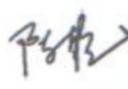
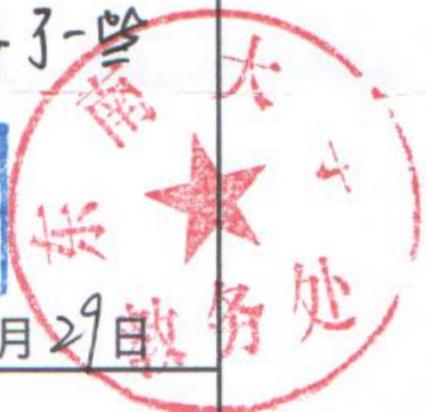




学 生 作 者 及 发 表 有 关 物 理 实 验 论 文 情 况	姓名	何潜翔	性别	男	出生年月	1998.10.03
	学校名称	东南大学				
	入学时间	2017.9	毕业时间	2021.6		
	学号	61517325				
	参评论文：	(题目、杂志名称、卷/期、页、年)				
		功率型 LED 结温测量方法的实验研究[J]. 物理与工程, 30(4)、112-115,120、2020				
		(注：论文的第一作者必须为大学本科生，且其论文研究工作是在本科生阶段完成的，到现场答辩的为该论文的学生作者之一。)				
		<b>论文作者情况（按发表论文作者顺序列出）：</b>				
		<b>姓名</b>	<b>身份</b>	<b>单位</b>	<b>作用/贡献</b>	
		何潜翔	学生	东南大学吴健雄学院	实验、数据处理、撰写论文	
	黄建宇	学生	东南大学物理学院	实验、数据处理		
	陈乾	指导教师	东南大学物理学院	指导		
	<b>简要介绍（研究背景、问题、方法、创新点、学术及应用价值和引用情况等）：</b>					
	<p>本文基于东南大学物理实验中心研发的LED热学特性实验仪，在仪器原有的脉冲电流法基础上，进一步拓展了小电流法测结温的实验内容，并利用这两种方法研究了LED灯珠在升温与降温过程中的结温变化。此外，实验还通过引入光谱仪测量了不同结温灯珠的发光光谱，探索了利用LED光谱测量结温的方法。该实验引导学生围绕LED结温测量这一工程技术问题，对原有的实验仪器和测量方法进行了开放性的拓展，是将传统验证性实验改造成综合性实验的一个成功案例，有效地激发了学生进行实验物理研究的兴趣。</p>					

	指导教师姓名	陈乾	职称	教授级高工
指导教师评语	<p>对学生发表论文评语及论文情况说明：</p> <p>何潜翔和黄建宇同学在“课题物理实验”课程中对 LED 热学特性实验的一些现象产生了兴趣，并利用课外时间搭建仪器设备，进行了课程要求以外的拓展研究，最后撰写论文并正式发表。这类工作来自于本科生的常规物理实验课程中，展现了学生对实验观察细致，坚持不懈，积极向上的学习态度和对物理实验的浓厚兴趣，值得在实验教学中鼓励和推广。</p> <p>指导教师 (签名):  2021 年 6 月 25 日</p>			
学校推荐意见	<p>何潜翔和黄建宇同学在课题实验中表现优异，并对相关实验项目进行了拓展，取得了一些有意义的成果。同意推荐参赛。</p> <p>负责人 (签名):  公章  2021 年 6 月 29 日 </p>			
大会学术组专家意见	<p>专家组组长 (签名): _____ 年 月 日</p>			
评比结果	<p>理事长 (签名) _____ 年 月 日</p>			

# 功率型 LED 结温测量方法的实验研究

何潜翔<sup>1,2</sup>, 黄建宇<sup>1,3</sup>, 陈乾<sup>1,3</sup>

(东南大学<sup>1</sup>物理国家级实验教学示范中心; <sup>2</sup>吴健雄学院; <sup>3</sup>物理学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 本文基于东南大学物理实验中心研发的 LED 热学特性实验仪, 在仪器原有的脉冲电流法基础上, 进一步拓展了小电流法测结温的实验内容, 并利用这两种方法研究了 LED 灯珠在升温与降温过程中的结温变化。此外, 实验还通过引入光谱仪测量了不同结温灯珠的发光光谱, 探索了利用 LED 光谱测量结温的方法。该实验引导学生围绕 LED 结温测量这一工程技术问题, 对原有的实验仪器和测量方法进行了开放性的拓展, 是将传统验证性实验改造成综合性实验的一个成功案例, 有效地激发了学生进行实验物理研究的兴趣。

**关键词:** 发光二极管; 结温; 脉冲电流法; 小电流法; 光谱

## Experimental study on junction temperature measurement of high-power LED

He Qianxiang<sup>1,2</sup>, Huang Jianyu<sup>1,3</sup>, Chen Qian<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup>National Demonstration Center for Experimental Physics Education; <sup>2</sup>Chien-Shiung Wu College(Honors); <sup>3</sup>College of Physics, Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189)

**Abstract:** Based on the LED thermal characteristic experiment instrument independently developed by the physical experiment center of Southeast University, this paper further expands the experimental content of the small current method to measure junction temperature on the basis of the original pulse current method of the instrument, and uses these two methods to study the junction temperature change of LED in the process of heating and cooling. In addition, the light spectrum of LED at different junction temperature was measured by using spectrograph, and the method of measuring junction temperature by LED spectrum was explored. This experiment guides the students to expand the original experimental instruments and measurement methods with the modern engineering technology of LED junction temperature measurement. It is a successful case of transforming the traditional confirmatory experiment into a comprehensive experiment, which effectively arouses students' interest in experimental physics research.

**Keywords:** light-emitting diode(LED); junction temperature; pulse current method; small current method; light spectrum

随着科学技术的不断发展, 发光二极管(light emitting diode, LED)逐渐由原来的小功率指示灯光源发展到大功率照明光源<sup>[1]</sup>。近年来, 功率型白光 LED 更是以其节能环保、响应速度快、体积小等优势, 在绝大多数灯具中取代了传统的照明光源, 进入了人们的日常生活<sup>[2]</sup>。然而, 随着功率的提高, LED 的核心结构中 P N 结的温度会相应升高, 继而影响 LED 的电学和光学性能。一般地, 结温上升会导致 P N 结内电子空穴有效复合率的下降和带隙的减小, 对外表现为 LED 发光效率降低和波长漂移等问题<sup>[3]</sup>。因此, 研究功率型 LED 的结温对光电特性的影响是该领域的研究热点之一。显然, 如何准确地@测量被密封包裹的芯片结温是该研究需要解决的首要问题<sup>[4-8]</sup>。在这一背景下, 东南大学物理实验中心设计了 LED 热学特性研究实验仪, 并将其用于大学物理实验课程的教学<sup>[9]</sup>。由于实验内容既关联了照明工程领域的实际问题, 又涉及了物理学中的半导体能带理论, 而且还和同学们的日常生活紧密相关, 因此该实验项目的选课率高,

收稿日期: 2019-12-01; 修回日期: 2020-01-21

基金项目: 东南大学教学改革研究与实践项目(2019-075); 国家自然科学基金面上项目(21973011)。

通讯作者: 陈乾, 男, 高级工程师, 主要从事物理教学与科研工作, 研究方向为半导体物理学, qc119@seu.edu.cn。

引文格式: 何潜翔, 黄建宇, 陈乾. 功率型 LED 结温测量方法的实验研究[J]. 物理与工程, 2020, 30(4):112-115,120.

取得了很好的教学效果。

本文介绍了在实际教学过程中，笔者基于上述实验仪器进一步拓展的课题实验内容。如图 1 所示，通过调整电路和添加实验装置，我们将原来单一的基于脉冲法测量结温的验证性实验改造成了一个可以通过脉冲法、小电流法和光谱法来测量同一 LED 灯珠结温的综合性课题实验项目。学生不仅可以通过该实验了解多种不同的结温测量方法，比较电学参量法和非接触式测量法的优缺点，而且还能学习改造实验电路、采集和分析光谱等基本实验技能。



图 1 实验装置实物图

## 1 脉冲电流法

在恒定直流驱动的正常工作状态下，LED 芯片的发热会造成结温  $T_j$  高于可测量的表面温度，无法直接获得<sup>[5]</sup>。借助 PN 正向压降和结温存在的单调对应关系，通过测量工作状态下 LED 两端的电压可间接获得结温，主要步骤如图 2 (a) 所示。

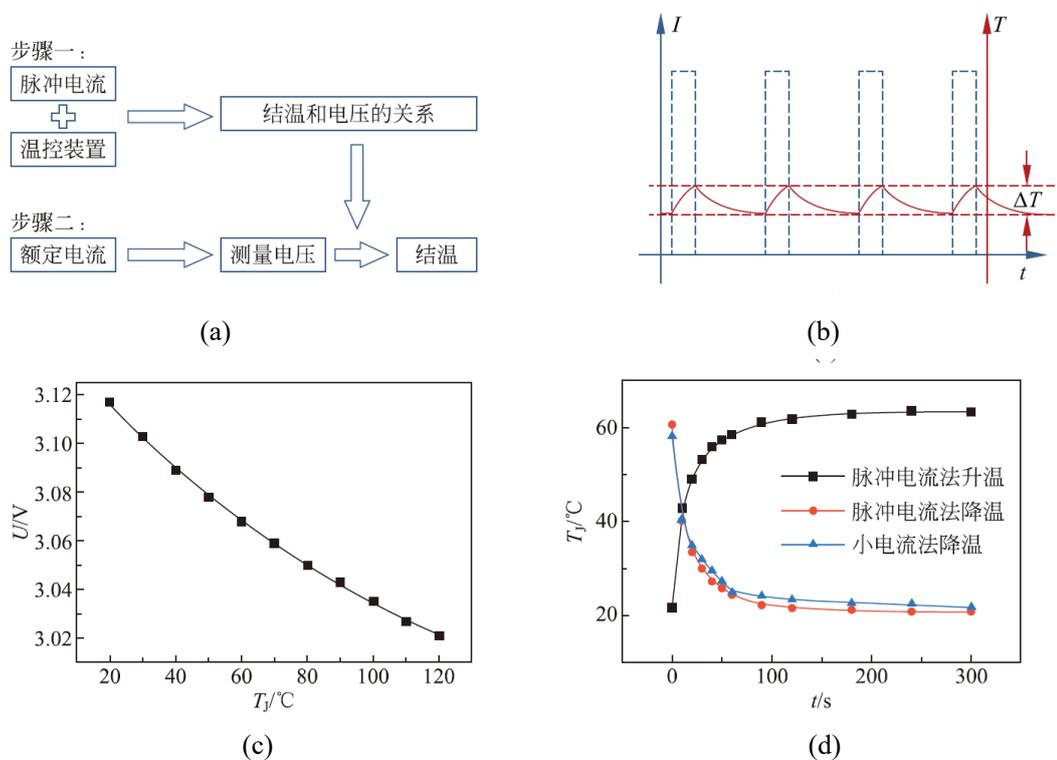


图 2

(a)脉冲电流法测 LED 结温的流程图；(b)结温控制原理示意图；

(c)脉冲电流模式下，待测 LED 灯珠正向压降与结温的关系；

(d)基于脉冲电流法和小电流法测得的 LED 灯珠在点亮和熄灭后结温随时间的变化曲线  
具体测量时，首先需要得到结温和电压的对应关系。脉冲电流法的核心思想是利用在较小占空比的脉

冲直流驱动下，LED 芯片温度无法升高且近似等于温控室温度这一条件（见图 2（b）），配合测试台温控装置来得到额定电流下 LED 两端的压降与结温的关系曲线。本实验所使用的 LED 灯珠的额定工作电流为直流 300mA，图 2(c)为在该脉冲直流下测量得到的 LED 两端压降与结温（近似等于温控室温度）的关系曲线。

在获得上述曲线的基础上，笔者测量了待测 LED 灯珠用 300mA 恒定直流点亮（即正常工作状态）后结温随时间的变化关系，如图 2(d)方形数据点所示。从图中可以看到 LED 正常点亮时，结温会在短时间迅速上升，并在五分钟左右趋于稳定。当断开稳定工作状态下 LED 的电源时，结温则会迅速下降并恢复到环境温度，如图 2(d)圆形数据点所示。

## 2 小电流法

小电流法和脉冲电流法一样，都是借助 PN 结正向压降和结温存在的单调对应关系，通过测量工作状态下 LED 两端的电压来间接获得结温的。因此，这两种方法都被称为正向电压法。但和脉冲法不同的是，小电流法利用了 LED 在微小电流驱动时芯片发热可以忽略这一事实。如图 3(a)的流程图所示，小电流法可大致分为两个步骤：首先，在小电流驱动下，配合温控装置得到不同温度下 LED 结温和压降的关系；然后，在额定电流下使 LED 正常工作并达到稳定，之后迅速将驱动电流转换成之前的小电流并同步记录正向压降，进而通过上一步的结温和电压关系计算结温。

由于实验时需要在 300mA 和 3mA 左右的恒定直流源间快速转换，所以在进行该实验时需要将原有实验仪器作改动：在原有 LED 电学测试仪之外增加如图 3(b)所示的小电流( $I_S$ )恒流电路，并用一单刀双掷开关将两电路相连。基于上述实验装置测得不同小电流下 LED 正向压降与结温（近似等于温控室温度）的关系如图 3(c)所示。对比脉冲法中用额定电流 300mA 获得的  $U-T$  曲线，可以看到在小电流下的曲线近似为线性关系，这是由于二极管正向电压与温度关系式中的非线性项和工作电流正相关造成的。在电流很小的情况下，非线性项的贡献非常小，因此两者存在近似线性关系，可引入系数  $K$  表示其斜率，即：

$$K = \left| \frac{\Delta T}{\Delta U} \right| \quad (1)$$

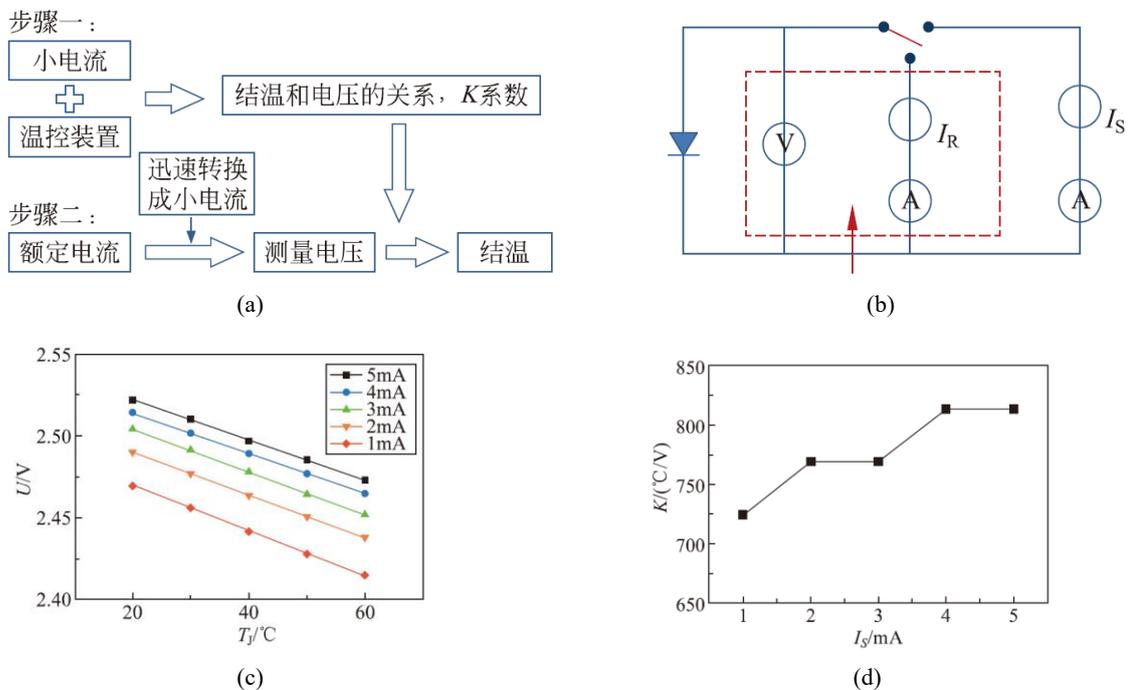


图 3

(a)小电流法测结温的流程图；(b)电路示意图；

(c)不同小电流下，待测 LED 灯珠正向压降与结温的关系；(d)不同小电流下的  $K$  系数如图 3(d)所示，不同小电流下的  $K$  系数不同，随着工作电流的增加会逐渐变大。上述关于二极管的物

理原理可引导感兴趣的学生阅读黄昆先生原著的《固体物理学》中 PN 结部分内容<sup>[10]</sup>。

在获得  $K$  系数后,用 300mA 额定直流点亮 LED 灯珠,待其达到稳定工作状态后迅速切换到小电流驱动模式并测得正向压降  $U$ ,结合小电流驱动下室温时的结温  $T_{J0}$  和压降  $U_0$ ,根据式(2)可计算得到 LED 结温  $T_J$ 。

$$T_J = T_{J0} + K(U - U_0) \quad (2)$$

图 2(d)中三角形数据点为利用小电流法测量的同一个 LED 灯珠在降温时的结温变化,和脉冲法测量的结果符合得很好,说明了两种方法测量结温的准确性。需要指出的是,由于小电流法测量时需要转换电流驱动源,因此额定电流驱动下 LED 在升温过程中的结温无法动态测量。

### 3 光谱法

除了上述的电学参数法,借助如图 1 中所示的小型光纤光谱仪,该实验还能让学生进一步探究光谱法测量 LED 结温的基本思路。通过改变温控室温度,逐次测量 LED 正常工作时(300mA 恒定直流驱动)的光谱如图 4 所示。从图中可以看到:(1)LED 的光谱明显的分成两个峰,左侧蓝峰是由 LED 核心结构 PN 结发出的光谱,右侧黄峰则是荧光粉受激发出的光谱;(2)随着结温的升高,光谱强度相应下降;(3)光谱中蓝峰对应的波长随着结温的升高发生红移。当定量的给出蓝峰的峰值波长  $\lambda$  和结温  $T_J$  的关系时,可以看到两者存在近似线性的单调关系(如图 4)。

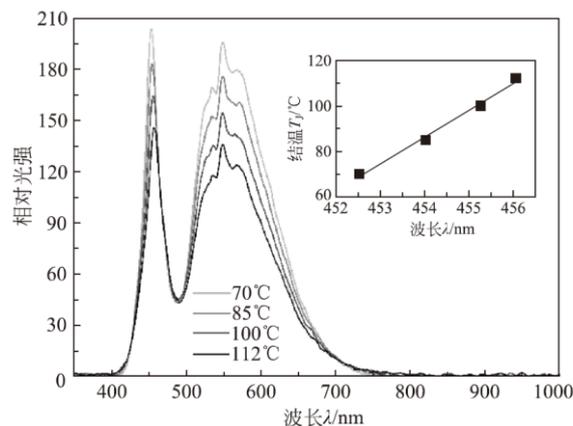


图 4 待测 LED 灯珠在不同结温时的光谱和蓝峰波长的分布图

因此,若提供某一类 LED 的  $T_J \sim \lambda$  关系曲线,便可通过测量光谱来得到这类 LED 的实时结温。由于正向电压法需要在 LED 两端引脚接入引线来测量电压,这对于封装好的灯具来说很难操作,因此光谱法等非接触式的测温方法更为简单方便。但是,影响光谱的因素比较复杂,再加上光谱测量对光谱仪精度的依赖性,所以光谱法测量结温的误差一般高于电压法。

### 4 结语

本文介绍了东南大学物理实验中心围绕 LED 结温测量这一工程热点设计的课题型物理实验项目。通过改造实验电路和添加实验装置,项目在原有脉冲法测量仪器的基础上,拓展了小电流法和光谱法测量结温的课题实验内容,并获得了准确的实验结果。学生通过该实验可以锻炼设计改造电路和采集分析光谱的基本实验技能,了解照明工程中常用的 LED 结温测量方法,并比较电学参量法和非接触测量法的优缺点。

### 参考文献:

- [1] HECHT J. White light LEDs promise a bright future for solid illumination[J]. Laser Focus World, 2010, 46(11):33-37.
- [2] LIU M, RONG B, SALEMINK H W. Evaluation of LED application in general lighting[J]. Optical Engineering, 2007, 46(7):074002.
- [3] 丁天平,郭伟玲,崔碧峰,等. 温度对功率 LED 光谱特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1450-1453.

- DING T P, GUO W L, CUI B F, et al. The effect of temperature on the PL spectra of high power LED[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31 (6) : 1450-1453. (in Chinese)
- [4] 郭杰,马军山,饶丰,褚静. 基于光谱分布特征参数的白光 LED 结温测量方法[J]. 光学仪器,2018,40(05):1-7. Guo J, Ma J S, Rao F, Chu J. White LED junction temperature measurement method based on spectral distribution characteristic parameters [J]. Optical instruments, 2018,40 (05): 1-7. (in Chinese)
- [5] 朱简约,李乐天,陈乾. 大功率 LED 结温与器件表面温度关系的研究[J]. 物理与工,2017,27(03):18-21. Zhu J L, Li L T, Chen Q. Study on the relationship between junction temperature and device surface temperature of high power LED [J]. Physics and engineering, 2017,27 (03): 18-21. (in Chinese)
- [6] 邱培镇,顾菊观,胡岳. 基于照度的非接触式大功率白光 LED 结温测量[J]. 物理实验,2015,35(06):32-34. Qiu P Z, Gu J G, Hu Y. Non contact high power white LED junction temperature measurement based on illuminance [J]. Physical experiment, 2015,35 (06): 32-3. (in Chinese)
- [7] 蒋一成,朱腾飞,慎月强,蔡怡,张俊.LED 结温精密测量及相关因素分析[J].光学仪器,2013,35(03):7-10. Jiang Y C, Zhu T F, Shen Y Q, Cai Y, Zhang J.precision measurement of LED junction temperature and analysis of related factors [J]. Optical instruments, 2013,35 (03): 7-10. (in Chinese)
- [8] ZONG Y Q, OHNO Y. New practical method for measurement of high power LEDs[C]. Proc. CIE Expert Symposium on Advances in Photometry. CIE x033. Turin, Italy, July 7-8, 2008: 102-106.
- [9] 陈乾,戴玉蓉,孙贵宁,杨蕾. LED 热学特性研究及应用实验仪[J]. 物理实验,2017,37(07):39-42. Chen Q, Dai Y R, Sun G N, Yang L. Led thermal characteristics research and application experiment instrument [J]. Physical experiment, 2017,37 (07): 39-42. (in Chinese)
- [10] 黄昆, 韩汝琦. 固体物理学[M]. 1 版. 北京: 高等教育出版社, 1988.