

文章编号:1673-9981(2019)02-0102-05

基于自动温控光谱测试系统的深紫外 LED 光电特性研究*

林丹, 王巧, 王君君, 胡金花, 卢瀚仑, 刘宁炀, 陈志涛

广东省半导体产业技术研究院, 广东 广州 510650



摘要:为研究温度对 AlGaIn 基 274nm 深紫外 LED 光电参数的影响. 基于自动温控深紫外光谱分析测量系统的测试结果表明, 在 25~100 °C 范围内该深紫外 LED 的工作电压和基板温度呈负线性关系, 温度系数约为 $-8.79 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, 较大的温度系数可能来源于深紫外 LED 中 p-AlGaIn 较低的掺杂浓度. 通过瞬态和稳态工作电压测试及结合温度系数, 计算得到深紫外 LED 样品的热阻为 $20.8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$, 该热阻对应芯片 PN 结到管壳引脚之间的导热通道. 随温度升高, 该深紫外 LED 峰值波长的稳定性和单色性较好. 该深紫外 LED 辐射光谱由 UVA、UVB 和 UVC 三种成分组成; 随着温度升高, UVA 和 UVC 成分减少, UVB 成分增加, UVB 成分可能来源于器件中低 Al 组分外延层材料吸收量子阱发光后的二次辐射. 研究表明, 温度对深紫外 LED 的工作电压、热阻以及辐射光谱等性能有着重要影响, 相关光电参数的准确测量需要精确控温.

关键词:UV-LED; 温度系数; 热阻; 辐射光谱

中图分类号: TN307

文献标识码: A

紫外波段按照波长可以划分为: 长波紫外 UVA(320~400 nm)、中波紫外 UVB(280~320 nm)、短波紫外 UVC(200~280 nm) 以及真空紫外 VUV(10~200 nm). 此外, 通常将发射波长短于 300 nm 的发光二极管(LED)称为深紫外 LED. 深紫外 LED 在生物医疗、卫生消毒、防伪鉴定、以及空气和水净化等领域具有广阔的应用前景^[1]. 快速准确地测定器件工作电压、辐射通量、辐射波长、热阻和结温等参数, 对于深紫外 LED 的器件研发、产品性能标定和实际应用具有关键的作用, 然而当前深紫外 LED 光电参数的快速准确表征仍面临着巨大的挑战. 一方面, 由于高能辐射光子对传统积分球的硫酸钡高反射涂层具有显著的老化作用、器件辐射通量低以及缺少标准灯等因素, 深紫外 LED 的准确测量对测试系统要求非常高, 而相关权威标准尚未

出台. 另一方面, 高 Al 组分 AlGaIn 与蓝宝石等衬底之间存在很大的晶格失配, 而随着 Al 组分增加器件掺杂受主激活能迅速增加、全反射临界角减小. 目前, 深紫外 LED 性能仍受到外延材料位错密度大、材料掺杂和器件接触工艺困难、C 面光提取效率低等问题的严重限制^[2-3]. 在此情况下, 绝大部分深紫外 LED 的电光转换效率仍处于 10% 以下^[4], 低的电光转换效率意味着大量输入功率可能在器件中转化为热量, 使得热量和温度对器件光电性能的影响非常显著, 不可忽略. 本研究基于精确标定的自动温控深紫外光谱分析测量系统, 对深紫外 LED 的工作电压、热阻以及辐射通量等关键光电参数进行了细致的分析表征, 这对于深入了解深紫外 LED 器件的温度特性及其光电参数的准确表征方法具有积极的意义.

收稿日期: 2019-05-05

* 基金项目: 广东省科学院创新人才引进资助专项(2017GDASCX-0862); 广东省科技计划(2017A070701025)

作者简介: 林丹(1986-), 女, 广东梅州人, 本科, 研究方向为宽禁带半导体材料与器件表征分析.

通讯作者: 王君君(1987-), 女, 江西九江人, 工程师, 硕士, 研究方向为宽禁带半导体材料与器件表征分析.

1 试验部分

1.1 试验样品与设备

试验中采用商品化的 AlGaIn 基深紫外 LED 灯珠为测试样品,其辐射峰值波长约为 274 nm,辐射通量在 20 mA 下约为 2.0 mW,具有 6060 全无机封装结构.将深紫外 LED 灯珠进行六角梅花基板封装以便于测试,实物照片如下图所示.

采用杭州远方光电信息股份有限公司生产的自动温控深紫外光谱分析测量系统对深紫外 LED 进行基板温度的精确控制和光电参数测试,设备型号为 ATA-500 LED,控温范围 5~105 °C,控温精度 ±0.5 °C;波长覆盖范围 200~450 nm,波长测试精度 ±0.1 nm;电流测试精确度 ±(0.1% 读数值 + 0.1% 量程);电压测试精确度 ±(0.1% 读数值 + 0.1% 量程);辐射通量准确度 ±5%.使用专用紫外辐射标准对系统进行校准后,符合 NIST 标准.

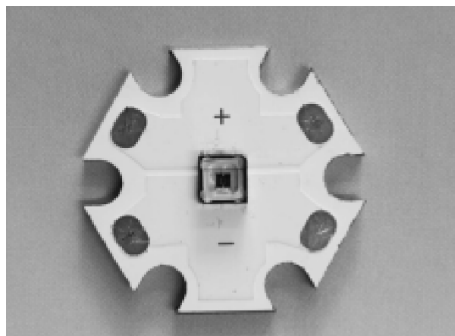


图 1 LED 测试样品

Fig. 1 Test sample of LED

1.2 试验原理与方法

1.2.1 热阻的定义

热阻是半导体器件的一个基本特性和重要参数指标,定义为在热平衡的条件下,两个规定点(或区域)的温度差与产生这两点温度差的热耗散功率之比.对 LED 器件,热阻越大表明单位功率下 LED 的结温升温越大.常用的热阻计算公式为^[5]:

$$R_{j-s} = \frac{T_j - T_A}{P_0} \quad (1)$$

其中, R_{j-s} 为待测器件 PN 结到指定区域之间的热阻, T_j 为 LED 的 PN 结结温, T_A 为环境或者散热基板的温度, P_0 为耗散功率的差额数值.目前,测量半导体热阻的方法主要有:红外微象仪法、光谱

法、光热阻扫描法、电学参数法和光功率法等,其中电学参数法具有测试结构简单、稳定性高等优点^[6].

1.2.2 电学参数法

电学参数法是利用在特定电流下 LED 的正向压降 V_f 与 LED 器件的温度关系得到温度系数.通过测量不同温度下的电压值,绘制电压-温度曲线,曲线斜率即为温度系数 K 值,单位为 mV/°C.温度系数 K 与发光材料和衬底材料的导热率、芯片结面积尺寸等因素相关^[7],可由公式(2)近似地表达^[8].

$$K = \frac{nk}{e} \ln \frac{C}{I_F} + \frac{3nk}{e} \ln T + \frac{3nk}{e} + \frac{1.5kT + E_a}{2kT^2} I_F R_s \quad (2)$$

式(2)中 e 为电子电量, k 为玻尔兹曼常数, n 为理想因子, T 为绝对温度, C 是与结面积、杂质浓度相关的常数, I_F 为正向电流, E_a 是受主杂质激活能, R_s 是串联电阻.

得出温度系数 K 值后,根据所测电压即可得出特定电流下的结温.根据温度系数 K 和结温的关系,LED 器件热阻的计算表达式可进一步表示为^[9]:

$$R_{j-s} = \frac{T_j - T_A}{P_0} = \frac{\Delta U}{K(P_E - P_L)} = \frac{U_2 - U_1}{K(P_E - P_L)} \quad (3)$$

式(3)中 U_2 为热稳态条件下指定工作电流对应的工作电压值, U_1 为瞬态条件下指定工作电流对应的工作电压值, T_A 为稳定的环境温度或基板温度. P_E 为器件的电功率, P_L 为器件的辐射光功率.

测试原理电路图^[10-11]如图 2 所示.其中 I_1 为使 LED 导通但不会引起明显结温上升时的瞬态电流, I_2 为加热电流. U 为不同测试条件下的器件工作电压值.

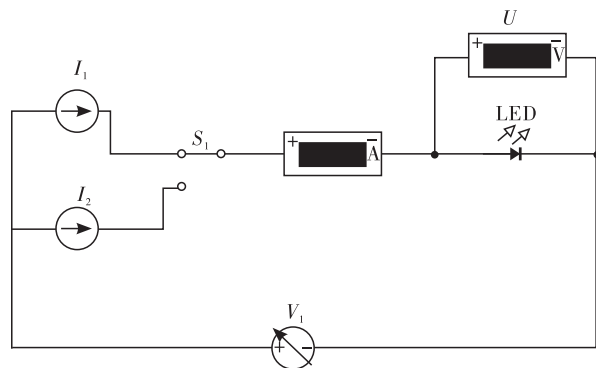


图 2 测试原理电路图

Fig. 2 Circuit diagram of test principle

1.2.3 试验条件

为保证测量结果的可靠性和准确度,本研究通过空调系统使实验室维持恒温恒湿环境(25℃,45% RH),同时采用设备自带的控温系统精确控制样品的基板温度.设定基板温度在25~100℃之间,每递增2℃进行采点测试.采用恒流驱动模式,设定恒定工作电流为20 mA.

利用光栅光谱仪采集紫外LED样品不同波长的发射光子,波长范围为200~450 nm,以得到不同基板温度下的辐射光谱曲线.

绘制不同基板温度下的工作电压曲线,并进行线性拟合以得到温度系数 K 值.进一步对瞬态和稳态的工作电压进行测试,①驱动电流 I_1 设定为20 mA,测得瞬态电流下的电压值为 U_1 ;②将电流 I_2 设置为50 mA,通电流并稳定15 min,基本判定器件稳定后,迅速切换至测试电流20 mA,测得20 mA电流下的电压值为 U_2 .

将驱动电流固定为20 mA,利用积分球对深紫外LED全周光发射能量进行采集,得到不同基板温度下器件的总辐射通量以及不同紫外波段成分的辐射通量,分别为 $\phi_e, \phi_{UVA}, \phi_{UVB}, \phi_{UVC}$.

2 试验结果与讨论

2.1 温度系数与热阻

图3是电流为20 mA条件下获得的正向电压-温度关系曲线.从图3可以看到,随着温度升高,器件的工作电压呈近似线性下降.对正向电压-温度关系曲线进行线性拟合,拟合线性相关度达0.99.由斜率得到温度系数 K 值约为 $-8.79 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.在小电流条件下,串联电阻上的压降 V_R 很小,对正向电压 V_f 的贡献主要来自结电压 V_J .该深紫外LED器件的 K 值比一般蓝光、绿光、白光LED等器件的 K 值大,较大的温度系数可能是因为深紫外LED的p-AlGaIn具有较低的掺杂浓度.因此,温度升高导致的热激活载流子浓度增加更为显著,使器件工作电压下降更为明显^[8].

将瞬态和稳态工作电压的测试结果代入公式(3),并结合温度系数,计算出该深紫外LED热阻约为 $20.8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$,与厂商标定的热阻值 $20.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 非常接近,表明电学参数法适用于深紫外LED的热阻测量.LED热阻数据要与芯片和基板材料的导热率、

芯片面积、封装工艺等参量有关.热阻越小,表明散热性能越好,有利于提高LED寿命^[12].LED热阻通常包括散热装置热阻、铝基板到散热装置的热阻、管壳引脚到铝基板的热阻以及PN结到管壳引脚之间的热阻.在本研究中,铝基板与散热装置紧密相接,二者的温度由温控系统精确控制,相当于散热装置热阻和铝基板到散热装置的热阻近乎为零,因此测得的热阻主要是PN结到管壳引脚之间的热阻.

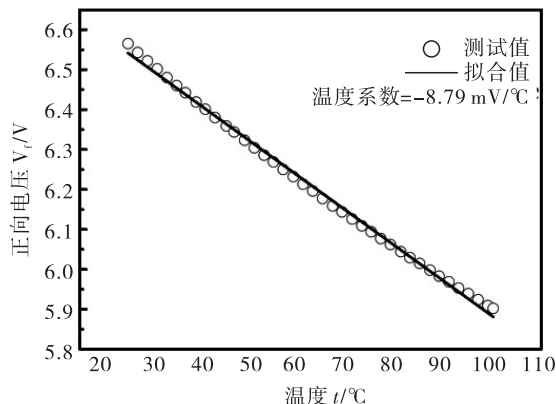


图3 LED正向电压随温度的变化

Fig. 3 Forward voltage variation of LED with the temperature

2.2 温度对辐射光谱特性的影响

器件辐射峰值波长随温度变化的关系曲线如图4所示.由图4可看出,随温度升高器件峰值波长的稳定性基本良好,在25~100℃范围内波长差不超2 nm.能带填充效应和禁带宽度的负温度系数效应会分别使峰值波长发生蓝移或者红移,二者的共同

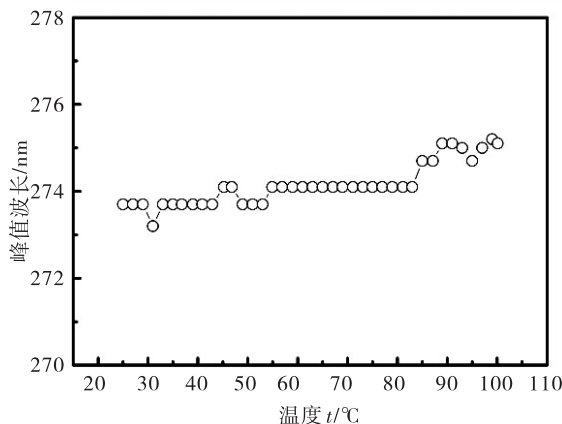


图4 LED峰值波长随温度的变化

Fig. 4 Peak wavelength variation of LED with the temperature

作用使峰值波长维持稳定. 温度较高时 ($>85\text{ }^{\circ}\text{C}$), 峰值波长增大较为明显, 表明此时禁带宽度的负温度系数效应占主导^[13].

在不同基板温度下器件的半波宽如图 5 所示, 由图 5 可看出, 该深紫外 LED 的半波宽较小、单色性好; 随着温度的升高, 半波宽逐渐增大, 近似呈线性关系. 半波宽增大可能来源于温度升高后, 更多缺陷态被激活, 缺陷能级展宽变大.

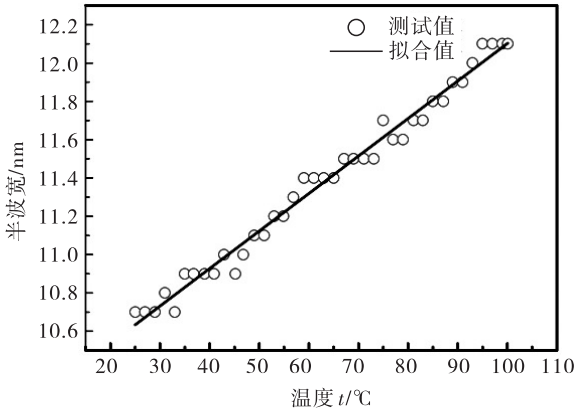


图 5 LED 半波宽随温度的变化

Fig. 5 FWHM variation of LED with the temperature

2.3 温度对辐射通量的影响

图 6 是总辐射能量 ϕ_e 以及 ϕ_{UVA} , ϕ_{UVB} 和 ϕ_{UVC} 各分量随着温度变化的关系曲线. 从图 6 可看出, 随着温度升高, 辐射光谱中 UVC 和 UVA 成分减少, UVB 成分增加. UVC 和 UVA 成分的减少可能是由于温度升高, 器件缺陷态增多导致非辐射复合增强. UVB 成分随着温度升高出现的反常现象表明, 该发光成分可能来源于器件中低 Al 组分外延层吸收量子阱发光后的二次辐射. 因为温度升高时材料吸收系数增大, 更多的吸收能够导致二次辐射发光增强.

3 结 论

基于自动温控深紫外光谱分析测量系统获得了 AlGaIn 基深紫外 LED 的工作电压、热阻、峰值波长、半波宽、以及辐射通量等光电参数. 该深紫外 LED 的温度系数为 $-8.79\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. 基于瞬态和稳态工作电压测试、结合温度系数可计算出该深紫外 LED 热阻约为 $20.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$. 随温度升高, 该深紫外 LED 峰值波长的稳定性和单色性较好. 随着基板温

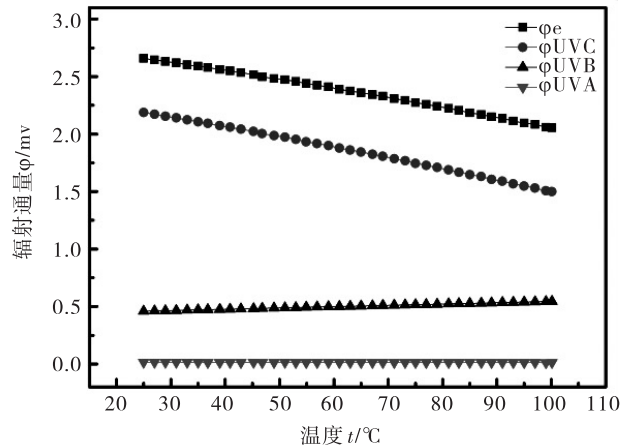


图 6 LED 辐射通量随温度的变化

Fig. 6 Radiant flux variation of LED with the temperature

度升高, 器件总辐射通量减少, 其中 UVA 和 UVC 成分减少, UVB 成分增加. UVB 成分有可能来源于器件中低 Al 组分外延层材料吸收量子阱发光后的二次辐射. 温度对深紫外 LED 光电特性有着重要的影响, 而精确控温对于该类器件光电参数的准确测量是非常必要的.

参考文献:

- [1] KHAN A, BALAKRISHNAN K, KATONA T. Ultraviolet light-emitting diodes based on group three nitrides [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(2): 77-84.
- [2] BAN K, YAMAMOTO J I, TAKEDA K, et al. Internal quantum efficiency of whole-composition-range AlGaIn multiquantum wells [J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4(5): 2101.
- [3] 王军喜, 闫建昌, 郭亚楠, 等. 氮化物深紫外 LED 研究新进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45: 067303
- [4] HIRAYAMA H, MAEDA N, FUJIKAWA S, et al. Recent progress and future prospects of AlGaIn-based high-efficiency deep-ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(10): 100209.
- [5] QiAO Y, FENG S, XIONG C, et al. The thermal properties of AlGaAs/GaAs laser diode bars analyzed by the transient thermal technique [J]. *Solid State Electronics*, 2013, 79(1): 192-195.
- [6] EIA/JEDEC Standard. JESD51-1 Integrated Circuits Thermal Measurement Method Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) [S]. USA: Electronic Industries Alliance, 1995.

- [7] 李炳乾,布良基,甘雄文,等. LED正向压降随温度的变化关系研究[J]. 光子学报,2003,32(11):1349-1351.
- [8] 张海兵,吕毅军,李开航,等. 功率型LED电压温度系数的研究[J]. 光电子激光,2008,19(12):1580-1583.
- [9] DING X, YONG T, LI Z, et al. Thermal and optical investigations of high power LEDs with metal embedded printed circuit boards[J]. International Communications in Heat & Mass Transfer,2015,66:32-39.
- [10] 中华人民共和国信息产业部. SJ 20788—2000 半导体发光二极管热阻抗测试方法[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [11] 曹玉春,陈亚飞,周慧慧,等. 功率型LED结温电学法测量研究[J]. 常州大学学报:自然科学版,2016,28(2):88-92.
- [12] 刘小凤. 关于大功率LED散热技术分析[J]. 电子世界,2018,544(10):147-148.
- [13] 王巧,刘宁炆,王君君,等. 电流及温度应力对LED电致发光光谱特性的影响[J]. 材料研究与应用,2016,10(3):186-190.

Research on photoelectric characteristics of deep UV-LED based on automatic temperature controlled spectrometer system

LIN Dan, WANG Qiao, WANG Junjun, HU Jinhua, LU Hanlun, LIU Ningyang, CHEN Zhitao
Guangdong Institute of Semiconductor Industrial Technology, Guangzhou 510650, China

Abstract: The effect of temperature on the photoelectric parameters of AlGaIn-based 274 nm deep ultraviolet LED (UV-LED) was investigated. The test results based on the automatic temperature-controlled deep ultraviolet spectroscopy measurement system show that the working voltage of the deep ultraviolet LED and the substrate temperature are negatively linear in the range of 25 ~ 100°C, and the temperature coefficient is about $-8.79 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Larger temperature coefficient may be derived from the lower doping concentration of p-AlGaIn in deep UV-LED. Through the transient and steady-state operating voltage test and combined with temperature coefficient, the thermal resistance of the deep UV-LED is calculated to be 20.8 °C/W. The thermal resistance corresponds to the thermal conduction path between the chip's PN junction and the pin of package. As the temperature increases, the stability and monochromaticity of the peak wavelength of the deep ultraviolet LED are better. The radiation spectrum of deep UV-LED is composed of three components: UVA, UVB, and UVC. The UVA and UVC decrease with increasing temperature, while the UVB increases with increasing temperature. The component of UVB may be derived from the secondary radiation of epitaxial layer materials with low-Al composition, which absorbs the quantum well light emitting to light up. The results show that temperature has a significant influence on the operating voltage, thermal resistance, and radiation spectrum of deep UV-LED LED. Accurate measurement of relevant photoelectric parameters requires precise temperature control.

Key words: UV-LED; temperature coefficient; thermal resistance; radiation spectrum