

文章编号: 0253-2239(2010)12-3586-06

交流发光二极管光电特性的研究

陈莹亮 吕毅军 高玉琳 林 岳 陈焕庭 雷瑞瑞 郭自泉 陈国龙 陈 忠

(厦门大学物理系, 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要 在不同的交流电压、频率和热沉温度下,对交流发光二极管(AC-LED)的光学和电学参数进行了测试。通过对 AC-LED 电流电压特性、光通量和光功率的深入研究,发现在交流和直流有功功率相同的情况下,器件的光通量、光功率和发光效能的交流驱动下要比直流驱动时低。随着有功功率的增大,器件的发光效能呈现先增大后减小的趋势,器件热效应、GaN 基 LED 的效率衰减现象以及等效串联电阻是造成这一现象的主要因素。同时还在改变热沉温度的条件下,讨论了温度对器件的峰值波长、光功率与发光效能的影响。

关键词 光电子学;交流发光二极管;半导体照明检测;发光效能;有功功率

中图分类号 TN312⁺.8 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3586

Photoelectric Properties of Alternating-Current Light-Emitting Diodes

Chen Yingliang Lu Yijun Gao Yulin Lin Yue Chen Huanting

Lei Ruirui Guo Ziquan Chen Guolong Chen Zhong

(Fujian Engineering Research Center for Solid-State Lighting, Department of Physics,
Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract The optical and electrical parameters of AC-LEDs driven by AC and DC source were tested at different alternating-current voltage, frequency and heat-sink temperature respectively. It is found that the values of luminous flux, optical power and luminous efficacy of device driven by DC source are larger than those by AC-source in the same active power. Because of thermal effects, efficiency droop and equivalent series resistances, the luminous efficacy of AC-LEDs firstly increases and then decreases with the active power increases. By changing the temperature of heat sink, the influence of temperatures on peak wavelength, optical power and luminous efficacy of AC-LEDs were further discussed.

Key words optoelectronics; alternating-current light-emitting diodes (AC-LEDs); solid-state lighting test; luminous efficacy; active power

1 引 言

近年来,随着发光二极管(LED)制造工艺的不断进步和新材料(氮化物晶体和荧光粉)^[1,2]的开发和应用,各种颜色的大功率 LED 取得了突破性进展,高亮度(High-bright)白光 LED 的发光效能已超过了 100 lm/W,色度方面已实现了可见光波段

的所有颜色,特别是大功率(High-power)白光 LED^[3]的出现,使 LED 应用领域跨越至高效率照明光源市场成为可能。传统 LED 是以直流电(DC)作为驱动电源,当其使用一般交流电源(AC)供电时,还必须附带整流变压器进行 AC/DC 转换。在 AC/DC 转换的过程中,大约有 15%~30%的电力耗

收稿日期: 2010-02-02; 收到修改稿日期: 2010-06-06

基金项目: 国家 863 计划(2003AA03A175)和福建省自然科学基金(2008J0030)资助课题。

作者简介: 陈莹亮(1984—),男,硕士研究生,主要从事半导体光电检测及特性方面的研究。

E-mail: qosmio@139.com

导师简介: 高玉琳(1969—),女,博士,副教授,主要从事半导体材料光学性质和半导体照明检测研究。

E-mail: ylgao@xmu.edu.cn(通信联系的人)

损,而且附加的整流设备还增加了 LED 灯具的成本。近年来出现的以交流电源直接驱动的 LED (AC-LED)无须变压器,进一步降低了成本。由于单颗 LED 具有整流特性,即正向导通反向截止的特性,因此在考虑 AC-LED 芯片结构的时候,根据这种特性将 2 颗同等功率的芯片正反焊接构成了 AC-LED 的雏形^[4,5],如图 1(a)所示。这种结构的 AC-LED 在工作时仅有一半的芯片被点亮,为了提高整个管子的芯片使用率,颜玺轩等^[4]利用惠斯通电桥结构[见图 1(b)]设计芯片,增加了偏置方向上的辐射面积,使得 AC-LED 在正反向工作时大多数的芯片均处在点亮状态,提高了芯片的使用率。目前各研究机构在 AC-LED 芯片的结构和工艺研究上取得了一些进展:Grigory A. Onushkin 等^[5]提出了一种新型的梯式 AC-LED 芯片结构,这种结构在 4 W/~220 V 的输入交流源下的光效能达到 80 lm/W;敖金平等^[6]利用双层互联和空气桥工艺设计出了一种能在较高的交流电压下工作的蓝光 LED,该器件是由两组相互交错连接的 DC-LED 构成,芯片与芯片之间利用深度干法腐蚀工艺进行隔离;Jaehce Cho 等^[7]在惠斯通电桥的桥式结构上加以改进,增加电桥上 DC-LED 的数量,使得 AC-LED 在交流工作时器件中大部分芯片都处于工作状态,不仅节约了芯片的成本,同时降低了频闪的现象。

目前对 AC-LED 光电性质的研究还不深入,胡凡勋等^[8]通过有限元数值模拟 AC-LED 的温度分布,并与实验相结合计算模拟出衬底温度与芯片结温的关系,从而达到测量结温的目的。宗予勤等人^[9]通过对 AC-LED 热沉温度的控制和调节,同时

测量相应的电流值,进而根据电流与结温以及热沉温度之间的关系达到计算 AC-LED 热阻的目的。在上述研究中对 AC-LED 的芯片结构、材料和热特性等都做出了相应的分析讨论,但对 AC-LED 的光电性质却缺少系统详细的研究。

在直流和交流驱动模式下讨论了不同热沉温度 AC-LED 的电流电压特性,并在一个交流周期内分析了热沉温度为 30 ℃、交流频率为 60 Hz 时 AC-LED 电流随时间的变化关系,同时研究了功率因数随电压的变化趋势。当交流频率变化时分析其光学特性的变化趋势。并在有功功率相同的情况下,对比了 AC-LED 在交流驱动和直流驱动下的光通量、光功率以及发光效能。最后在改变交流工作电压以及热沉温度的条件下研究 AC-LED 的峰值波长、光功率与发光效能的变化趋势。

2 实验条件

实验选用台湾亿光电子封装的大功率白光 AC-LED 作为测试样品,此样品采用了惠斯通桥式结构,如图 1(b)所示。样品的工作条件为交流电压 110 V,频率 60 Hz,其中 4 个桥臂上各有 9 颗芯片,电桥上有 16 颗芯片。使用华仪 6710 交流稳压源作为 AC-LED 的供压电源,输入电压为 70~110 V,频率为 60~500 Hz。光学特性采用德国 Instrument Systems 公司 Spectro320e 光谱系统进行测试,热沉温度的控制范围为 30 ℃~60 ℃。利用菊水 PCR500M 源表和 Keithley 2611 源表分别进行 AC 和 DC 下的电学特性测量分析。

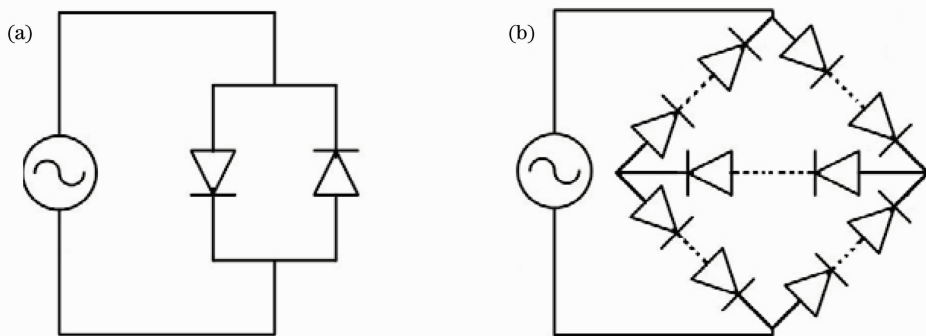


图 1 (a) 芯片正反焊接结构, (b) 惠斯通桥式结构

Fig. 1 (a) The structure of two chips connected in parallel of opposite directions, (b) Wheatstone bridge circuit

3 结果与分析

AC-LED 作为交流电源供电的 LED 器件。由于交流电的瞬时功率不是一个恒定值,功率在一个

周期内的平均值为有功功率 P 。交流电路中电压有效值 V_{rms} 与电流有效值 I_{rms} 的乘积为视在功率 (S),而有功功率与视在功率的比值可定义为功率因数

(PF)^[10], 即功率因数可表示为

$$P_F = P/S = \cos \varphi, \quad (1)$$

式中 φ 是电路的阻抗角, 又称功率因数角。

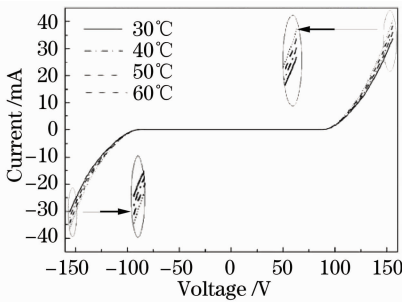
考虑到 AC-LED 中的交流电功率中实际用于电源做功的功率为有功功率, 因此所讨论的发光效能 η 都是基于有功功率计算求得的, 即

$$\eta = \frac{\Phi}{P} = \frac{\Phi}{V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos \varphi}, \quad (2)$$

式中 Φ 为 AC-LED 发出的光通量。Spectro320e 光谱仪探测器的积分时间设为 50 ms, 实验测量获得的光通量为积分周期内的平均值, 公式如下:

$$\Phi = \int_{380}^{780} \frac{P_{\text{opt}}(\lambda, t) V(\lambda)}{t_j} dt d\lambda. \quad (3)$$

式中 $P_{\text{opt}}(\lambda, t)$ 为积分周期内每一时刻测量得到的光谱功率, $V(\lambda)$ 为明视觉下光谱光视效率函数, t_j 为积分时间。



3.1 电流电压特性

在不同热沉温度的条件下进行了 AC-LED 样品的电流电压特性测试, 图 2(a) 为样品在直流驱动模式下的电流电压特性曲线, 正反向基本对称, 在同一电压下电流随热沉温度的升高而增大, 其中器件在热沉温度 30 °C 时开启电压为 90 V, 并随着温度的升高略为减小。从图中可以看出器件的两端都能导通, 不同于 DC-LED 在直流驱动下的正向导通而反向截止的特性, 这也就是 GaN 基的 AC-LED 在封装上不用考虑静电防护的原因。图 2(b) 为样品在频率 60 Hz 的交流驱动模式下的电流电压特性曲线, 其电流有效值 (I_{rms}) 随温度的升高而增大。图 3 为电压有效值 110 V, 周期频率 60 Hz 时电流与电压的交流波形, 可以看到在一个周期内电压开启后器件工作的时间约为 9 ms, 也就是在一个周期内, 器件只有一半左右的时间在发光。

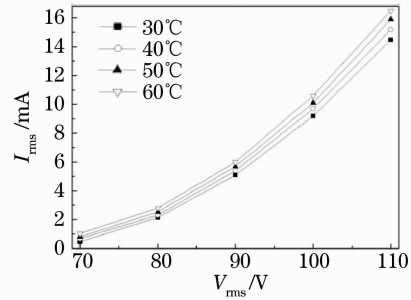


图 2 AC-LED 在不同热沉温度下的电流电压特性曲线。(a) 直流驱动; (b) 交流驱动

Fig. 2 I-V characteristics of AC-LED at different heat sink temperatures.

(a) Driven by DC source; (b) driven by AC source

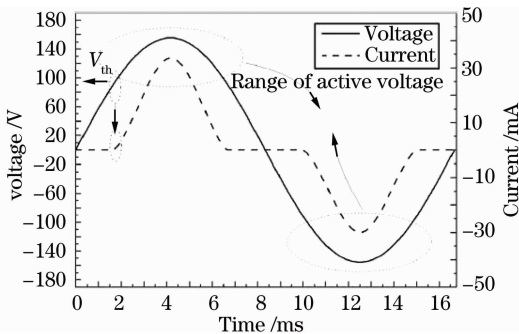


图 3 一个周期内的电流与电压的交流波形

Fig. 3 Instantaneous voltage and current waveform in one cycle

3.2 功率因数

功率因数 P_F 的大小体现了交流器件做功的有效性, 即在消耗的功率中实际用于做功的有功功率所占的比例。热沉温度为 30 °C 时, 讨论了在不同驱动电压下其功率因数的变化趋势, 如图 4 所示。可

以发现在交流工作电压从 70 V 变化到 110 V 的过程中, 功率因数随着电压值的增大而增大。说明随着交流器件消耗功率的增加, 其有功功率的比例在不断地增大。在额定工作条件 (电压约 110 V) 下, 其功率因数数值约为 0.89。

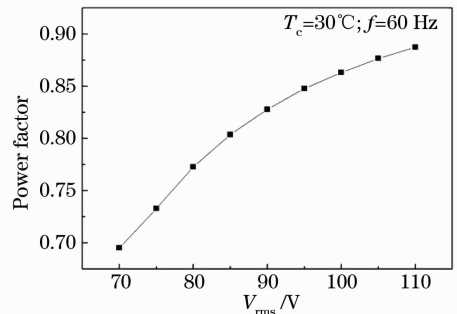


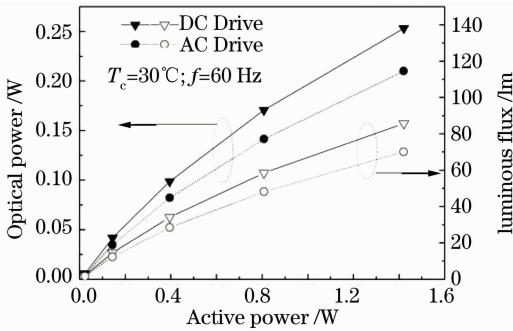
图 4 不同交流驱动电压下, 功率因数随电压的变化趋势

Fig. 4 Relation between the power factor and the AC voltage by AC-driven

3.3 发光性能

在交流电压为 70, 90 和 110 V 时, 通过测量得到了 AC-LED 的光通量随交流频率的变化趋势。随着频率从 60 Hz 增加到 500 Hz, AC-LED 的光通量值在各交流电压下的变化趋势并不明显, 由此可见频率对其光通量的影响并不大。

图 5 为交流频率为 60 Hz、热沉温度为 30 °C 时, AC-LED 分别在交流和直流驱动下的光学特性。AC-LED 在交流电压驱动下, 光通量和光功率都随



着电压的增大而增大, 器件的注入电流及有功功率也随之增大如图 5(a) 所示。但是在相同的有功功率下, 器件在直流驱动下的光功率、光通量和发光效能明显要比交流驱动时高。从图 3 结果可知, AC-LED 器件只有一半左右的时间在发光, 而光通量是在一个完整的工作周期内的平均值, 因此在输入有功功率相同的情况下, AC-LED 在交流驱动下的光通量要比直流驱动下小, 发光效能相应变小。

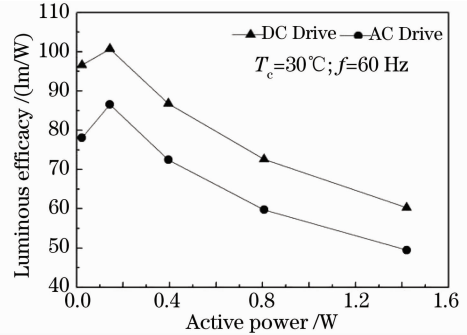


图 5 在不同驱动模式下, (a) 光功率、光通量与有功功率的关系图, (b) 在不同驱动模式下, 发光效能与有功功率的关系
Fig. 5 Driven by DC and AC mode respectively, (a) Dependence of optical power and luminous flux on the active power, (b) dependence of the luminous efficacy on the active power

图 6 为热沉温度为 30 °C 时, 发光效能随交流电压的变化趋势。从图中可知, AC-LED 的发光效能并不随着电压的增大而增大, 而是呈现出先增大后减小的趋势。造成这一现象主要有 3 个方面的原因: 1) 器件热沉温度升高对其性能产生的影响, 在 65~75 V 这段电压区间里, 器件的有功功率以及注入电流相对较小, 其热功率对热沉温度造成的影响基本可以忽略, 电子空穴的辐射复合随着电压的升高而增强, 光效也随之增大。当电压超过 75 V 后, 器件的有功功率迅速增大, 热功率产生的热量在器件内部积累, 非辐射复合的影响占据了主导, 并随着电压增加而导致温度升高加剧, 发光效能随着电压的增大而逐渐变小; 2) AC-LED 是由多颗 GaN 基 DC-LED 芯片组成的, 因此也存在注入电流较大时产生的效率衰减现象^[3], 随着注入电流的增大, GaN 基材料的极化效应造成电子的泄漏增强^[4,5], 以及器件内部载流子数量增加造成的俄歇复合增强^[6,7]使得 LED 出现发光效能的衰减; 3) 实际的 GaN 基 LED 可以看成由一个理想的二极管和一个等效串联电阻组成, 在器件输入电压较小时, 等效串联电阻上消耗的电功率较小, 但随着电压的升高, 等效串联电阻上消耗功率占总电功率的比例增大^[8], 使得器件出现发光效能降低的现象。

因此, 在图 6 中 65~75 V 的这段电压区间里, 器件的有功功率相对较小, 上述 3 方面的影响不显著, 器件光效随着电压的升高而增大。当电压超过 75 V 时, 作用在器件上的有功功率迅速增大, 使得器件产生热效应、GaN 基材料的极化效应、俄歇复合以及等效串联电阻的影响凸显出来, 在这些因素的作用下, 使得 AC-LED 的发光效能随着电压的升高而降低。

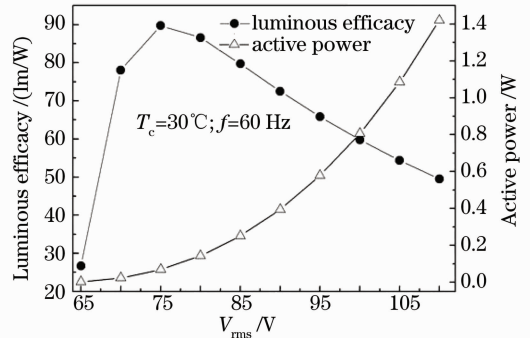


图 6 发光效能、有功功率与交流电压的关系
Fig. 6 Dependence of the luminous efficacy, active power on AC voltage

LED 的光电特性与热沉温度紧密相关^[17,18]。图 7 为一系列热沉温度下, AC-LED 发光峰的峰值波长与交流工作电压的关系。从图中可以看到, 随着电压的增大, 在同一热沉温度下的峰值波长发生

了蓝移。在相同的电压下,随着热沉温度的增大,电流增大[图 2(b)],光谱的峰值波长发生了红移。峰值波长发生红移可归因于热沉温度升高引起带隙收缩^[19]。而产生蓝移的原因是由于 GaN 基材料的,极化效应会在 InGaN/GaN 多量子阱内产生内建电场,内建电场改变了子带能级和束缚态波函数,降低光跃迁能量和振动强度,导致量子限制斯塔克效应^[20],在此过程中导带和价带发生倾斜,使得器件的发光波长红移,而多量子阱区的自由载流子会随着注入电流的增大而增加,其在一定程度上屏蔽了极化效应产生的内建电场,削弱了量子限制斯塔克效应,从而使器件的峰值波长发生蓝移^[13]。在这两种过程中,极化效应和热效应是同时存在的。提高电压时,注入电流增大,LED 结温也会升高,但此时极化效应起主要作用;同一电压下升高温度,电流增大,此时热效应占主导作用。

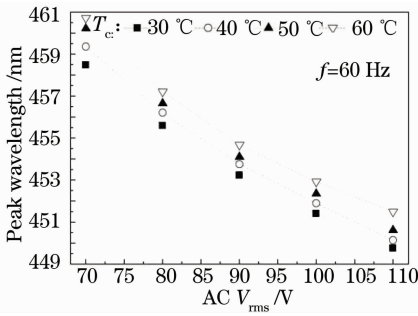


图 7 在不同热沉温度下,峰值波长随交流电压的变化关系

Fig. 7 Relation between peak wavelength and AC Voltage at different heat-sink temperatures

在相同的交流电压下,AC-LED 的光通量和光功率随着热沉温度的升高而增大,如图 8 所示,而在 DC-LED 中随着热沉温度的升高而减小。由于温度升高引起的器件注入电流的增大,使得 AC-LED 的光通量和光功率也随着增大。图 9 是在加载恒定交

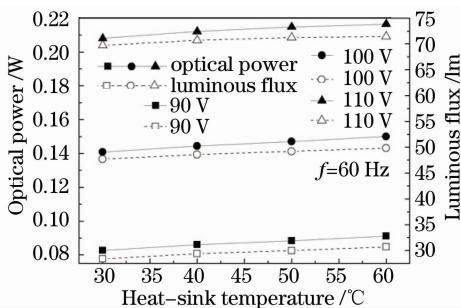


图 8 在不同电压下,光功率、光通量与热沉温度的关系
Fig. 8 Dependence of the optical power, luminous flux on heat-sink temperature at different AC voltages

流电压下,AC-LED 发光效能随热沉温度的变化趋势。随着温度的升高,在交流恒压下其发光效能是随之降低的,这与图 6 中(75~110 V)电压段中结温引起的发光效能降低的原因一样,都是由于热效应使得非辐射复合的影响增大,进而造成发光效能的降低。

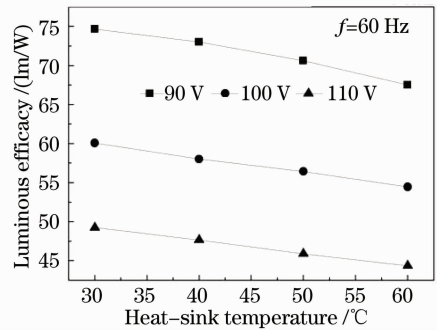


图 9 在不同电压下,发光效能与热沉温度的关系
Fig. 9 Relationship between luminous efficacy and heat-sink temperature at different AC voltages

4 结 论

AC-LED 作为新兴的半导体照明器件,光学特性与电学特性是衡量其性能的重要指标。分析其电学参数,可以看到流过 AC-LED 芯片的电流值并非恒定,而且一个周期内芯片发光的时间大约只有交流周期的一半。同时发现在热沉温度不变的情况下,AC-LED 的功率因数会随着电压的升高而增大。

当变化电驱动参数时,在相同的电压下交流输出频率改变对 AC-LED 的光通量及光功率的影响不大。在相同有功功率下,器件在交流驱动下的光通量要比直流驱动下小,发光效能相应变小。同时,其发光效能在不同电压区间随电压的单调性不同,在产生较小注入电流的电压段,发光效能随着电压的升高而增大,当电压升高到一定时,其发光效能就会随着电压的升高而减小,造成这一现象的主要因素有器件热效应、GaN 基 LED 的效率衰减现象以及等效串联电阻等。

最后,分析了热沉温度对其光学特性的影响,在热沉温度不变的情况下,电压增大使得由 GaN 基材料的极化效应引起的斯塔克效应被削弱,引起了峰值波长的蓝移。而在相同的交流电压下,热沉温度升高时引起带隙收缩使得峰值波长发生红移,同时器件注入电流的增大,使得 AC-LED 的光通量和光功率也随着增大。

参 考 文 献

- 1 Wu Haibin, Wang Changling, He Sumei. Research of Color Rendering of White LED Based on Red and Green Phosphors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1777~1781
吴海彬, 王昌铃, 何素梅等. 绿荧光粉的白光 LED 显色性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1777~1781
- 2 Su Liwei, You Da, Cheng Haiying *et al.*. Characterization of High-Power GaN-Based Green LED on Si Substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1066~1069
苏丽伟, 游 达, 程海英等. Si 衬底功率型 GaN 基绿光 LED 性能[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1066~1069
- 3 Yi Xiaoyan, Cuo jinxia, Ma Long *et al.*. Reserch and fabrication of flip-chip high-power blue LEDs[J]. *Journal of Optoelectronics • laser*, 2006, **17**(6): 693~696
伊晓燕, 郭金霞, 马 龙等. 倒装结构大功率蓝光 LEDs 的研制[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(6): 693~696
- 4 H. H. Yen, W. Y. Yeh, H. C. Kuo. GaN alternating current lighth-emitting device [J]. *Physical Status Solidi (a)*, 2007, **204**(6): 2077~2081
- 5 Grigory A. Onushkin, Lee Young-Jin, Yang Jung-Ja *et al.*. Efficient alternating current operated white light-emitting diode chip[J]. *IEEE photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(1): 33~35
- 6 J. P. Ao, Hisao Sato, Takashi Mizobuchi *et al.*. Monolithic Blue LED Series Arrays for High-Voltage AC Operation[J]. *Physical Status Solidi (a)*, 2002, **194**(2): 376~379
- 7 Jaehae Cho, Jaewook Jung, Jung Hye Chat *et al.*. Alternating-current Light Emitting Diodes with a Diode Bridge Circuitry[J]. *Japanese J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(48): L1194~L1196
- 8 F. S. Hwu, G. J. Sheu, M. T. Lin *et al.*. Method for determining the junction temperature of alternating current light-emitting diodes[J]. *IET Sci. Meas. & Technol.*, 2009, **3**(2): 159~164
- 9 Y. Q. Zong, P. T. Chou, M. T. Lin *et al.*. Practical method for measurement of AC-driven LEDs at a given junction temperature by using active heat sinks [J]. *SPIE*, 2009, **7422**(8): 742208-1~742208-7
- 10 Qiu Guanyuan. Circuit[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999, 201~204
邱关源, 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999, 201~204
- 11 H. Morkoc. Handbook of Nitride Semiconductors and Devices, Vol. 3[M]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2009, 36~39
- 12 M. Kunzer, C. C. Leancu, M. Maier *et al.*. Well width dependent luminescence characteristics of UV-violet emitting GaInN Q W LED structures[J]. *Physical Status Solidi (c)*, 2008, **5**(6): 2170~2172
- 13 M. L. Reed, E. D. Readinger, C. G. Moe *et al.*. Benefits of negative polarization charge in n-InGaN on p-GaN single heterostructure light emitting diode with p-side down [J]. *Physical Status Solidi (c)*, 2009, **6**(2): 585~588
- 14 K. A. Bulashevich, S. Yu. Karpov. Is Auger recombination responsible for the efficiency rollover in III-nitride light-emitting diodes[J]. *Physical Status Solidi (c)*, 2008, **5**(6): 2066~2069
- 15 J. Hader, J. V. Moloney, B. Pasenow *et al.*. On the importance of radiative and Auger losses in GaN-based quantum wells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(26): 261103-1~261103-3
- 16 Li Bingqian, Liu Yuhua, Feng Yuchun. The power dissipation of equivalent series resistance and its influence on lumen efficiency of GaN based high power light-emitting diodes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(1): 477~481
李炳乾, 刘玉华, 冯玉春等. 大功率 GaN 基发光二极管等效串联电阻的功率耗散及其对发光效率的影响[J]. *物理学报*, 2008, **57**(1): 477~481
- 17 Chen Huanting, Lü Yijun, Chen Zhong *et al.*. Analysis of thermal spreading boards for high-power AlGaInPred LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 805~810
陈焕庭, 吕毅军, 陈 忠等. 大功率 AlGaInP 红光 LED 散热基板热分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 805~810
- 18 Lü Yijun, Lei Ruirui, Gao Yulin *et al.*. Analysis of luminous efficiency of power LED[J]. *Acta optica Sinica*, 2009, **29**(2): 313~316
吕毅军, 雷瑞瑞, 高玉琳等. 功率 LED 发光效率分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 313~316
- 19 P. Manninen, P. Orrevelainen. On spectral and thermal behaviors of AlGaInP light-emitting diodes under pulse-width modulation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(18): 181121-1~181121-3
- 20 M. Leroux, N. Grandjean, M. Laugt *et al.*. Quantum confined Stark effect due to built-in internal polarization fields in (Al,Ga)N/GaN quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(20): R13371~R13374
- 21 G. Traetta, A. D. Carlo, A. Reale *et al.*. Charge storage and screening of the internal field in GaN/AlGaIn quantum wells[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2001, **230**(3): 492~496