

全国高等学校物理实验课程教学研究项目期中检查报告

“基于光电效应法测普朗克常数实验的思想、方法、技术研究” 编号：01-201601-52

一、用半导体激光器光源测量普朗克常数的实验方法和仪器

已经发表核心期刊论文一篇

孙正和等已经发表论文. 用半导体激光器测普朗克常量[J]. 大学物理, 2017 , 36 (1): 28-32 , 这篇论文在本项目立项之前投稿, 但在立项之后又对已经提交的论文进行了实质性的修改和补充, 使论文更完善更有意义。

收稿日期: 2015-11-10; 修回日期: 2016-10-09

基金项目: 全国高等学校物理实验课程教学研究项目(01-201601-52) , 哈尔滨与探索项目资助. 本工作获 2015 年山东省大学生物理科技创新大赛一等奖

作者简介: 孙正和(1960—) , 男, 山东即墨人, 哈尔滨工业大学(威海) 理学院

1、提供了用五种半导体激光器做光源测量普朗克常数的实验方法和仪器

本文对波长 405、450、532、635、650nm 五种半导体激光器激光进行光谱分析, 谱线的半高全宽平均值是 5.1nm, 比相关光源汞灯滤光片、LED 灯的单色性更好. 用波长 405、532、635、650nm 四种半导体激光器测量, 求得普朗克常数为 6.627×10^{-34} JS, 绝对偏差为 0.001×10^{-34} JS, 相对误差为 0.02% . 又用波长 405、532、635、650、450 (当时市场还没有小型 450nm 半导体激光器, 用较大的激光器在套管外远距离入射) nm 5 种半导体激光器测量, 求得普朗克常数为 6.583×10^{-34} JS, 绝对偏差为 0.043×10^{-34} JS, 相对误差为 0.65% . 两种情况的平均相对误差近似为 0.34%, 若半导体激光器受损时还会降低性能增大误差.

实验装置



图 3 光电管的圆形进光口



图 4 激光器套管安装在原滤色片圆盘上

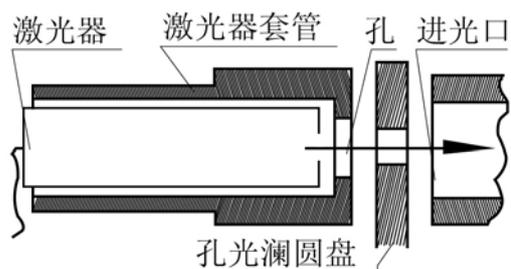


图 5 激光器装入套管光路结构图

在原有汞灯光源实验装置中，图 3 中圆盘上部是光电管的圆形进光口，图 4 中原滤色片圆盘的位置在光阑圆盘之外，在原滤色片圆盘上滤色片孔内加装激光器套管固定。套管是桶状并氧化变黑，桶底中央有孔。小型半导体激光器稳定的插在套管内，并可以方便的插入或拔出更换。

图 5 是光路结构图，在套管与光电管进光口之间有一个可以改变孔径大小的孔光阑圆盘，激光经过套管孔、再经过圆盘上的某一个孔光阑，再射入光电管进光口。



图 6 是用小型 450nm 半导体激光器插入套管测量普朗克常数实验的实物图

论文投稿时市场还没有小型 450nm 半导体激光器，用较大的激光器在套管外远距离入射，而立项后市场已经有了 450 nm 小型半导体激光器，可以用 5 种小型半导体激光器测量，使用更加方便了。

2、发现多单色光混合入射时，不满足爱因斯坦光电效应方程，初步分析了原因

有的滤光片出射光并不是单色光，而是二个或三个汞灯谱线单色光的混合光。有学者发表论文（张开骁等. 外光电法测量普朗克常量的误差分析与修正[J]. 物理实验, 2013, 33 (1):40~42.），用滤光片汞灯光源实验，求得普朗克常量值为 $7.225 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，与公认值的相对偏差为 9%^[1]。本文用光谱仪测量发现个别滤光片标称值与单色光谱线对应波长不符，

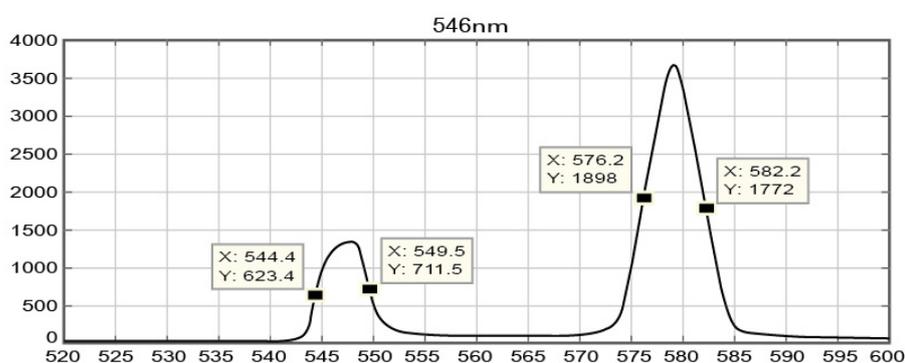


图 2 d

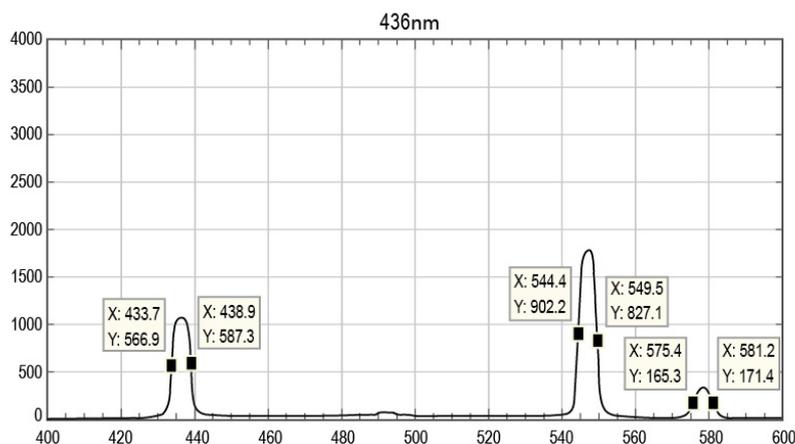


图 2e

图 2. 汞灯光分别通过标称值 365、405、532、546、436nm 滤光片的光谱线半高全宽坐标

例如图 2d、2e 所示的滤光片能通过汞灯的 2 个或 3 个谱线。虽然多余的光是频率

低于标称值的,但实验证实这也改变相应标称值应有的遏止电压,降低测量精度,张开骁等报道也证实了这一点^[1].

造成这个仪器制作错误的原因是对爱因斯坦光电效应方程 $U-\nu$ 关系式有误解,本文对消除误解避免仪器制作和使用中的错误有意义,对完善修改教科书中相关内容有重要意义。

实验证实,当频率不同的三单色光或多波长光混合入射时,遏止电压值与其中最高频率单色光频率之间不再满足爱因斯坦光电效应方程 $U-\nu$ 关系式(2),

$$h\nu - W = eU_0 \quad \text{或} \quad U_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e} \quad (2)$$

遏止电压值相对(2)式中最高频率光子对应的 U_0 值向低偏离.初步理论分析了单色光谱线宽度影响测量精度的原因是向阳极方向运动的快光电子与慢光电子碰撞,使向阳极运动快光电子的动能减小.理论分析结论与实验相符.

由此推理得到结论,测量普朗克常数所用光源的单色性越好,测量精度越高.用光谱分析论证了与相关其它光源比较半导体激光器光源具有较好的单色性,激光是现有光源中较理想的实验光源.

3、本实验方法、仪器具有的优点

1) 精度高. 2) 可改变激光强度 3) 有更接近截止频率的单色光. 4) 仪器体积小重量轻、成本低易于推广. 5) 使用方便. 6) 学生动手更换激光器、接线,不同波长光源与测量结果之间对应关系直观形象,更加深理解物理概念,培养动手能力. 随着小型优质激光器种类的增多,本方法将是最好的实验教学方法. 本文弥补了现有测量普朗克常数方法的不足之处,很有推广价值.

二、对光电子互相碰撞的机理分析的初步数学描述

已经完成汉语文稿,正在翻译成英语向国外知名刊物投稿发表 SCI 收录期刊论文一篇“光谱线宽度影响朗克常数测量精确度的关系”,“**The Planck constant measurement accuracy relationship with the monochromatic spectral line width**”

论文摘要: 在普朗克常数测量实验中揭示了光电效应爱因斯坦方程理论与实验的差异,及其原因分析. 通过实验发现单色光谱线宽度影响测量普朗克常量精度的关系,推导出解释

分析这一实验规律的数学关系式, 阐明了产生实验测量误差的机理. 这对探索构建光电子碰撞理论、研究修正测量结果减小误差的方法有重要意义.

研究思路

建立光电子相互作用及其与靶原子碰撞的物理模型, 再根据物理模型建立数学模型。

1、 描述分析光电子相互作用的机理

利用热电子发射数学模型, 修改成对应入射光源谱线宽度的光电子发射数学模型, 给出某单色光谱线的光电子发射速率分布或动能分布的数学模型。描述各个速率光电子受到反向电场作用后的运动状态及动能量值, 碰撞后原最大动能产生的运动状态变化及动能变化。

2、描述分析光电子能量范围加宽的机理

利用实验找到在多个相近频率单色光混合入射情况下, 单色光频率与相应测量遏止电压之间的关系。从中寻找谱线全宽频率差对应的高低频率两单色光 ν_1 、 ν_2 电离出的光电子碰撞结果, 其碰撞结果是光电子之间碰撞后的高频率单色光 (ν_1' 碰后高频) 对应光电子的动能量。数学模型与实验结果反复比较, 以实验修正数学模型, 完成符合实验规律的仿真数学模型, 帮助理解光电子相互作用的机理。

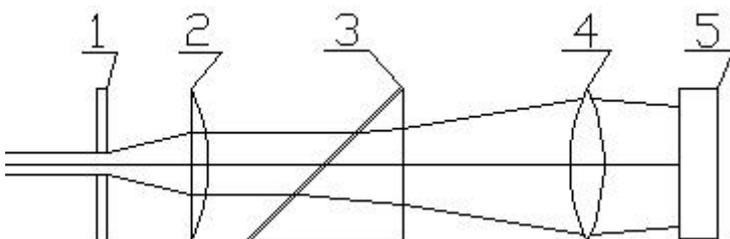
三、已经完成简易光谱测量仪的制作, 准备投稿发表省级以上期刊论文一篇

1、 研制适合学生需要的测量光波长实验仪

测量普朗克常数实验中, 实验方法应该改变, 每一个过程都要有让学生信服的证据或视觉感知, 实验所用光源的复合光都包含那些谱线, 各个单色光波长都是多少, 要经过学生亲自测量, 有一个感性认识。半导体激光器的标称波长的误差范围在 5nm, 有必要检测。现有的通用光谱仪的光路复杂、光学器件多, 光学

器件产生像差，不易操作，价格较高。本项目要研制适合学生实验的测量光波长的实验仪，展示结构、价格成本不高、学生易于动手操作，除在测量普朗克常数实验中用，还可以用在其它需要的实验中使用，或专门开设一个光谱仪实验。

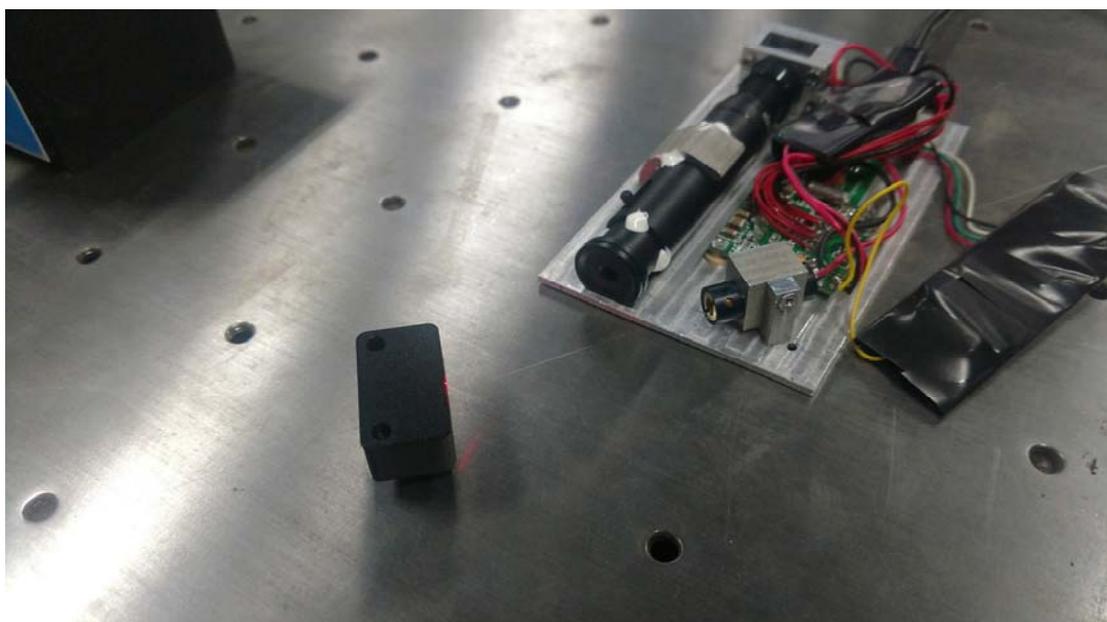
1.1 研制光谱仪光路结构



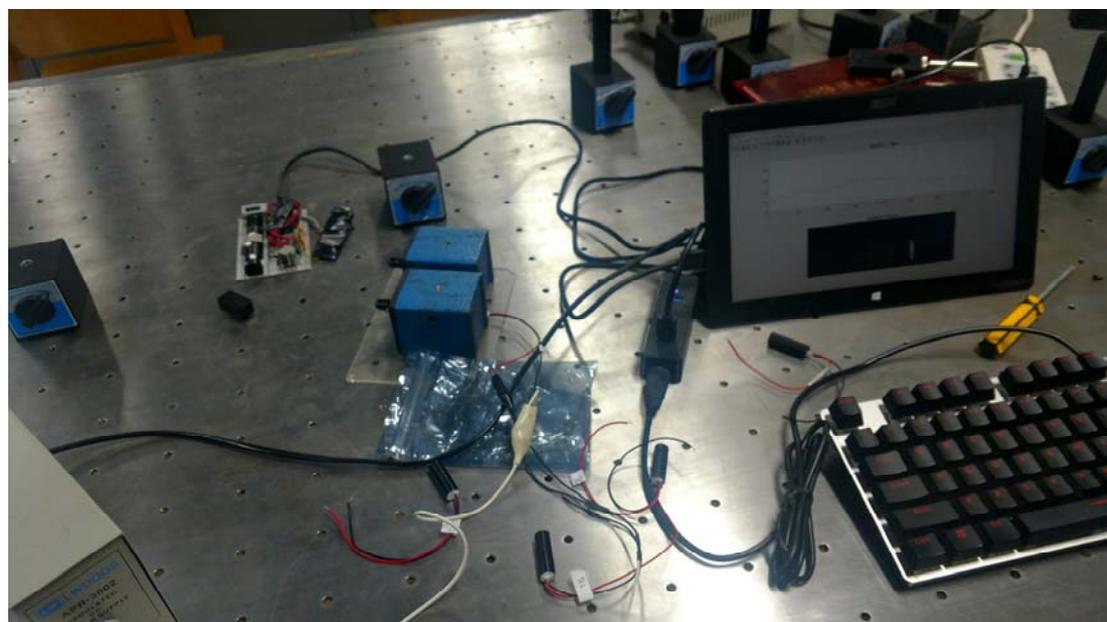
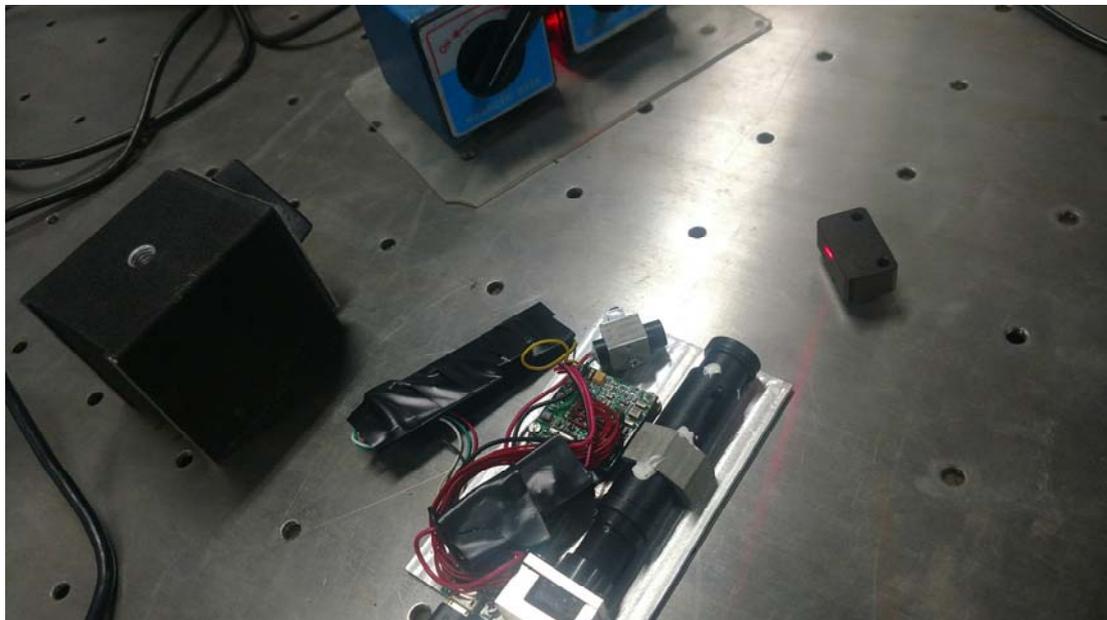
研制光谱仪光路结构示意图

研制光谱仪光路结构如图所示，被测光经过狭缝 1、准直透镜 2、分光器件 3、会聚透镜 4 使衍射条纹成像在焦平面位置的平面 CCD 光电器件 5 上，衍射条纹在 CCD 平面上的位置不同所对应谱线波长不同，显示器上显示出相应分布的光谱曲线。分光器件是本项目的特色，用全息光栅和棱镜构成，使衍射光相对主光轴方向对称分散分布出射，分散范围不大，结构简单、体积小、精度较高，而且避免了由多个光学器件构成的复杂光路。

实物及光路如下图所示



入射光激光器在光谱仪机身之外，激光斜向照射在一块黑平板上，反射的弱光进入光谱仪入光口。这个弱入射光采集的方法还需要改进。设想用涂黑小孔作光阑限制光进入量。



测量得到的光谱曲线显示在笔记本电脑显示屏幕上。

2、本光谱仪软件编制

本光谱仪软件编制思路是利用精度较高的光谱仪测量几种不同波长激光器

单色光的光谱波长获得已知标准波长, 或利用高压汞灯已知波长单色光作为标准波长对自制光谱仪定标, 然后测量未知单色光波长。本光谱仪的特点之一是所用软件简单易于掌握。

光谱仪理论可测波长范围 : 405nm~775nm、

单个像素点对应波长宽度 : $\approx 0.5\text{nm}$ 、

拟合公式:

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1*x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.5175 \quad (0.4698, 0.5653)$$

$$p2 = 405.6 \quad (390.6, 420.6)$$

Goodness of fit:

SSE: 119.1

R-square: 0.9975

Adjusted R-square: 0.9966

RMSE: 6.299 拟合结果:

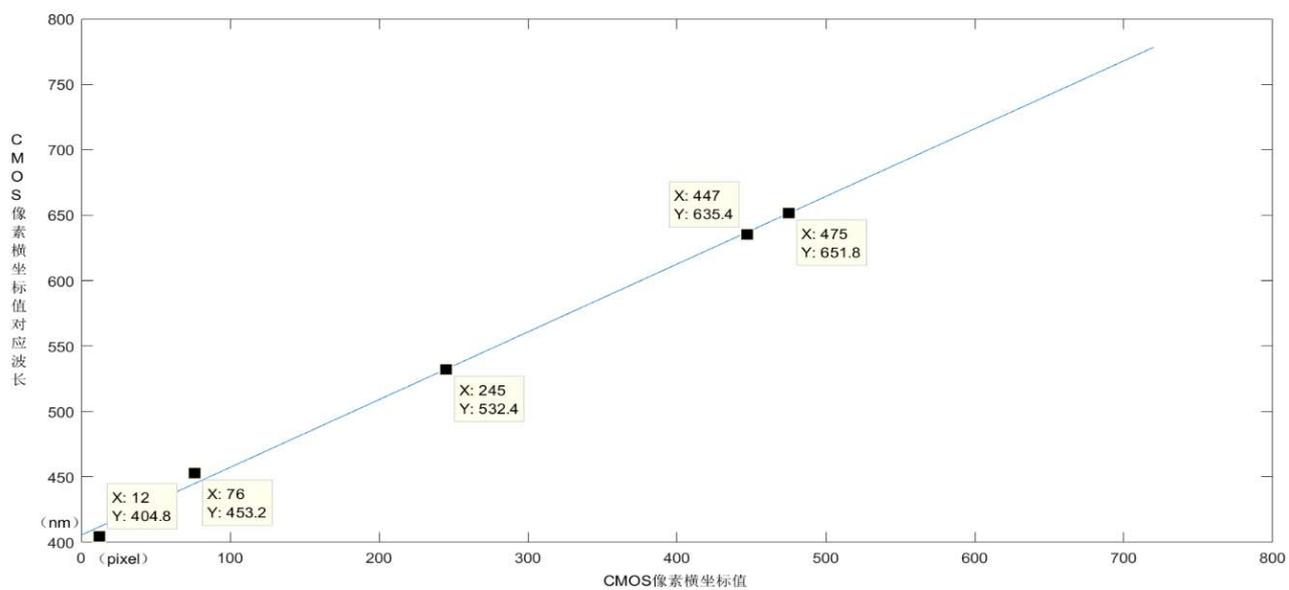
$\lambda \text{ (nm)} = x*0.5175 + 405.6$ (注: x 表示峰值对应的像素点坐标 [CMOS 物理分辨率 720*488])

实验数据 :

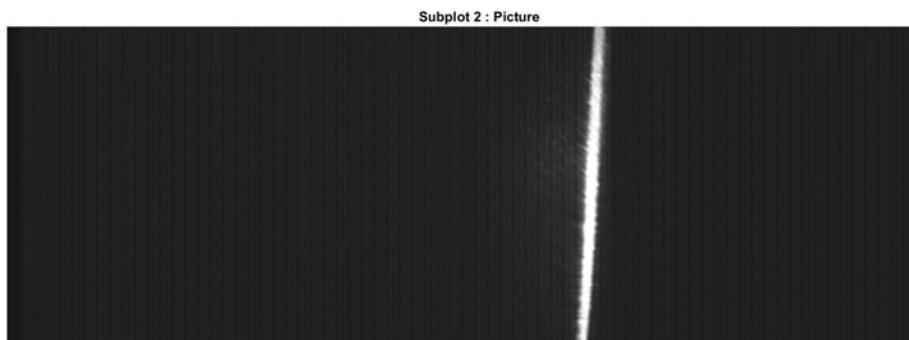
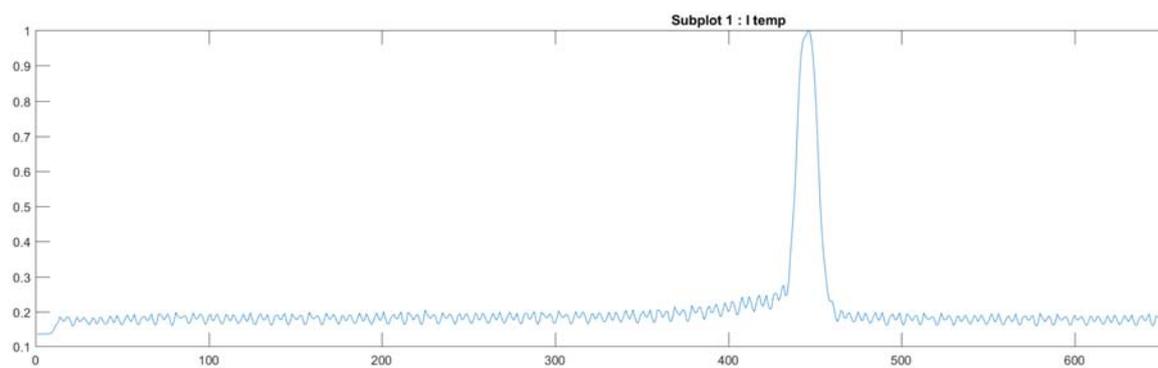
标称激光波长 nm	405.0	450.0	532.0	635.0	650.0
标准谱线波长 nm, Y:	404.8	453.2	532.4	635.4	651.8
频率 10^{14} HZ	7.4	6.6	5.6	4.7	4.6
峰值对应的像素点坐标 X:	12.0	76.0	245.0	447.0	475.0

注: 由拟合公式推算波长标准差值为: $\pm 0.5\text{nm}$

下图为实验数据拟合图像、图中数据标签为实验所用激光器的三次测量后数据取平均值的数
据、x为CMOS上亮线峰值所对应的像素坐标、y为实验所用激光器的标准波长



实验数据拟合图



这是波长635.4nm单色光在屏幕中显示的谱线和光谱曲线图像