为  $180^\circ$  脉冲.

### 2.3 弛豫时间

受到射频脉冲激励的体系由于系统的弛豫作用将逐渐返回热平衡状态: 纵向磁化矢量  $M_z$  因自旋体系与晶格发生相互作用释放能量, 使布居数返回平衡态, 衡量这一过程时间的长短称为自旋-晶格弛豫时间  $T_1$ ; 横向磁化矢量  $M_{xy}$  则由于发生在自旋体系之间的相互作用而失去相干性, 强度逐渐降低, 衡量这一过程的时间称为自旋-自旋弛豫时间  $T_2$ . 由于弛豫现象的存在, 脉冲核磁共振获得的拍频信号无法永远保持, 而是将以指数的方式衰减, 这种信号称为 FID 信号, 信号强度可表示为  $I = I_0 \sin \theta \cos(\omega_0 t) e^{-t/t_2^*}$ , 其中  $t_2^*$  为观测横向弛豫时间, 主要由磁场不均匀性及自旋-自旋相互作用组成.

### 2.4 自旋回波(spin echo)信号(SE 信号)

由于磁场的非均匀性, FID 信号会迅速衰减掉, 导致图像质量下降, 为此在  $90^\circ$  脉冲之后再加一个  $180^\circ$  脉冲, 使已经开始衰减的横向磁化的相位又重新聚集在一起而形成自旋回波 (spin echo) 信号, 它是 FID 信号的恢复的再现. 具体形成过程如下: 一部分质子因磁场化学位移的非均匀性使其进动频率变大一点  $\omega_0^+$ , 如图 3 中的矢量 4, 而有些频率变小一点  $\omega_0^-$ , 如图 3 中的矢量 1. 在横向磁化强度产生之初, 它们具有相同相位, 见图 3(a), 之后在回波时间 (time of echo)  $TE$  的一半 ( $TE/2$ ) 时间内, 由于它们的进动角频率不同, 使质子迅速失相位, 横向磁化强度迅速衰减为零, 见图 3(b). 在  $TE/2$  时刻施加一  $180^\circ$  脉冲, 结果使各质子磁矩的横向分量在  $xOy$  平面内绕  $x$  轴旋转  $180^\circ$  达到其镜像位置, 见图 3(c), 各质子仍保持原来的进动方向, 这样快慢质子换位. 之后的  $TE/2$  内, 进动快的质子又追上进动慢的质子, 到  $TE$  时刻, 他们的相位又变为相同的了, 如图 3(d).  $180^\circ$  脉冲也可以从质子进动的方向反转来理解. 在  $180^\circ$  脉冲作用后, 接收自旋回波的信号形状是首先按指数余弦规律增加, 然后按指数余弦规律衰减, 如图 4 所示.

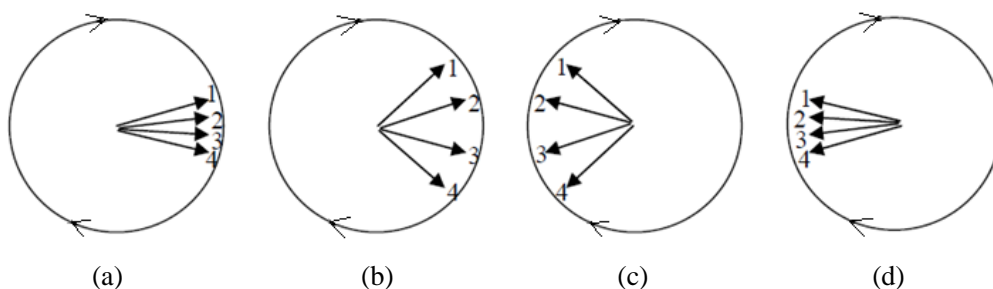


图 3  $180^\circ$  脉冲使失相位质子获得相位一致

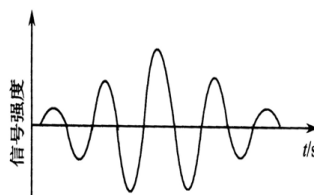


图 4 自旋回波信号图形

## 2.5 实验仪器

我们 1995 年买了第一台核磁共振成像仪，试用了之后，同年又买了第二台核磁共振分析仪，用于三年级近代物理实验选作实验. 1997 年又买了两台核磁共振分析仪，这样四台仪器用于这个选作实验. 实验可以做 3~5 周，每周 6 学时。同时也用这四台仪器给医学物理实验做成像实验内容. 2010 年又买了四台核磁共振分析仪. 现在一共有八台仪器，其中四台专门用于医学物理实验. 仪器如图 5 所示，图中右面为磁体单元，提供实验所需磁场，0.5 T 左右；磁场均匀度在 15 ppm 以下，直径为 10 mm 样品试管放在磁场中心位置射频线圈中；图中中间上、中、下分别为射频控制单元、梯度放大器和横卧式计算机主机，射频控制单元产生射频信号和脉冲序列，梯度放大器提供梯度场和电子匀场；图中左面的为计算机显示器.



图 5 NMI20 台式核磁共振分析仪

## 3 实验内容及结果分析

### 3.1 横向弛豫时间 $T_2$ 的测定

硬脉冲 CPMG 序列是在自旋回波脉冲序列基础上，多次施加 180 度脉冲，从而得到多个回波信号的回波脉冲序列，其序列结构和回波情况如图 6 所示. 在 90°脉冲之后，经过时间  $\tau$  的散相之后，再加上 180°的重聚脉冲，在  $t=2\tau$  时刻得到第一个回波信号，之后又开始散相运动，在  $t=3\tau$  时，再施加第二个 180°的重聚焦脉冲，同样会在  $t=4\tau$  时，横向磁化矢量又会汇聚而形成第二个回波信号，如此重复，可产生多个回波信号，不过回波信号的幅度在逐步减小. 这样可以得到一个回波波列，由每个回波峰值  $|M_y(t)| = M_0 e^{-2n\tau/T_2}$ ，形成的指数衰减曲线就是  $T_2$  衰减曲线，因此可以利用这个峰值衰减规律来测得样品的  $T_2$  值。

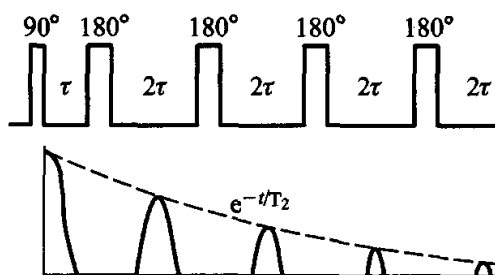


图 6 CPMG 序列示意图

图 7 所示是吴凡同学大豆油的测量结果. 他分别测量了 10 个回波图 7(a)和 100 个回波图 7(b)的数据. 在用 Origin 拟合的过程中发现需要加入一个常数项，数据才会符合得比较好. 数据如图 7(c)和图 7(d)所示. 由图中数据可以得到 10 个回波时大豆油横向弛豫时间为  $T_2=(49\pm 4)$  ms，100 个回波时大豆油横向弛豫时间为  $T_2=(48\pm 1)$  ms. 从结果来看回波数多时，不确定度要小些. 之所以有个常数项是由于信号中有直流成份的叠加.<sup>[1]</sup>

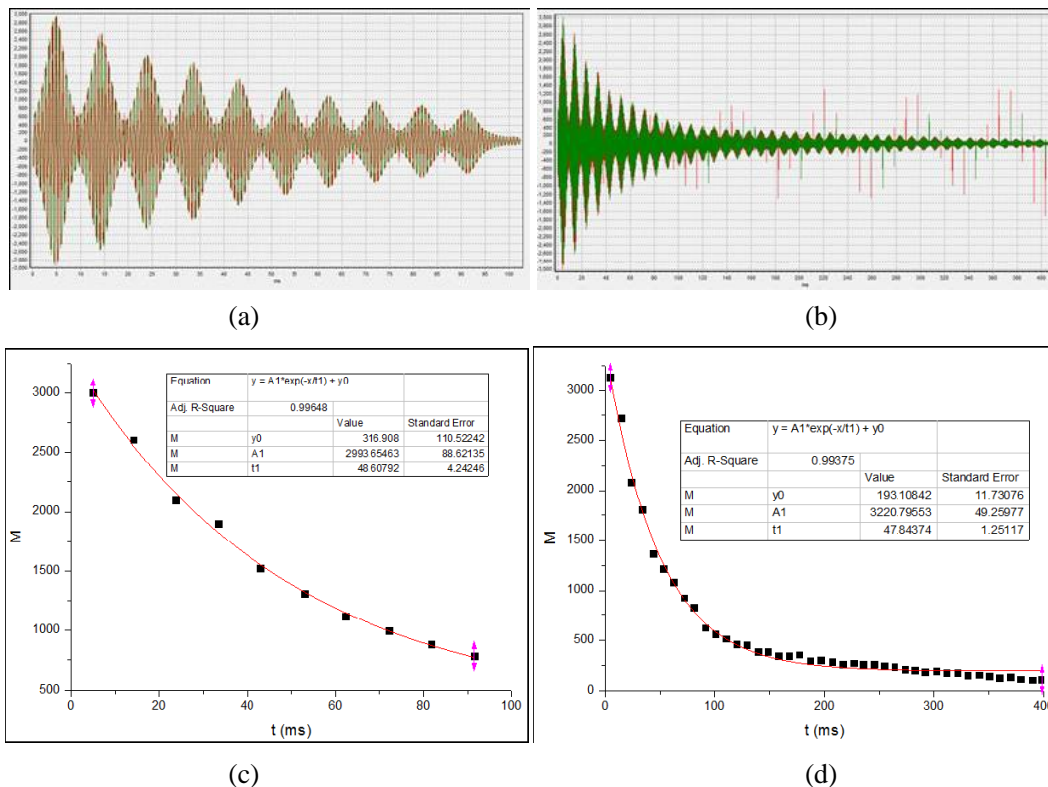


图7 CPMG方法10个回波和100个回波带常数项的拟合结果

### 3.2 纵向弛豫时间 $T_1$ 的测定

饱和和恢复法的脉冲序列如下图8所示. 饱和和恢复法的脉冲序列中的两个射频脉冲都是  $90^\circ$  射频脉冲, 在第一个  $90^\circ$  脉冲激发之后, 宏观磁化矢量立刻倒向  $xoy$  水平面上, 纵向和横向弛豫同时开始. 但由于磁场不均匀性的影响, 横向弛豫要比纵向弛豫快很多, 所以饱和和恢复序列只能适合测量纵向弛豫时间  $T_1$ . 由纵向磁化矢量表达式  $M_z(t) = M_0(1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$  可知, 当第一个  $90^\circ$  脉冲之后, 间隔一定时间  $T_R$  后, 施加第二个  $90^\circ$  射频脉冲, 纵向磁化矢量可表示为  $M_z(t) = M_0(1 - e^{-\frac{T_R}{T_1}})$ , 记录此时产生的 FID 信号幅值. 然后通过改变时间间隔  $T_R$ , 就可以测得一系列 FID 信号幅值, 如图9所示. 再将这些数据进行曲线拟合, 就可以得到样品的  $T_1$  值. 脉冲序列为了克服射频不均匀性对测量精度的影响, 施加了散相梯度  $G_x$ . 图10为吴凡同学测的大豆油的数据.

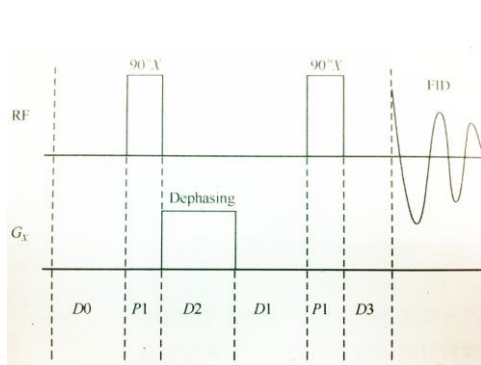


图8 饱和恢复法序列图

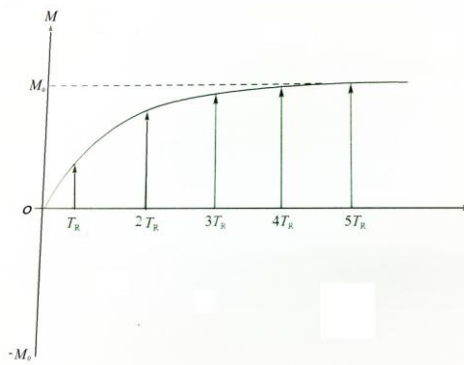


图9 磁化矢量随时间间隔变化示意图

由图10所示数据可以得到大豆油的纵向弛豫时间为 $T_1=(150\pm 6)$  ms. 考虑到信号磁矩基线的偏离, 同样采用带常数项的指数函数来拟合.

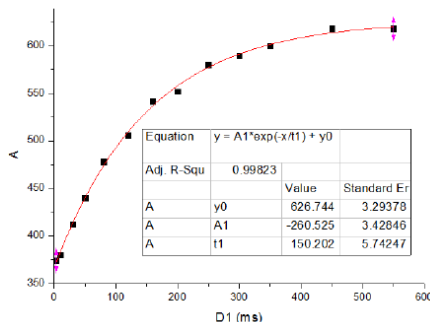
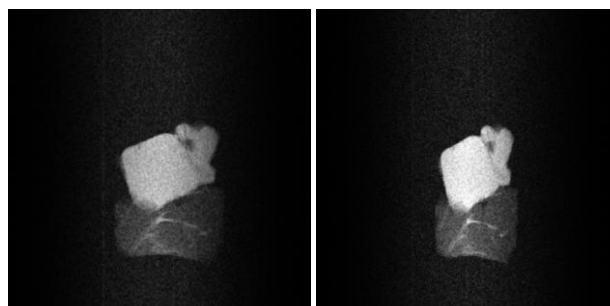


图 10 饱和恢复法测纵向弛豫时间

### 3.3 猪肉自旋回波序列成像

首先对仪器进行电子匀场的调节; 其次调节射频场频率, 找出拉莫尔共振频率, 记下此频率; 第三, 进行软脉冲序列  $90^\circ$  脉冲和  $180^\circ$  脉冲的调节, 找出形成这两个脉冲的脉冲幅度值 RFamp1(%); 第四, 选择自旋回波成像序列进行成像. 通过此实验研究成像参数对图像的影响, 下面是居慧雯同学的实验结果.

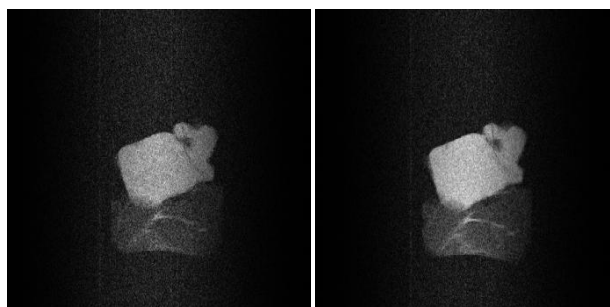
图 11 给出了选层厚度对信号强度的影响. 选层厚度与选层梯度场成负相关. 当选层梯度  $G_sAMP=60$  时, 选层厚度比  $G_sAMP=80$  时选层厚度厚, 成像样品就多, 因而信号就强. 信号强, 图像就比较亮图 11(b). 对于自旋回波成像, 选层厚度决定了图像的分辨率和信号的强弱. 为了提高分辨率减小选层厚度的话, 那么信号强度也会减弱, 所以要折中选择层厚.



(a)  $G_sAMP = 80$                       (b)  $G_sAMP = 60$

图 11 层厚对信号的影响: 选层梯度小 60, 层厚厚, 信号强

图 12 显示了累加次数的影响对信噪比的影响. 累加次数越多, 信噪比就越大图 12(b).



(a)  $NS = 4$                               (b)  $NS = 8$

图 12 累加次数对信噪比的影响

图 13 给出了不同脉冲重复时间  $D_0$  的影响.  $D_0$  长, 猪肉在下一个脉冲序列来时有了充分的弛豫, 信号增强; 由于信号强度  $S(T_E, T_R) \approx AN(H)(1 - e^{-T_R/T_1})e^{-T_E/T_2}$ , 当  $D_0$  很长, 即当  $TR \gg T_1$ ,  $1 - e^{-T_R/T_1} \approx 1$ ,  $T_1$  的影响减小. 肥肉的  $T_1$  小于瘦肉的  $T_1$ , 但当  $D_0=1000$  ms 时, 它们的信号区别变小.

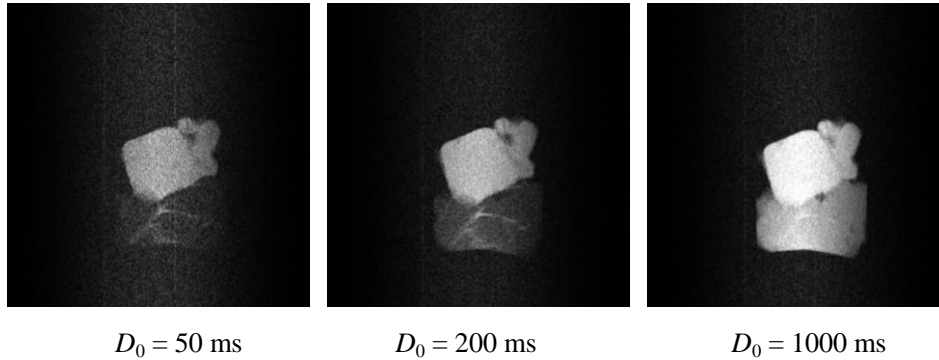


图 13 不同脉冲重复时间  $D_0$  的影响

图 14 观察到了猪肉的卷褶伪影的图像. 若选择的视野太小, 未能把所有的样品都包含在内, 则视野以外的样品也会产生信号. 这个信号同样会被线圈采集到, 这个信号由于采样定理和 A/D 转换将会被折叠到设定的采样谱宽内, 形成卷褶伪影.

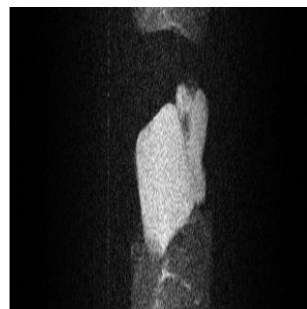


图 14 卷褶伪影

图 15 给出了不同的切片位置图像. 仪器空间的磁场均匀性为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , 样品试管直径  $10\text{ mm}$ , 样品切片位置为  $\pm 5\text{ mm}$ . 用 SlicePos 表示.

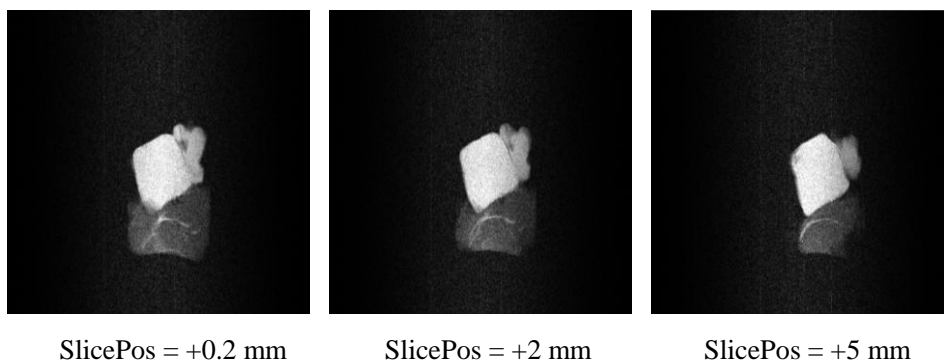


图 15 不同切片位置的图像

#### 4 实验结论

实验测出大豆油的纵向弛豫时间  $T_1$  为 150 ms; 大豆油的横向弛豫时间  $T_2$  为 48 ms; 猪肉的自旋回波成像信号强度与选层厚度正相关, 信噪比与累积次数  $NS$  正相关, 随着脉冲重复时间  $D_0$  增加, 信号增加, 而瘦肉和肥肉的对比度随着  $D_0$  的进一步加长差别减小, 自旋回波成像可以选择不同层面成像, 如果视野选择太小, 可以出现卷褶伪影. 这是自旋回波成像要避免的.

#### 参考文献:

- [1] 臧充之, 张洁天, 彭培芝, 等. 核磁共振弛豫时间测量数据处理方法的讨论[J]. 物理实验, 2005, 25(5): 45~47.
- [2] 熊国欣, 李立本. 核磁共振成像原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007, 8.
- [3] 汪红志, 张学龙, 武杰, 等. 核磁共振成像技术实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 1.
- [4] 赵喜平. 磁共振成像[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 11.
- [5] 戴乐山, 戴道宣. 近代物理实验[M]. 北京: 高等出版社, 2006: 170-176; 358-370.

# 扩展发光微生物检测急性毒物应用范围的算法研究

魏胜非, 李忠民, 陈彩云, 夏 彬

(东北师范大学 物理学院, 吉林 长春, 130024)

**摘 要:** 为了使发光微生物检测急性毒物的方法可以在更大的温度范围内应用, 需要对其算法进行研究。通过对发光微生物在不同的温度条件下, 毒物对发光微生物的发光强度的影响实验, 得到了相应的实验数据。对这些数据分别采用曲面拟合算法、查表法、查表曲面拟合算法、快速查表均值估算法, 进行了分析, 分析结果表明: 曲面拟合算法和查表曲面拟合算法均不适合于在线监测; 查表法和快速查表均值估算法均适合于在线监测。

**关键词:** 发光微生物; 急性毒物; 曲面拟合算法; 查表法

## 1 引言

水环境安全是关系到人类社会健康发展的大事。近年来, 多次发生急性污染物污染水环境的事件, 特别是污染饮用水源, 造成极大的安全隐患。污染事件一旦发生, 对其进行快速预警是减少财产损失及人员伤亡的重要步骤, 因而对水环境的毒物污染预警, 特别是急性毒物污染的预警是非常重要的<sup>[1]</sup>。

对水环境污染急性污染物的检测方法可以分为化学方法和生物方法。化学法检测结果精确, 但是费用高, 时间长(一般需要 24h 以上), 且需要将样品送往实验室。生物方法可以快速定性, 因而是经常使用的手段。生物方法可以细分为鱼、水蚤、发光微生物等方法, 其中发光微生物法应用最为普遍。发光细菌是一类在正常的生理条件下能够发射可见荧光的细菌, 这种可见荧光波长在 450~490nm 之间。发光机理的研究表明, 不同种类的发光细菌的发光机理是相同的, 是由特异性的荧光酶(LE)、还原性的黄素(FMNH<sub>2</sub>)、八碳以上长链脂肪醛(RCHO)、氧分子(O<sub>2</sub>) 所参与的复杂反应:



细菌生物发光反应是由分子氧作用, 胞内荧光酶催化, 将还原态的黄素单核苷酸(FMNH<sub>2</sub>)及长链脂肪醛氧化为 FMN 及长链脂肪酸, 同时释放出最大发光强度在波长为 450~490nm 处的蓝绿光<sup>[2]</sup>。当发光微生物遇到水中急性毒物时, 生理机能受到影响其发光强度减弱。急性毒物含量愈高发光强度愈小, 将发光强度变化的信号提取出来即可测量毒物的含量<sup>[3]</sup>。

利用发光微生物进行急性毒物检测时, 温度一般需要在室温下进行, 可是当在室外检测, 特别是进行实时监测时, 温度条件不能满足要求<sup>[4]</sup>。为了可以使发光微生物检测毒性方法的应用范围更大一些, 特别能够满足室外实际监测条件的要求, 本文探讨非室温条件下, 温度因素对发光微生物检测急性毒物的影响, 以期通过去除影响, 扩大应用范围。

## 2 设备及材料

青海湖菌 Q67 冻干粉购自华东师范大学, 复苏液为 0.8%NaCl 溶液稀释液, 购于北京滨松公司。苯酚等化学试剂均采用分析纯。温度计 WNG 常新仪表厂。

**资助项目:** 吉林省科技厅自然科学基金项目(201215004)

**作者简介:** 魏胜非(1964—), 吉林省吉林市人, 副教授, 博士研究生, 从事传感器、环境工程方面的研究。



### 3 研究方法

分别采用二维回归分析法(曲面拟合法)、查表法、查表曲面拟合法、快速查表均值估算法对发光微生物毒性及温度对其检测结果影响进行理论分析。分别研究在室温下,污染物的急性毒性对发光微生物发光强度的影响;不同温度对发光微生物发光强度的影响。对利用四种方法的优劣进行比较。

#### 3.1 发光微生物检测急性毒物的曲面拟合法

不仅急性毒物的含量对发光微生物的光强变化具有影响,而且环境温度对其也具有影响,因而二者的因素都需考虑。发光微生物的发光强度通过光电倍增管转化为电信号输出,以  $U$  表示其输出的电压。用  $U$  表示的输出电压,反应了光强的变化,因而可以表示光强的改变。毒物含量以  $D$  表示;温度以  $T$  表示。以  $a_0$ - $a_5$ 、 $b_0$ - $b_5$  表示常系数,  $e_1$ 、 $e_2$  表示高价无穷小,则急性毒物含量  $D$  可以用下式表示:

$$D=f(U,T) \quad (1)$$

光电倍增管的输出电压  $U$  可以用下式表示:

$$U=g(D,T) \quad (2)$$

由二维坐标  $(U_i, T_i)$  决定的  $D_i$  可用二次曲面拟合方程表示:

$$D=a_0+a_1U+a_2T+a_3U^2+a_4UT+a_5T^2+e_1 \quad (3)$$

由二维坐标  $(D_i, T_i)$  决定的  $U_i$  可用二次曲面拟合方程表示:

$$U=b_0+b_1D+b_2T+b_3D^2+b_4DT+b_5T^2+e_2 \quad (4)$$

根据最小二乘法求得的系数满足均方误差最小条件。由二次曲面拟合方程计算得到的  $D(U_k, T_k)$  与标定值  $D_k$  之间存在误差  $\Delta_k$ , 其方差  $\Delta_k^2$  为:

$$\Delta_k^2=[D_k - D(U_k, T_k)]^2 \quad (5)$$

$$K=1, 2, \dots, m \times n$$

总计有  $m \times n$  个标定点, 其均方误差  $R_1$  应最小:

$$R_1 = \frac{1}{m \times n} \sum_{k=1}^{m \times n} [D_k - (a_0 + a_1U + a_2T + a_3U^2 + a_4UT + a_5T^2)]^2 \quad (6)$$

可见均方误差  $R_1$  是常系数  $a_0$ - $a_5$  的函数。根据多元函数求最小极值条件得出如下式:

$$\frac{\partial R_1}{\partial a_0} = 0; \quad \frac{\partial R_1}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial R_1}{\partial a_2} = 0; \quad \frac{\partial R_1}{\partial a_3} = 0; \quad \frac{\partial R_1}{\partial a_4} = 0; \quad \frac{\partial R_1}{\partial a_5} = 0$$

设  $m \times n = c$ , 求得下述方程:

$$a_0c + a_1 \sum_{k=1}^c U_k + a_2 \sum_{k=1}^c T_k + a_3 \sum_{k=1}^c U_k^2 + a_4 \sum_{k=1}^c U_k T_k + a_5 \sum_{k=1}^c T_k^2 = \sum_{k=1}^c D_k \quad (7)$$

$$a_0 \sum_{k=1}^c U_k + a_1 \sum_{k=1}^c U_k^2 + a_2 \sum_{k=1}^c U_k T_k + a_3 \sum_{k=1}^c U_k^3 + a_4 \sum_{k=1}^c U_k^2 T_k + a_5 \sum_{k=1}^c U_k T_k^2 = \sum_{k=1}^c U_k D_k \quad (8)$$

$$a_0 \sum_{k=1}^c T_k + a_1 \sum_{k=1}^c U_k T_k + a_2 \sum_{k=1}^c T_k^2 + a_3 \sum_{k=1}^c U_k^2 T_k + a_4 \sum_{k=1}^c U_k T_k^2 + a_5 \sum_{k=1}^c T_k^3 = \sum_{k=1}^c T_k D_k \quad (9)$$

$$a_0 \sum_{k=1}^c U_k^2 + a_1 \sum_{k=1}^c U_k^3 + a_2 \sum_{k=1}^c U_k^2 T_k + a_3 \sum_{k=1}^c U_k^4 + a_4 \sum_{k=1}^c T_k U_k^3 + a_5 \sum_{k=1}^c U_k^2 T_k^2 = \sum_{k=1}^c U_k^2 D_k \quad (10)$$

$$a_0 \sum_{k=1}^c U_k T_k + a_1 \sum_{k=1}^c U_k^2 T_k + a_2 \sum_{k=1}^c U_k T_k^2 + a_3 \sum_{k=1}^c U_k^3 T_k + a_4 \sum_{k=1}^c T_k^2 U_k^2 + a_5 \sum_{k=1}^c U_k T_k^3 = \sum_{k=1}^c U_k T_k D_k \quad (11)$$

$$a_0 \sum_{k=1}^c T_k^2 + a_1 \sum_{k=1}^c T_k^2 U_k + a_2 \sum_{k=1}^c T_k^3 + a_3 \sum_{k=1}^c U_k^2 T_k^2 + a_4 \sum_{k=1}^c T_k^3 U_k + a_5 \sum_{k=1}^c T_k^4 = \sum_{k=1}^c T_k^2 D_k \quad (12)$$

上述六式  $a_0$ - $a_5$  为未知数, 其余为已知数, 代入相应数据即可解出  $a_0$ - $a_5$  系数, (3) 式即可确定, 同理可以列出关于  $b_0$ - $b_5$  六个方程式, 解出  $b_0$ - $b_5$  系数, 即可确定 (4) 式。温度对发光微生物发光强度的影响可以通过上述计算得以抑制, 这样就相当于在一定范围内拓宽了发光微生物检测污染物急性毒性的应用温度范围。

### 3.2 查表法

所谓查表法就是列出在某一温度下, 毒物浓度对应的发光微生物发光强度的列表。例如: 温度为  $19^\circ\text{C}$  的毒物浓度对应发光微生物发光强度的列表, 通过发光微生物的发光强度就可以确定毒物浓度。这需要对应于不同的温度建立一个数据库。该方法简单易行, 但是需要做大量的相应毒物与发光微生物发光强度的标定实验, 以建立数据库。该方法的缺点是对于在两个温度之间没有建立列表的发光强度, 其毒物浓度值没有办法处理, 只能估算。如列表有  $19.7^\circ\text{C}$  和  $19.9^\circ\text{C}$  时, 毒物与发光微生物发光强度的标定实验值, 而此时温度传感器测得的温度值为  $19.8^\circ\text{C}$ , 表中没有列出相应的值, 只能估算。

### 3.3 查表曲面拟合算法

查表曲面拟合算法是基于查表法的一种算法。当在应用查表法时, 没有列出的温度及发光强度时, 以此列出的最近的两个值为区间, 结合曲面拟合算法进行拟合。该方法可以较精确的接近真值, 但计算量较大。

### 3.4 快速查表均值估算法

快速查表线性估算法是查表法的扩展。它基于查表法。当查表法中未列出所查的温度及发光强度时, 估算时以最近两个值的中间值为所查值。该法可以快速取得所测值, 计算量相对较小, 但误差较大。

## 4 实验

发光微生物的标定实验分为两个部分。第一部分进行在不同温度下的发光微生物发光强度实验; 第二部分为不同毒物含量下的发光微生物发光强度的实验。急性毒物选用苯酚, 将苯酚配置成  $0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5(\text{mg/mL})$ , 实验温度选择  $18-28^\circ\text{C}$  每隔  $0.2^\circ\text{C}$ 。实验过程为将发光微生物冻干粉从冰箱取出后, 配置成溶液放入恒温箱, 温度分别调至实验温度, 相应加入苯酚溶液, 每组实验取 3 个平行样, 结果取其均值。由于篇幅所限仅列出  $18-28^\circ\text{C}$  每隔  $2^\circ\text{C}$  的值, 如表 1 所示。

表 1  $18-28^\circ\text{C}$  每隔  $2^\circ\text{C}$  发光微生物不同温度及不同毒物浓度发光强度表

U(P) \ D \ T	0(mg/mL)	0.1(mg/mL)	0.2(mg/mL)	0.3(mg/mL)	0.4(mg/mL)	0.5(mg/mL)
$18^\circ\text{C}$	4152	3360	2981	2368	1662	1198
$20^\circ\text{C}$	4724	3772	3412	3071	1899	1371
$22^\circ\text{C}$	4936	4022	3613	2774	2032	1184
$24^\circ\text{C}$	4897	3960	3498	2793	1957	1120
$26^\circ\text{C}$	4756	3818	3428	2711	1912	1359
$28^\circ\text{C}$	4554	3691	3370	2607	1821	1301

## 5 数据分析

通过表 1 可以看出,当温度不同时,发光微生物的发光强度不同。接近室温时发光强度最强。距离室温距离越大,其发光强度下降越大。其原因在于发光微生物的生长需要一定的温度环境,可能是酶的作用需要满足一定条件的结果。随着苯酚含量的增加,微生物的发光强度减弱。不论环境温度的高低都呈现这一现象,可能是苯酚破坏了微生物的细胞膜结构,以及对酶的活动造成影响所致。

分别采用发光微生物检测急性毒物的曲面拟合算法、查表法、查表曲面拟合算法、快速查表均值估算法对 6 个浓度毒物下, 18-28℃每隔 0.2℃数值进行处理。采用 matlab 解方程。曲面拟合算法在超过 2℃区间,误差大于 20%,计算量大,不适合于在线监测。误差产生的原因主要为计算误差和实验误差,特别是计算误差,主要是计算机的截断误差所致。查表法快速、计算量小,但需要组建数据库,误差可以小于 20%,满足在线监测的要求。在未列出数据处理上仅能给出数值范围,不够精确,但是能满足定性监测要求。查表曲面拟合算法,误差小于 10%。计算量大,速度较慢,不适于快速检测。快速查表均值估算法,误差小于 20%。速度快,计算量小,适合于在线监测,满足定性监测要求,该算法的依据是室温下,毒物对发光微生物法发光强度的影响为直线<sup>[5]</sup>。

## 6 结论

通过以上实验可以得出如下结论:

- 1) 当温度不同时,发光微生物的发光强度不同。接近室温时发光强度最强。距离室温距离越大,其发光强度下降越大;
- 2) 曲面拟合算法在超过 2℃区间,误差大于 20%,计算量大,不适合于在线监测;
- 3) 查表法快速、计算量小,但需要组建数据库,误差可以小于 20%,满足在线监测的要求;
- 4) 查表曲面拟合算法,误差小于 10%。计算量大,速度较慢,不适于快速检测;
- 5) 快速查表均值估算法,误差小于 20%。速度快,计算量小,适合于在线监测,满足定性监测要求。

## 参考文献:

- [1] 魏胜非,陈彩云,许德玄。基于青海弧菌 Q67 的饮用水取水环境虚拟检测仪器[J]。东北师大学报:自然科学版,2010,42(2):143-146。
- [2] 朱文杰,郑天凌,李伟民。发光细菌与环境毒性检测[M]。中国轻工业出版社,2009:208-209。
- [3] Bulich A A. Use of luminescent bacteria for determining toxicity in aquatic environments [J]. In L.L. Marking & R. Akimerle, eds, Aquatic Toxicology STP667. Philadelphia, PA, American Society for Testing and Materials, 1979: 98-106.
- [4] William H. van der Schalie, Tommy R. Shedd, Paul L. Knechtges, Mark W. Widder Using higher organisms in biological early warning systems for real-time toxicity detection [J] Biosensors & Bioelectronics 16 (2001): 457-465.
- [5] Wanger V O, Blevins R D. Chemically-Induced Histone Modification as a Predictor of Carcinogenicity [J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2002, 25(2): 260-265.

## The Research for Algorithms to Extend Applicable Range of the Way to Detect Acute Toxicity by Luminous Microorganisms

Wei Sheng-fei, Li Zhong-min, Chen Cai-yun, Xia Bin

(School of physics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

**Abstract:** It is necessary to study its algorithm to make the way to detect acute toxicity by microbe applied in larger temperature range. The corresponding experimental data had been obtained by the experiment that the acute toxicity affects the luminous intensity of luminous microorganisms at different temperatures. These data had been respectively analyzed by four kinds of ways. These ways respectively are the methods of fitting curved surface, look-up table method, method of a look-up table and fitting surface, method of fast table lookup and average estimate. The analysis results show that a method of fitting curved surface and a method of look-up table and fitting surface are not suitable for on-line monitoring; the method of Look-up table and the method of the fast look-up table and average estimation are suitable for on-line monitoring.

**Key words:** luminous microorganisms; acute toxicity; fitting curved surface algorithm; Look-up table method

# 用 X 射线衍射仪测量普朗克常量

王合英, 孙文博

(清华大学 物理系, 北京 100084)

**摘要:** 本文讨论了用 X 射线衍射仪测量普朗克常量  $h$  的误差来源和改进方法. 由于仪器结构和所用透明单晶样品对谱线的展宽效应使不同电压对应的最短波长测量值减小, 在计算普朗克常量时应对实验测量的各最短波长进行修正. 结果表明用修正的最短波长拟合得到的普朗克常数与理论值基本一致.

**关键词:** 普朗克常量; X 射线衍射仪; X 射线谱线展宽

## 1 引言

普朗克常量是人类探索自然的过程中最伟大的发现之一, 在物理学发展史上是一个重要的里程碑, 它是联系经典物理和近代物理的桥梁. 我国各高等院校普遍开设了用光电效应法测量普朗克常数的实验, 但实验误差较大. 不少文献对此进行了分析与讨论<sup>[1-3]</sup>. 叶企孙先生曾于 1921 年在 Harvard 大学用 x 射线测量普朗克常量的值<sup>[4]</sup>. 本文介绍用 x 射线衍射仪测量普朗克常数的方法, 并讨论其误差来源和改进方案.

## 2 实验原理

X 射线的产生是利用高速电子和物质原子的碰撞来实现. 从 X 射线管发出的 X 射线分为连续光谱和特征光谱. 高速电子到达阳极靶表面时, 电子的运动突然受阻. 根据电磁场理论, 这种电子产生轫致辐射, 向外发射电磁波. 由于电子的数量很多, 它们到达阳极靶上的条件和时间不同, 而且入射电子的能量未完全转化为 x 射线或转化程度不一样, 因而形成具有各种波长的连续 x 射线谱. 连续谱中的最短波长相当于最大的电子能量, 即短波限波长或截止波长  $\lambda_{\min}$ . 截止波长与靶材料的种类无关, 仅取决于外加电压  $U$  的大小. X 射线管高压越高最短波长越短. 1915 年美国物理学家 William Duane 和 Franklin L. Hunt 发现最短波长的倒数与所加高压成正比, 称为 Duane-Hunt 关系.

Duane-Hunt 关系可以用量子理论解释: 能量为  $eU$  的电子和物质碰撞产生光子时, 量子的能量最多等于电子的能量, 因此辐射必定有一个频率上限  $\nu_{\max}$ , 对应最短波长  $\lambda_{\min}$ , 则有:

$$h \cdot \nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} = eU \quad (1)$$

式中  $h$  为普朗克常量,  $c$  为光速,  $e$  为电子电荷. 由此可得:

$$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e} \cdot \frac{1}{U} \quad (2)$$

(2) 式为 Duane-Hunt 关系. 本实验利用 x 射线衍射测量经 NaCl 单晶反射不同电压下产生

---

**作者简介:** 王合英 (1965-), 女, 山东单县人, 博士, 清华大学物理系副教授, 主要从事近代物理实验教学工作.

的 x 射线连续谱, 根据连续谱强度的变化确定不同电压对应的最短波长, 对  $\lambda_{\min} \frac{1}{U}$  直线拟合, 求出 Duane-Hunt 关系式中比例系数, 进而求出普朗克常数  $h$ .

X 射线连续谱波长的确定依据布拉格公式

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \vartheta \quad (3)$$

式中  $\vartheta$  为掠射角,  $d$  为 NaCl 晶面间距. 已知 NaCl (100) 的晶面间距  $d = 282.01\text{pm}$ , 根据测量的衍射角用公式 (3) 计算相应的 x 射线连续谱波长.

### 3 实验

本实验用德国 leybold 教学仪器厂生产的 X 射线衍射仪通过 NaCl 单晶反射得到不同电压下 x 射线连续谱, 求出不同电压下 x 射线连续谱的最短波长. 所用 x 射线由电子轰击 Mo 靶产生. 测量时首先对 x 射线衍射仪的测角仪用 NaCl 单晶衍射进行校准, 以保证测量角度的准确性, 进而保证计算出最短波长的准确性. 测量普朗克常量时 x 光管的电压变化范围为 22–35 KV, 电流 1mA, 测量角度范围为  $2.5^\circ - 6.5^\circ$ ; 角步幅  $0.1^\circ$ ; 以耦合扫描方式, 使传感器与靶台转角按 2:1 耦合转动, 用计算机进行数据采集和处理.

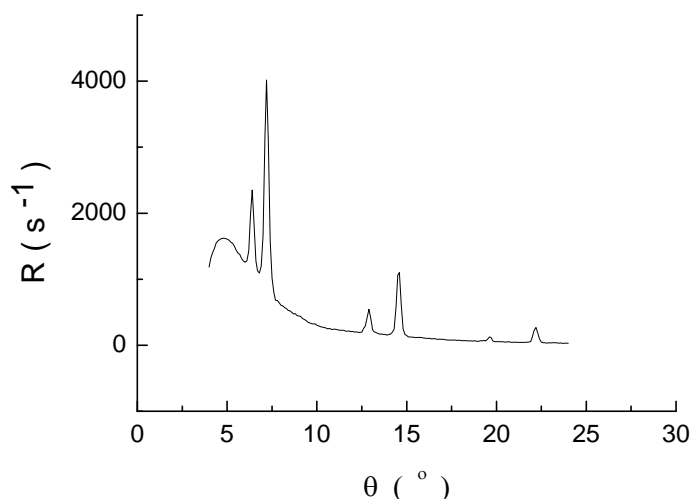


图 1 NaCl 单晶(100)晶面的 X 射线衍射谱

### 4 结果分析与讨论

图 1 给出用耦合扫描方式得到 NaCl 单晶样品 (100) 晶面的 X 射线衍射谱. 从图 1 可以看出 X 射线谱是由连续谱上叠加两个特征峰  $K_\beta$  和  $K_\alpha$  组成的, 六个衍射峰分别对应 x 射线特征谱线  $K_\beta$  和  $K_\alpha$  在 NaCl (100) 晶面的一级、二级和三级衍射.  $K_\alpha$  的一级衍射峰对应的入射角为  $7.2^\circ$ ; 与理论值相符, 说明仪器的角度测量准确.

用此 NaCl 单晶作为样品, 改变电压, 在  $2.5^\circ - 6.5^\circ$  范围分别测量不同电压下 X 射线连续谱如图 2 所示.

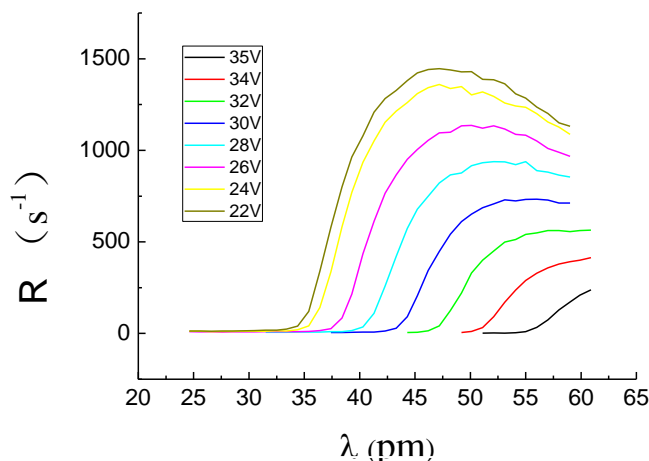


图2 不同电压下 NaCl 单晶反射得到的 X 射线连续谱

根据上图利用线性拟合得到不同电压对应的 x 射线的最短波长如表 1。

表 1 不同电压下 x 射线连续谱的最短波长

U / kV	22	24	26	28	30	32	34	35
$\lambda_{\min}$ (pm)	55	50.1	46.2	43.2	40.2	37.2	35.2	34.3

将  $\lambda_{\min}$  和  $1/U$  进行线性拟合, 得到拟合直线斜率  $A=1215.6 \text{ pm KV}$ . 由 (2) 式知

$$A = \frac{hc}{e} \quad (4)$$

由(4)式计算得到普朗克常数  $h=6.49 \times 10^{-34} \text{ Js}$ , 小于理论值  $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ .

用线性拟合方法确定最短波长, 与实验者选取拟合的线性区间有很大关系, 造成一定的随机误差. 但从学生做实验的结果看, 几乎所有学生用这种方法计算出的普朗克常数都略小于理论值, 说明这种方法测量普朗克常数的误差不仅来源于拟合数据取值的随机误差, 还应有其它误差来源.

X 射线衍射仪的谱线峰型既和仪器的构造、实验条件有关, 也和实验所用样品的结构有关. 本实验所用的 x 射线衍射仪结构比较简单, X 射线入射斜缝和出射狭缝是固定斜缝, 且有一定宽度, 同时仪器的响应函数并不是 Delta 函数, 导致测得的谱线有一定展宽. 最重要的是所用 NaCl 单晶样品是透明晶体, 即使不考虑晶体内缺陷或应力的影响, 透明晶体对射线吸收系数小, 使得入射到样品的 x 射线不仅在样品表面发生反射, 样品内部的晶面也发生较强的反射, 导致峰宽增加. 以上因素都使在不同电压下得到的截止波长  $\lambda_{\min}$  比实际的截止波长小, 从而导致普朗克常量  $h$  的测量值偏小. 为了较精确地测量普朗克常数, 就应对谱线展宽造成的截止波长变小的影响进行修正.

据文献报道, Mo 原子所产生的 x 射线特征谱中的  $K_{\alpha} = 71.08 \text{ pm}$  谱线的自然展宽约为  $\text{FWHM}=0.026 \text{ pm}^{[5]}$ , 而从图 1 NaCl 单晶衍射图中的实验数据测得一级衍射峰的半峰宽  $\text{FWHM}$  (Full width at half maximum) 约为  $2.4 \text{ pm}$  ( $35 \text{ kV}$  加速电压), 比自然展宽大近两个数量级, 说明谱线展宽对实验结果有重要的影响. 我们可以利用 NaCl 单晶产生的一级布拉格衍射峰测量该仪器在实验中产生的两条特征谱线的展宽, 利用该展宽值对极限波长法测  $h$

中测得的  $\lambda_{\min}$  进行修正，以得到比较真实的最短波长  $\lambda_{\min}$ 。

表 2 不同电压对应的  $K\alpha$  特征谱线的 FWHM 以及对应  $\lambda_{\min}$  的修正值  $\lambda_{\min}^*$

U / kV	I / mA	FWHM of $K_{\alpha}$ / pm	$\lambda_{\min}$ / pm	$\lambda_{\min}^*$ / pm
35	1.00	2.4	34.3	35.5
34	1.00	2.4	35.2	36.4
32	1.00	2.4	37.2	38.5
30	1.00	2.4	40.2	41.4
28	1.00	2.4	43.2	44.6
26	1.00	2.4	46.2	47.4
24	1.00	2.4	50.1	51.3
22	1.00	2.2	55.0	56.1

由于最短波长与电压有关，要对不同电压下的最短波长进行修正，应测量不同电压下的 NaCl 晶体 X 射线衍射峰的 FWHM 的大小，然后用拟合得到的  $\lambda_{\min}$  值加上这些 FWHM 的一半就可以得到修正后的  $\lambda_{\min}^*$ 。

在不同加速电压下测量得到的特征谱线  $K\alpha$  的半峰宽 FWHM、最短波长  $\lambda_{\min}$  及最短波长修正值  $\lambda_{\min}^*$  见表 2。表 2 中前两列数据分别为 X 射线管的电压和电流，第三列是不同电压条件下 Mo 原子的特征谱  $K_{\alpha}$  线经 NaCl 单晶 (100) 晶面衍射形成的一级衍射峰的半峰宽 FWHM 值；第四列  $\lambda_{\min}$  为不同电压下测量 x 射线连续谱的最短波长值，第五列  $\lambda_{\min}^*$  为用半峰宽对谱线展宽效应修正后的最短波长。谱线展宽效应的修正方法由 (5) 式给出：

$$\lambda_{\min}^* = \lambda_{\min} + FWHM / 2 \quad (5)$$

过原点作表 2 中  $\lambda_{\min}^* - \frac{1}{U}$  的直线拟合图，如图 3 所示。得到线性拟合系数为  $A^* = 1237.7 \text{ pm}\cdot\text{KV}$ 。将  $A^* = 1237.7 \text{ pm}\cdot\text{KV}$  代入 (4) 式，计算出普朗克常数  $h = 6.61 \times 10^{-34} \text{ Js}$ 。可见对最短波长修正后得到的普朗克常量较修正之前更接近真实值  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ 。这表明用 x 射线衍射仪测量普朗克常数时应考虑仪器结构和透明单晶样品反射所造成的谱线展宽的影响。用衍射峰半峰宽对 x 射线连续谱的最短波长加以修正，是用 x 射线衍射仪精确测量普朗克常数的有效方法。



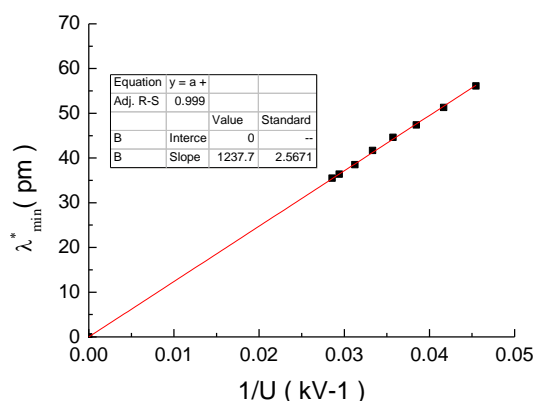


图3  $\lambda_{\min}^* - \frac{1}{U}$  过原点的直线拟合图

## 5 结论

本实验用 x 射线衍射仪通过测量不同电压下 x 射线连续谱的最短波长, 利用 Duane-Hunt 关系测算普朗克常量. 考虑到因仪器结构和所用透明单晶样品对谱线的展宽效应使不同电压对应的最短波长测量值减小, 我们用衍射方法得到该仪器相同实验条件下的谱峰展宽值, 然后对实验测量的各最短波长进行修正. 结果表明最短波长修正后得到的普朗克常数与理论值基本一致. 因此, 用测量 x 射线截止波长的方法精确地测量普朗克常数时, 应考虑实验仪器和实验条件所产生的谱线展宽效应并对其加以修正.

## 参考文献:

- [1] 汪志刚, 施寿生. 光电效应法测定普朗克常数实验的几个问题[J]. 乐山师范学院学报, 2004, 19(12): 36-38.
- [2] 袁俊辉. 普朗克常数测定的研究[D]. 硕士学位论文.
- [3] 张杰. 普朗克常数的测量和作图误差分析[J]. 物理实验, 1998, 18(3): 21-22.
- [4] W. Duane, H. H. Palmer, and C. S. Yeh. A Remeasurement of the Radiation Constant  $h$  by Means of X-rays [J]. Proc. N. A. S. 1921, (7): 237.
- [5] J. A. Bearden. X-Ray Wavelengths [J]. Rev. Mod. Phys. 1967, (39): 78.

## Measurement of Planck constant by x-ray diffraction apparatus

Wang He-ying, Sun Wen-bo

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The cause of the measurement error and the improved approach for measuring the well-known Planck constant  $h$  by using an x-ray diffraction apparatus have been discussed in this paper. The minimum wavelength in the x-ray spectra decreases with increasing the applied voltage on the X-ray tube, because of the x-ray lines broadening due to the apparatus structure and the transparent single crystal sample used for diffraction, so that the value of the measured minimum wavelength should be revised for calculating the Planck constant. The results show that the value of the Planck constant calculated using the revised data is consistent with the theoretical value of  $h$ .

**Key words:** Planck constant; X-ray diffraction apparatus; broadening of the x-ray line

# 利用光栅单色仪测量红宝石晶体的吸收和发射光谱的教学实验研究

朱 玲, 郑 虹, 王中平, 张 权, 张增明, 孙腊珍  
(中国科学技术大学 物理学院物理实验教学中心, 安徽 合肥 230026)

**摘 要:** 以光栅单色仪为平台, 测量红宝石晶体的吸收光谱和发射光谱, 使学生了解单色仪的工作原理、掌握使用方法的同时, 也让学生了解光的测量方法及光致发光材料的光谱特性, 为学生从事相关的实验研究奠定基础。

**关键词:** 光栅单色仪; 红宝石晶体; 吸收光谱; 发射光谱

## 1 引言

光栅单色仪是用光栅衍射的方法获得单色光的仪器, 它可以从复色光源(不同波长的混合光)中, 通过光栅偏转一定的角度获得特定波长的单色光, 测量该单色光的光强, 获得该单色光的光谱。它的主要功能有两个方面: 一是从复色光源中提取单色光; 二是测量复色光源的光谱。可用来研究物质的辐射特性, 光与物质的相互作用, 物质的结构(原子分子能级结构), 遥远星体的温度、质量、运动速度和方向等。每种光源都有各自独特的谱线, 通过对光源光谱线的测量, 可以进一步了解光源的发光特点, 分析发光机制。在实验室中, 如用光栅单色仪对低压钠灯、汞灯等进行光谱测量, 得到离散的线性光谱, 可以了解钠蒸汽、汞蒸汽等气体放电产生光的特点; 对溴钨灯进行谱线测量, 得到连续光谱线, 学生可以了解固态光源因热辐射而发光的特点; 也可以对各种由光致发光的材料如罗丹明溶液、红宝石晶体等进行光谱线的测定, 来了解光致发光材料的光谱特性等<sup>[1]</sup>。本实验使用 WDS-8 型光栅单色仪, 对光致发光材料—红宝石晶体进行光谱测量。实验目的包括两个方面: 一是让学生了解光栅单色仪的结构及工作原理, 并能够熟练操作; 二是让学生了解红宝石晶体对光的吸收和发射现象, 从而理解物质的原子(离子)能级跃迁所呈现的光谱特性。

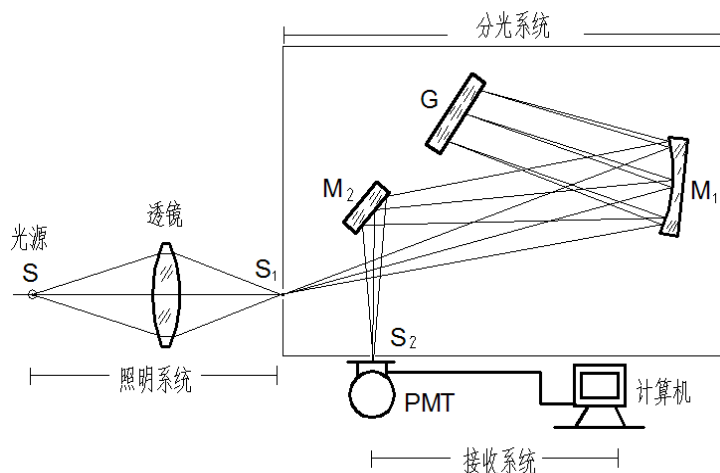
## 2 实验原理

### 2.1 单色仪的结构及工作原理

图 1 给出光栅单色仪的结构框图。光栅单色仪的结构主要由以下三部分组成: 前置光路部分—照明系统, 包括光源和凸透镜; 单色仪内部光路部分—分光系统, 包括入射狭缝、离轴抛物镜、闪耀光栅、平面全反镜、出射狭缝; 数据采集部分—接收系统, 包括光电倍增管和计算机。

---

**作者简介:** 朱玲(1972—), 女, 安徽霍邱人, 中国科学技术大学物理实验教学中心实验师, 学士, 主要从事物理实验教学和实验技术工作。



( $S_1$ —入射狭缝;  $S_2$ —出射狭缝;  $M_1$ —离轴抛物镜;  $G$ —闪耀光栅;  
 $M_2$ —平面全反镜; PMT—光电倍增管)

图 1 光栅单色仪的结构简图及光路

照明系统中的光源发出的复合光经凸透镜会聚于入射狭缝  $S_1$ ,  $S_1$  位于离轴抛物镜  $M_1$  的焦面上, 光通过  $M_1$  变成平行光照射到闪耀光栅  $G$ , 并经过闪耀光栅的衍射返回到  $M_1$ , 经  $M_1$  反射的光经  $M_2$  反射会聚到出射狭缝  $S_2$ , 照射在接受系统的光电倍增管 PMT 上, 将光信号转换为电信号, PMT 与计算机相连, 在计算机上通过关联软件采集数据。闪耀光栅  $G$  转动时, 从  $S_2$  出射的光由短波到长波依次出现, 从而在接收系统中获取单色光<sup>[2]</sup>。

## 2.2 红宝石晶体的能级跃迁

红宝石晶体化学成分为  $Al_2O_3:Cr^{3+}$ , 它是  $Al_2O_3$  单晶中掺有少量的 Cr, Cr 的外层电子构型为  $3d^54s^1$ 。掺入  $Al_2O_3$  晶格后, 失去外层三个电子, 变成三价的  $Cr^{3+}$ , 红宝石晶体的光谱就是  $Cr^{3+}$  离子在 3d 壳上三个电子发生能级跃迁的反应。 $Cr^{3+}$  属 3d 电子组态,  $^4F$  为基态光谱项,  $^2G$  为第一激发态,  $^4P$  为与基态自旋态相同的激发态。 $Cr^{3+}$  处在八面体对称晶场中<sup>[3]</sup>,  $^4F$ 、 $^2G$  两个光谱项晶场又各自劈裂为若干能级。 $^4F$  晶场劈裂为:  $^4T_1(F)$ 、 $^4T_2(F)$ 、 $^4A_2$  (基态) 三个能级;  $^2G$  晶场劈裂为:  $^2T_1$ 、 $^2T_2$ 、 $^2E$ 、 $^2A_1$  四个能级。 $^4P$  晶场无劈裂, 但能态转变为  $^4T_1(P)$ 。

红宝石晶体的吸收光谱, 是反应电子由基态  $^4A_2$  向高能级跃迁产生的跃迁吸收现象。处于基态  $^4A_2$  电子向高能级跃迁, 它要遵循跃迁规则, 即  $\Delta S=0$  (一般四重项只能跃迁到四重项), 跃迁允许, 也即  $^4A_2$  到  $^4T_1(F)$ 、 $^4T_2(F)$ 、 $^4T_1(P)$  跃迁是允许的。 $^4T_1(F)$ 、 $^4T_2(F)$ 、 $^4T_1(P)$  能级分别为  $^4T_1(F)$ :  $25000\text{ cm}^{-1}$ 、 $^4T_2(F)$ :  $17000\text{ cm}^{-1}$ 、 $^4T_1(P)$ :  $39000\text{ cm}^{-1}$ , 对应波长范围:  $^4T_1(F)$ 、 $^4T_2(F)$  在可见光区域,  $^4T_1(P)$  在紫外区域。 $^4A_2 \rightarrow ^4T_1(P)$ 、 $^4A_2 \rightarrow ^4T_1(F)$ 、 $^4A_2 \rightarrow ^4T_2(F)$  产生三个强吸收带。因  $\Delta S \neq 0$  (低能态是四重项, 高能态是二重项),  $^4A_2$  到  $^2T_1$ 、 $^2T_2$ 、 $^2E$  的跃迁是禁阻的, 只能产生禁阻跃迁线, 出现很弱吸收线。

红宝石晶体的发射光谱是吸收光谱的逆过程。跃迁到高能级  $^4T_1(F)$ 、 $^4T_2(F)$ 、 $^4T_1(P)$  上的电子 (处于高能级上的电子是不稳的) 无辐射跃迁到激发态  $^2E$ ,  $^2E$  态又称为亚稳态, 能级为  $14400\text{ cm}^{-1}$ , 寿命比较长, 约 5 ms。由于晶体场以及自旋-轨道耦合因素,  $^2E$  又劈裂为间隔  $29\text{ cm}^{-1}$  双重能级。处在双重能级上的电子, 再返回跃迁到基态  $^4A_2$  上 (整个跃迁过程, 打破了  $\Delta S=0$  的跃迁规则, 这是晶场的作用和自旋-轨道相互作用的结果), 在返回跃迁的过程中通过慢的自发辐射释放能量而产生光<sup>[4-5]</sup>。在可见光区域中红宝石晶体  $Cr^{3+}$  能级及相关跃迁过程如图 2。在图中,  $^4A_2$  为基态,  $^4T_1(F)$ 、 $^4T_2(F)$  是两个强吸收带,  $^2E$  是亚稳态,  $R_1$ 、 $R_2$  是  $^2E$  态双重能级和  $^4A_2$  能级之间产生跃迁对应的两条强荧光线<sup>[6]</sup>。

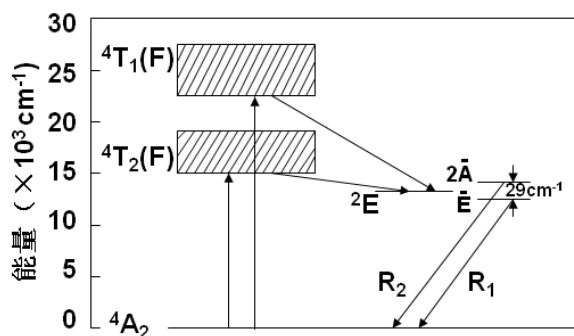


图2 红宝石晶体中  $\text{Cr}^{3+}$  能级及相关跃迁过程

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 光栅单色仪波长校准

在对红宝石晶体的光谱进行测量之前，首先要对光栅单色仪校准，以减小测量误差。利用已知钠灯的主线系的两条分离谱线（理论波长为 589.0 nm，589.6 nm），作为已知波长，对单色仪测量波长进行校准，校正在使用过程中产生的波长位置误差，最大程度保证测量波长位置的准确性。具体过程：实验光路如图 1，光源为钠灯，入射狭缝宽度为 0.15 mm，出射狭缝宽度为 0.1 mm，光电倍增管的高压为 -316 V，利用计算机关联软件程序设定合理的测量范围获取钠灯的双谱线，测得峰值位置数据，与理论值比较大小，对波长校准。校准后的测量谱线（峰值位置：589.0 nm，589.58 nm）如图 3 所示。

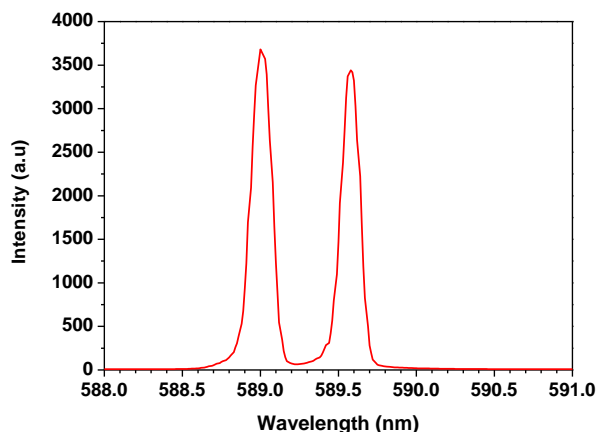


图3 钠灯主线系光谱

#### 3.2 测红宝石晶体的吸收光谱

红宝石晶体对不同波长的入射光吸收不同，吸收系数随入射光波长（或频率）变化叫吸收光谱，它表明在每一波长（或频率）上所吸收或透过的辐射量。纵坐标是吸收度（或光密度），横坐标是波长（或频率）。吸收度（或光密度）用 O.D 表示<sup>[7]</sup>，可以用如下公式求得：

$$O.D = \log_{10}(I_0/I) \quad (1)$$

$I_0$  是入射光强度， $I$  是出射光强度。实验光源为溴钨灯，测量范围从 350 nm 到 700 nm。先测量无红宝石晶体时的溴钨灯发射光谱光强数据，作为入射光强度  $I_0$ ，用 origin 绘图软件绘出溴钨灯发射光谱，实验光路如图 1，透镜焦距  $f=100$  mm，入射狭缝宽度为 0.15 mm，出射狭缝宽度为 0.1 mm，光电倍增管高压为 -605 V，光谱如图 5。然后，在同等测量条件下，改变前置光路部分，将红宝石晶体放置在入射狭缝与透镜之间，经透镜后的会聚光束正入射红宝石晶体光学面，测放入红宝石晶体后的出射光谱光强数据，作为出射光强度  $I$ ，用 origin 绘图软件绘出放入红宝石晶体后的出射光谱，光谱如图 6，放入红宝石晶体实验光路如图 4。

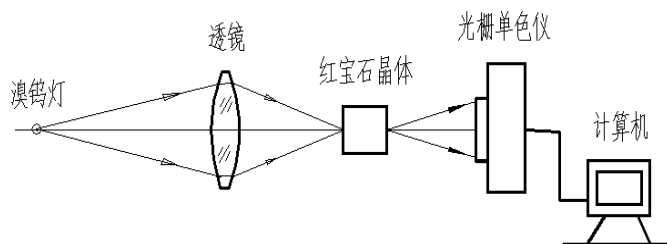


图4 测量红宝石晶体的吸收光谱的光路图。

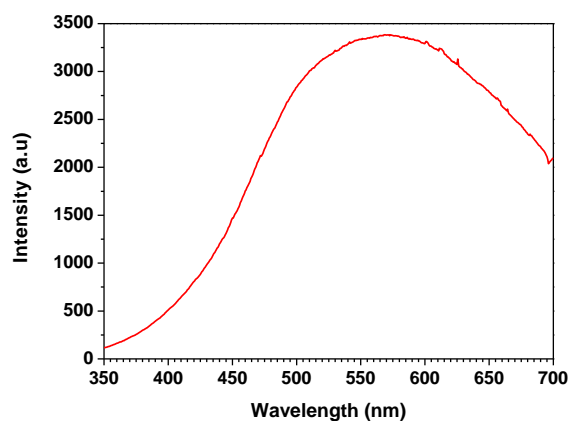


图5 溴钨灯的发射光谱

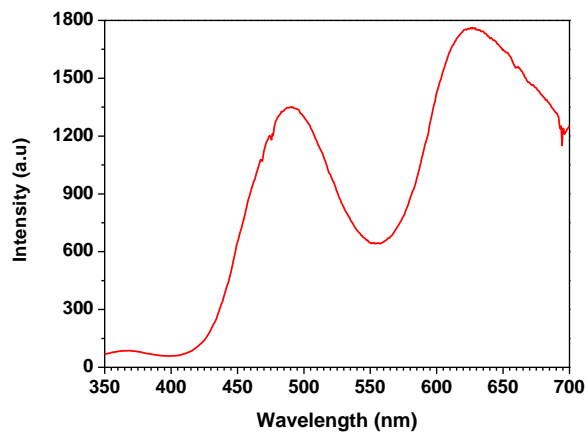


图6 溴钨灯透过红宝石晶体的光谱

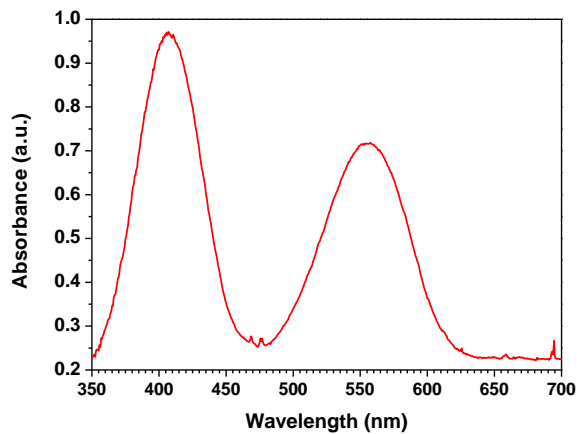


图7 红宝石晶体的吸收光谱

将测得的入射光强度  $I_0$  和出射光强度  $I$ ，在 origin 绘图软件里用公式 (1) 进行处理，得到吸收度 O.D 的值，以 O.D 的值为纵坐标，波长为横坐标，绘出红宝石晶体的吸收光谱曲线，光谱如图 7。在图 7 中，红宝石晶体出现两个强吸收带，吸收峰位置分别在 406.9 nm、557.5 nm(理论峰值位置:404.7 nm、576.3 nm)，两个强吸收带分别对应图 2 中强吸收带  ${}^4T_1(F)$ 、 ${}^4T_2(F)$ 。两个吸收带的带宽有 100 nm 左右， $Cr^{3+}$ 吸收两个带宽中任一波长的光，都能激发  $Cr^{3+}$ 跃迁，产生跃迁吸收现象。

### 3.3 测红宝石晶体的发射光谱

用波长为 532 nm、功率为 50 mW 的半导体激光器作为激发光源。改变前置光路部分，将红宝石晶体放置在透镜与光源之间，并使激光束与红宝石晶体光学面成一定角度(从保护光电倍增管角度出发，避免经透镜会聚后的强光进入入射狭缝，损坏光电倍增管)，实验光路如图 8，测量范围从 691 nm 到 696 nm，透镜焦距  $f=100$  mm，入射狭缝宽度为 0.15 mm，出射狭缝宽度为 0.1 mm，光电倍增管高压为 -305 V。测得红宝石晶体发射光谱光强数据，用 origin 绘图软件，绘出红宝石晶体的发射光谱。图 9 给出红宝石晶体的发射光谱，发射谱中出现两个发射峰，峰值位置分别在 692.9 nm、694.3 nm(理论峰值位置:692.8 nm、694.3 nm)。两尖峰分别对应图 1 中两个强荧光线  $R_2$ 、 $R_1$ 。当红宝石晶体被波长为 532 nm 的绿光照射后， $Cr^{3+}$ 吸收能量，被激发到  ${}^4T_2(F)$ ，并很快损失一部分能量通过无辐射跃迁到亚稳态  ${}^2E$ ，处在  ${}^2E$  态的粒子返回跃迁到基态  ${}^4A_2$ 。在返回跃迁的过程中，自发辐射产生荧光线  $R_2$ 、 $R_1$ 。

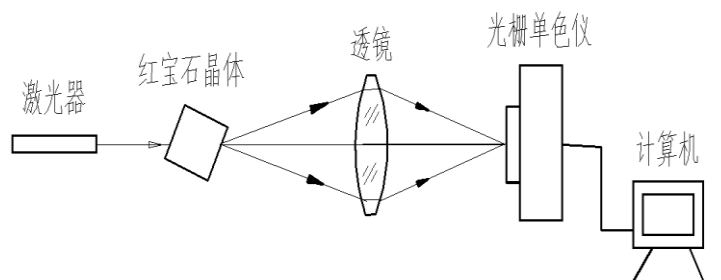


图 8 测量红宝石晶体的发射光谱的光路图

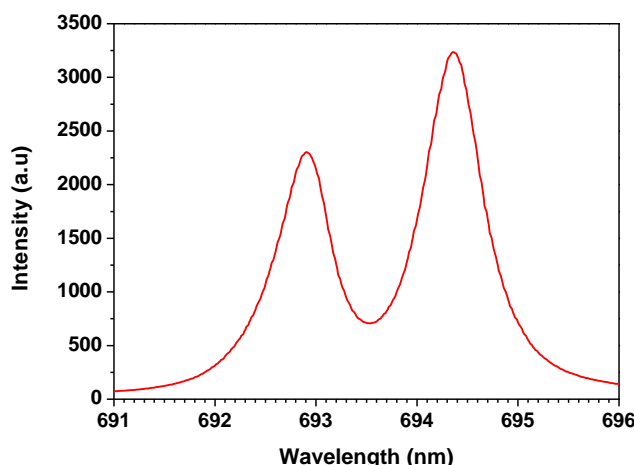


图 9 532 nm 的激光器 (50 mW) 激发的红宝石晶体的发射光谱

红宝石晶体的吸收光谱是反应  $Cr^{3+}$ 对光的吸收现象，发射光谱是反应  $Cr^{3+}$ 作为发光中心对光的发射现象，它们是相互联系的两相反过程。当处于基态的  $Cr^{3+}$ 被光激发后，获得能量跃迁至  $T(F)$ 态，在这个过程中产生跃迁吸收。处于  $T(F)$ 态受激  $Cr^{3+}$ 无辐射跃迁至亚稳态  ${}^2E$ ，通过自发辐射返回跃迁到基态  ${}^4A_2$ ，在返回跃迁的过程中释放能量，发射光子。

#### 4 结束语

在大学物理实验教学中,对本科生开设该实验,在使用现代化的实验教学方法优化实验教学模式的同时,也拓宽了学生的知识层面,使学生在课堂上所学的理论知识和实验中观察的现象有机结合在一起,从而激发学生对实验的兴趣,提高对理论知识探究的积极性,为学生发挥创造性思维奠定了基础。学生可以以光栅单色仪为平台从事多领域、多学科相互交叉的实验研究,如对一未知的材料,进行光谱研究,来探知材料的发光物质及其化学成分;可以通过光纤耦合,将太阳光采集到单色仪内,了解太阳光谱中夫琅禾费谱线(暗线)相关知识;可以对电致发光的半导体材料 LED 发光特性进行探究;有学生在此平台上已做出实验结果,实验名称为‘用琼斯矩阵方法研究透明胶带的光学性质’,并发表文章<sup>[8]</sup>等等。在进行实验研究的过程中,学生加强了创新意识,提高了提出问题、解决问题的能力,并发扬了小组成员间的协同合作的团队精神,同时在探求知识的过程中,培养了学生认真、严谨的科学态度。

#### 参考文献:

- [1] 杨志平,李志强。发光与显示技术[M]。河北:河北大学出版社,2007:71-72。
- [2] 谢行恕,康士秀,霍剑青。大学物理实验[M]。北京:高等教育出版社,2005:151-153。
- [3] 方容川。固体光谱学[M]。合肥:中国科学技术大学出版社,2001:139-143。
- [4] 陈伟,罗红宇。云南红宝石的激发和发光光谱[J]。无机材料学报,1993,8(4):409-416。
- [5] T.H. 梅曼,龚旗煌译。红宝石中的受激辐射[J]。北京大学学报,2002,38(增刊):63-65。
- [6] 王彦吉,宋增福。光谱分析与色谱分析[M]。北京:北京大学出版社,1995:70-72。
- [7] (英)R.G. 伯恩斯,任觉,郭其悌译。晶体场理论的矿物学应用[M]。北京:科学出版社,1977:56-58。
- [8] 盛欣力,顾帅,张权,等。用琼斯矩阵方法研究透明胶带的光学性质[J]。物理实验,2012,32(增刊):111-114。

### The study of teaching experiment for measurement of absorbance and emission spectra of ruby crystal by grating monochromator

ZHU Ling, ZHENG Hong, WANG Zhong-ping, ZHANG Quan,  
ZHANG Zeng-ming, SUN La-zhen

(Physics Experiment Teaching Center, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Grating monochromator as the platform, measuring the absorption spectrum and emission spectrum of ruby crystal, enable students to understand the working principle of monochromator, master the using method of monochromator at the same time, also let the students understand the optical and spectral properties of photoluminescence materials, lay the foundation for students to engage in related experiments.

**Key words:** Grating monochromator; Ruby crystal; Absorbance spectrum; Emission spectrum

# 巨磁电阻效应实验仪

吴春姬, 纪红, 徐智博, 张剑楠, 王文全  
(吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 介绍了巨磁电阻效应的基本原理, 利用自制的巨磁电阻效应实验仪测量了不同的外磁场和工作电压下巨磁阻传感器输出电压的变化。研究了巨磁阻传感器敏感轴与外磁场间夹角与传感器输出电压间关系, 传感器输出电压的与偏离角度成余弦关系。研制巨磁电阻效应实验仪, 不仅充实了学生实验内容, 更是提高了教师和实验技术人员的素质和能力。

**关键词:** 巨磁电阻效应; 传感器输出电压; 外磁场

## 1 引言

法国科学家阿尔贝·费尔和德国科学家彼得·格林贝格尔因分别独立发现巨磁阻效应<sup>[1]</sup>而共同获得了 2007 年诺贝尔物理学奖。近些年, 它的发展异常迅速, 应用领域不断扩大, 到目前为止, 巨磁阻技术已经成为全世界几乎所有电脑、数码相机、MP3 播放器的标准技术。目前利用巨磁电阻(Giant Magneto Resistive, GMR)材料制成的生物传感器, 在生命科学研究领域具有重要的作用。另外, GMR 传感器在汽车电子技术、机电一体化控制、家用电器、卫星定位、导航系统以及精密测量技术中都将具有广阔的开发与应用价值<sup>[2]</sup>。

为了使理科学学生能够接触和感受到物理学科的发展, 经常将物理学科尤其是获得诺贝尔奖的一些实验内容纳入实验教学体系, 不断的融入近现代的先进科技成果对提高学生的综合素质, 实验动手能力, 使得我们的毕业生走入社会能够很快的适应当今社会高技术发展的环境中去, 研制巨磁电阻效应实验仪是非常有意义的一项工作。所以无论是充实实验内容提高实验教学水平, 还是提高教师和实验技术人员的素质和能力都是非常有意义的一项工作。本实验仪已经运用到学生实验教学当中, 取得了很好的教学效果。

## 2 实验基本原理

### 2.1 巨磁电阻效应

所谓巨磁阻效应,是指磁性材料的电阻率在有外磁场作用时较之无磁场作用时存在巨大变化的现象,巨磁阻是一种量子力学效应,它产生于层状的磁性薄膜结构,这种结构是由铁磁材料和非铁磁材料薄层交替叠合而成。

一般用二流体模型来解释巨磁电阻效应,铁磁金属中的电流由自旋向上和自旋向下的电子分别传输(图 1),自旋磁矩方向与区域磁化方向平行的传导电子所受的散射小,因而电阻率低。当磁性多层膜相邻磁层的磁矩反铁磁耦合时,自旋向上、向下的传导电子在传输过程中分别接受周期性的强、弱散射,因而均表现为高电阻态 R1;当多层膜中的相邻磁层在外加磁场作用下趋于平行时(图 2),自旋向上的传导电子受到较弱的散射作用,构成了低电阻通道 R3,而自旋向下的传导电子则因受到强烈的散射作用形成高电阻通道 R2,因为有一半电子处于低阻通道,所以此时的磁性多层膜表现为低电阻态。这就是磁性多层膜巨磁电阻效应的起因<sup>[3]</sup>。

---

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 11074092); 国家基础科学人才培养基金(No. J1103202)  
对本文的资助



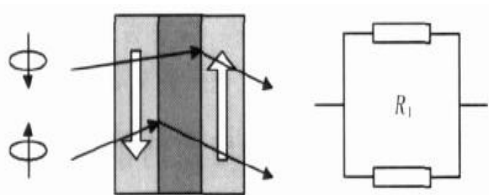


图1 无磁场时处于高阻态

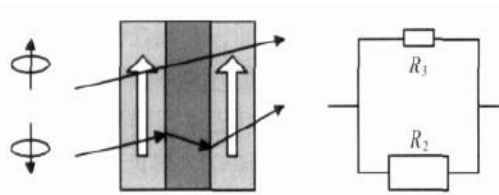


图2 外加磁场时处于低阻态

## 2.2 亥姆霍兹线圈

载流圆线圈磁场：根据毕奥-萨法尔定律，半径为  $R$  通以电流为  $I$  的圆线圈在线圈圆心  $O$  点的磁感应强度为

$$B_0 = \frac{\mu_0 N_0 I}{2R} \quad (1)$$

其中  $I$  是励磁电流， $\mu_0$  是真空磁导率， $N_0$  是线圈的匝数。

亥姆霍兹线圈是一对彼此平行且连通的共轴圆形线圈（如图所示），两线圈内的电流方向一致，大小相同，线圈之间的距离正好等于圆形线圈的半径  $R$ 。这种线圈的特点是能在其公共轴线中点附近产生较广的均匀磁场区域，设  $x$  为亥姆霍兹线圈中轴线上某点离中心点处的距离，则亥姆霍兹线圈轴线上任意一点的磁感应强度为

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 N I R^2 \left\{ \left[ R^2 + \left( \frac{R}{2} + x \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[ R^2 + \left( \frac{R}{2} - x \right)^2 \right]^{-3/2} \right\} \quad (2)$$

本实验中取  $N_0=200$ ， $R = 10\text{cm}$ 。因此，在亥姆霍兹线圈轴线上的中心点  $O$  处的磁感应强度为

$$B_0 = \frac{\mu_0 N I}{R} \times \frac{8}{5^{3/2}} \quad (3)$$

## 2.3 巨磁电阻传感器的工作原理

本实验中的巨磁电阻传感器由四个电阻构成惠斯通电桥结构（图3），这是为了消除温度变化等环境因素对传感器输出稳定性的影响，增加传感器的灵敏度。我们把巨磁电阻传感器放在亥姆霍兹线圈磁场中（图4）， $R_1$  和  $R_2$  是磁屏蔽电阻， $R_3$  和  $R_4$  是巨磁电阻，当传感器感应出磁场后会使得  $R_1$  和  $R_2$  值不变， $R_3$  和  $R_4$  磁电阻值发生变化，从而在  $AB$  两侧感应出电压差，不同的磁场对应不同的磁电阻变化而引起的电压差，所以磁场与传感器输出电压间有一一对应关系。

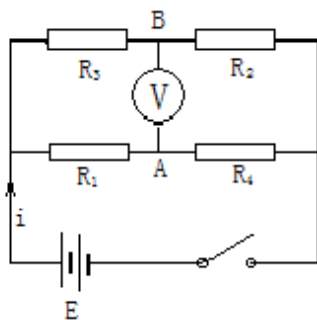


图3 巨磁阻传感器原理图

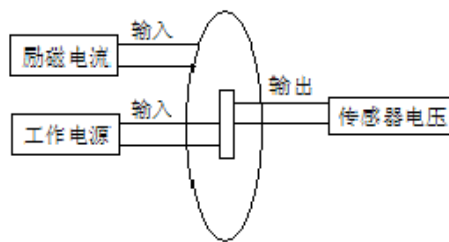


图4 巨磁阻实验仪原理图

由图3的巨磁阻传感器原理图,我们可以算出在磁场中磁电阻变化 $\Delta R$ 与传感器输出电压 $U_{AB}$ 之间的关系,电源电压 $E$ ,无磁场时 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ ,电桥平衡, $U_{AB} = 0$ ,

有磁场时 $R_1$ 、 $R_2$ 值不变, $R_3$ 、 $R_4$ 值发生变化,变化值 $\Delta R$ 相同, $U_{AB} = \frac{\Delta R}{2R_0 + \Delta R} E$ ,传

感器灵敏度为 $S = \frac{\Delta U_{AB}}{B \times \Delta E} \times 100\%$ 。

在相同磁场下,当外磁场方向平行于传感器敏感轴方向时,传感器输出最大。当外磁场方向偏离传感器敏感轴方向时,传感器输出与偏离角度成余弦关系,因此传感器的灵敏度也有如下关系,即 $S(\theta) = S(0) \cos(\theta)$

### 3 实验仪器结构

实验仪器由以下四个部分组成,1.工作电源-直流稳压电源能提供0-12V,2.标准磁场-直流稳流电源(0-3A)和亥姆霍兹线圈(取 $N_0 = 200$ , $R = 10\text{cm}$ )。3.巨磁电阻传感器-美国NVE公司生产的AA0002-02,可测磁场范围0-15Gs。4.自组直流数字电压表-用于测量传感器输出电压。把巨磁阻传感器放置在亥姆霍兹线圈轴线中心位置。

### 4 实验结果

图5为电源电压为6V时,亥姆霍兹线圈励磁电流 $I$ 与传感器输出电压 $U_{AB}$ 间的关系。如图所示,当励磁电流 $0.1\text{A} < I < 1.0\text{A}$ 时, $I$ 与 $U_{AB}$ 间呈线性关系,就是说在一定范围内,外磁场与传感器输出电压间呈线性关系。利用这一原理可以给GMR传感器定标,测量长直导线产生的磁场,并验证公式 $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ 。

图6为励磁电流(0.6A)不变时,不同工作电压与传感器输出电压之间的关系。由图可以看出不同工作电压与传感器输出电压间呈线性关系,这说明巨磁电阻传感器工作电压越大,输出电压就越大,传感器越敏感。

图7为巨磁电阻传感器敏感轴和外磁场间夹角 $\theta$ 与传感器输出电压之间的关系。电源电压是6V,励磁电流是0.6A,由图我们也可以看出当电源工作电压和线圈励磁电流不变时,当外磁场方向平行于传感器敏感轴方向( $\theta = 0^\circ$ )时,传感器输出电压最大。当外磁场方向偏离传感器敏感轴方向时,传感器输出电压慢慢变小,传感器输出电压与偏离角度成余弦关系,理论上在 $\theta = 90^\circ$ 时应该为零,但是由于环境中存在很多附加磁场,不能严格达到零。由此原理来可以制作导航仪和机器人机械手<sup>[4]</sup>。

图8为励磁电流为0.6A时,GMR传感器灵敏度与工作电压的关系,如图所示,GMR传感器灵敏度与工作电压间不存在很明显的关系。

作为施加磁场函数的电桥输出电压 $U_{AB}$ 被称作传感器的传递函数,测量巨磁阻材料的磁阻特性会发现,随着外磁场增大电阻逐渐减小,期间有一段线形区间,在此线形区内,阻值的改变量 $\Delta R$ 与施加的外磁场成正比,因此该区内也可以认为是传递函数的线性范围。传感器的灵敏度 $S$ 与传递函数的线性范围对于传感器来说是两个重要特征。

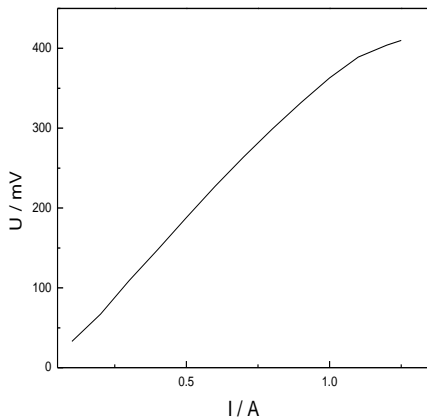


图5 励磁电流与传感器输出电压间的关系

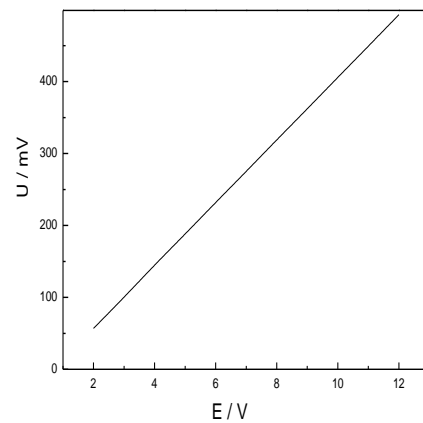


图6 工作电压与传感器输出电压间的关系

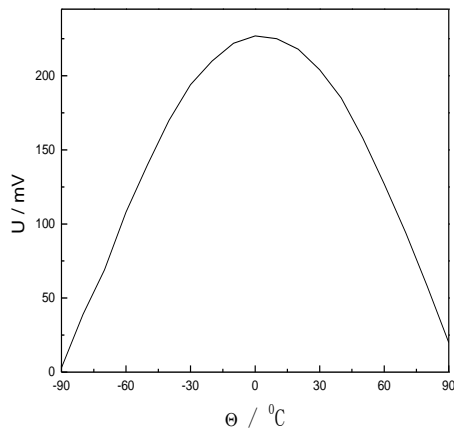


图7 夹角 $\theta$ 与传感器输出电压间的关系

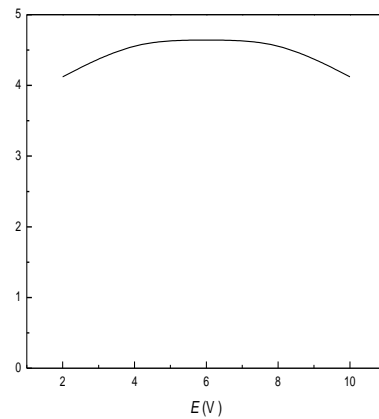


图8 GMR传感器灵敏度与工作电压的关系

## 5 结论

利用惠斯通电桥原理制成的 GMR 传感器研制了巨磁阻实验仪,当改变外磁场时磁电阻发生变化。在工作电压不变时,在一定范围内励磁电流与传感器输出电压间呈线性关系。外磁场不变时,工作电压和传感器输出电压间也呈线性关系。当外磁场方向平行于传感器敏感轴方向( $\theta=0^\circ$ )时, $U_{AB}$  最大。当外磁场方向偏离传感器敏感轴方向时,传感器输出电压与偏离角度成余弦关系。当外磁场不变时,工作电压越大,传感器输出电压越大。巨磁电阻传感器的灵敏度与传感器工作电压间没有很明显的关系。该实验仪已应用到学生实验教学当中,取得了很好的效果。

### 参考文献:

- [1] BAIBICH M N, BROTO J M, FERT A, et al. Giant magneto-resistance of (001) Fe/ (001) Cr magnetic super-lattices [J]. Physical Review Letter, 1988, 61 (21): 2472-2475.
- [2] JAAFAR S, AHMAD A S, GHOSH P S, et al. A new Approach in Modeling AC Flashover Voltage for Polluted Insulator [C]// Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Annual Report, 2002: 558- 561.

- [3] 钱政, 张翔。巨磁电阻电流传感器的特性测试与分析。高压电器, 2007, 4(5): 340-343。  
[4] 肖又专, 曾荣伟, 王林忠, 等。巨磁电阻传感器的应用[J]。磁性材料及器件, 2001, 32(2): 40-44。

## Giant magnetoresistance effect experimental instrument

WU Chun-ji, JI Hong, XU Zhi-bo, ZHANG Jian-nan, WANG Wen-quan  
(College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** This paper introduces the basic principles of the giant magnetoresistance effect (GMR), the output voltage changes of giant magnetoresistance sensor in different external magnetic field and the working voltage are measured by the homemade GMR effect experimental apparatus. It also studies the relationship between the angle (the angle is between the GMR sensor sensitive axis and the external magnetic field) and the sensor output voltage, It can be concluded that there is cosine relation between deviation angle and sensor output voltage. The research of GMR experimental instrument not only enrichs the students' experiment content, but also improves the quality and capability of teachers and laboratory technicians.

**Key words:** The giant magnetoresistance effect; the sensor output voltage; external magnetic field