

# 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<sup>\*</sup>

李炳乾<sup>1)</sup> 刘玉华<sup>1)</sup> 冯玉春<sup>2)</sup>

1) 佛山科学技术学院光电子与物理学系, 佛山 528000)

2) 深圳大学光电子学研究所, 广东省光电子器件与系统重点实验室, 光电子器件与系统教育部重点实验室, 深圳 518060)

(2007 年 3 月 14 日收到, 2007 年 5 月 24 日收到修改稿)

由于自加热效应的存在, 大功率 GaN 基发光二极管(LED)的芯片温度有可能高出环境温度很多, 实验中, 芯片温度超出环境高达 147 K. 从实验测量的大功率 LED 电流电压特性曲线中, 将 p-n 结和等效串联电阻上的电压降落分离出来, 得到了大功率 LED 等效串联电阻随芯片温度的变化情况. 在输入电功率自加热效应的影响下, 大功率 GaN 基 LED 等效串联电阻呈现出剧烈的变化, 其阻值由低输入功率时的 1.2  $\Omega$  降低到 0.9  $\Omega$ , 然后再升高到 1.9  $\Omega$ , 等效串联电阻的功率耗散在输入功率中所占的比例也随着输入功率的增加迅速增加, 最高时接近 50%, 成为大功率输入时影响 LED 流明效率的主要因素.

关键词: 自加热, 等效串联电阻, 发光二极管, 流明效率

PACC: 7280E, 7865P, 7860F, 7840G

## 1. 引 言

发光二极管(light emitting diodes, LEDs)的发光效率包括内量子效率(光的产生效率)和提取效率两个部分, 其中提取效率由芯片及封装的几何结构和材料光学特性决定, 内量子效率反映出载流子在结区的辐射复合概率. 内量子效率表现出很强的温度依赖特性, 发光强度随温度的变化而改变<sup>[1]</sup>, 同时温度还会改变材料的能带宽度, 使得 LED 的波长产生漂移<sup>[2]</sup>. 由于所谓的自加热效应, 在 LED 使用过程中, 发光波长也会随着输入电流改变而发生变化<sup>[3]</sup>. 大功率 LED 被认为是全固体照明的基本器件, 只有当单个封装 LED 输入功率达到 5W, 流明效率达到 200lm/W 时, 半导体照明技术才有可能同传统照明光源展开全面竞争<sup>[4]</sup>. 输入 LED 的电功率, 除了一部分转换为可以输出的光能量之外, 其余能量都直接或间接地转换为热量耗散在 LED 中, 引起所谓“自加热”效应, 使 LED 芯片温度升高. 在大功率输入情况下, 即使对于经过严格散热设计, 热阻很小的大功率 LED, 自加热效应引起的芯片温度改变也会

对 LED 的光电特性产生很大的影响<sup>[5]</sup>.

实际的 GaN 基 LED 可以看作由一个理想的二极管和一个等效串联电阻组成, 本文通过大功率 LED 的电流-电压特性曲线, 将耗散在 p-n 结和等效串联电阻上的功率分离出来, 研究了它们对于大功率 LED 发光效率的影响, 指出了 p 型 GaN 基材料电阻率过大仍然是影响 GaN 基大功率 LED 发光效率的主要因素, 降低 p 型 GaN 基材料的电阻率, 可以有效降低大功率 LED 的等效串联电阻以及消耗在等效串联电阻上面的电功率, 提高大功率 LED 发光效率.

## 2. 自加热效应对能带宽度和反向饱和电流的影响

半导体材料的能带宽度表现出很强的温度依赖特性, 随着温度的升高, 能带宽度呈现出单调下降的趋势, 其关系可以用 Varshni 公式<sup>[6]</sup>描述为

$$E_c(T) = E_c(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}, \quad (1)$$

其中,  $T$  是绝对温度, 单位为 K,  $E_c(T)$  和  $E_c(0)$  分别是温度  $T$  和 0K 的能带宽度, 单位为 eV,  $\alpha, \beta$  是

<sup>\*</sup> 广东省自然科学基金(批准号: 04011642), 佛山市科技发展专项基金(批准号: 04030021), 教育部光电子器件与系统重点实验室开放基金资助的课题.

Varshni 温度系数. 根据文献报道, 在 GaN 材料中<sup>[7]</sup>,  $\alpha = 8.32 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ ,  $\beta = 835.6 \text{ K}$ ,  $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}$  材料<sup>[8]</sup>的  $\alpha = 10 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ ,  $\beta = 1196 \text{ K}$ . 由于本文采用的发光层组分  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}$  材料 ( $x = 0.20$ ) 与文献<sup>[8]</sup> ( $x = 0.14$ ) 的材料组分接近, 因此, 忽略弯曲因子不会出现很大误差, 在忽略弯曲因子的情况下, 可以得到  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}$  材料的  $\alpha = 10.72 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ ,  $\beta = 1350.4 \text{ K}$ .

反向饱和电流  $I_0$  是二极管方程中的重要参数, 与温度和能带宽度的关系可以用下列公式描述:

$$I_0 = Ae^{-\frac{E_g(T)}{nkT}}, \quad (2)$$

式中  $A$  是与 p-n 结的类型、掺杂浓度、几何尺寸以及构成 p-n 结的材料等有关的系数,  $n$  为理论因子,  $k$  为玻耳兹曼常数. 从(2)式可以看出, 一方面, 温度的增加可以直接引起(2)式中指数部分单调减小, 另一方面, 温度增加还会引起能带宽度的减小, 在这两方面的共同作用下, 反向饱和电流表现出很强的温度依赖特性, 影响着 LED 的  $I$ - $V$  特性.

### 3. 自加热效应对芯片温度的影响

实验中, 采用美国 CREE 公司生产的商品化大功率蓝光 LED 芯片 (C460XB900), 这种芯片采用 CREE 公司特有的 SiC 衬底技术, 在衬底上依次淀积有 n 型 GaN 层、多量子阱 (multi-quantum-well, MQW) 发光层, p 型 GaN 层. 芯片尺寸  $900 \mu\text{m} \times 900 \mu\text{m}$ , 其中发光区域尺寸  $848 \mu\text{m} \times 848 \mu\text{m}$ . 封装时, 将芯片共晶焊接在导热性能极佳的 AlN 陶瓷基座中, 陶瓷基座焊接在  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的金属线路板上, 另外, AlN 陶瓷基座上还制备有与外界形成电路连接的金属电极. 在完成引线焊接之后, 在芯片表面涂敷适量的荧光粉以及起到保护作用的硅胶和环氧树脂. 在分析自加热效应时, 如果能够将器件热阻分解为 p-n 结到衬底热阻、芯片焊接热阻、金属线路板热阻三个部分, 将会大大提高实验的准确性和科学性, 由于电学法测量热阻<sup>[9]</sup>的局限性, 仅得到大功率 LED 的 p-n 结到金属线路板的总的热阻  $\Theta_{j-b}$  约  $14^\circ\text{C/W}$ , 散热性能大大优于传统的引线封装结构.

测量时, 将大功率白光 LED 固定在直径 45mm, 长度为 60mm 的紫铜基座上, 使其满足无限大热沉条件, 这时, p-n 结到环境的热阻  $\Theta_{j-a}$  近似等于  $\Theta_{j-b}$ . 通电后, 一部分电能转换成光能量输出, 其余部分以

热量形式耗散在 LED 芯片中, 这种输入功率引起的自加热效应将导致芯片温度升高, 芯片 p-n 结 (发光区) 温度  $T_j$  可以表示为

$$T_j = (P_e - P_o)\Theta_{j-c} + T_c, \quad (3)$$

式中,  $P_e = I * V$  是输入电功率,  $P_o$  为 LED 输出光功率,  $\Theta_{j-c}$  为 p-n 结到环境的热阻,  $T_c$  为环境温度.

图 1(a) 是大功率白光 LED 的输入电功率和输出光功率关系曲线, 图 1(b) 是根据(1)式得到的芯片温度随输入功率的变化关系曲线, 测量时环境温度保持在  $25^\circ\text{C}$ , 从图中可以看出, 开始时, 输出光功率随着输入电功率的增加而增加, 但是其增加的速率随着输入电功率的增加而减小, 直至出现光输出饱和现象, 即光输出不随电功率增加而增加, 这时, 如果继续增加输入电功率, 光功率输出反而会出现下降的情况. 输入电功率和输出光功率二者关系严重偏离线性, 但是芯片温度与输入电功率近似成线性关系, 这主要是因为输入 LED 的电功率中, 只有不到 2% 的电能转换为输出光能量,  $P_e - P_o$  简化为  $P_e$ . 也不会给芯片温度计算带来很大误差. 另外, 由于芯片尺寸很小, 芯片内部各层的温度差别很小, 将 p-n 结温度理解为整个芯片的温度将会给数据分析和处理带来很大方便, 而且不会造成实验结果出现大的误差.

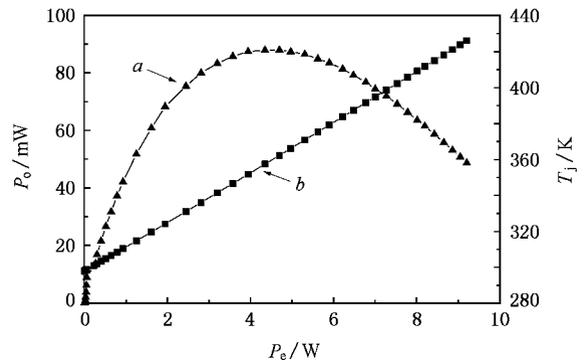


图 1 大功率白光 LED 输出光功率和芯片温度随输入功率的关系

### 4. 自加热效应对等效串联电阻的影响

实际的二极管可以看作一个理想二极管与等效电阻串联而成, LED 工作时的额定电流往往达到十几 mA 甚至几百 mA (功率型), 满足大注入条件, 在这种情况下, 欧姆接触引起的压降也不能忽略, 可以

将 LED 看作一个理想二极管与等效电阻串联而成, 其电流-电压方程近似写为

$$I_F = I_0 e^{\frac{q(V_F - R_s I_F)}{nkT}}, \quad (4)$$

其中  $V_F$ 、 $I_F$  分别是输入电压和输入电流,  $q$  为电子电荷,  $R_s$  是等效串联电阻. 为了描述方便, 上式可以改写为

$$V_F = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_F}{A}\right) + \frac{E_c(T)}{q} + R_s I_F. \quad (5)$$

图 2(a) 给出大功率白光 LED 电流-电压特性曲线. 当电压在 0—2.65 V 之间, 电流小于 20 mA, 降落在串联电阻上的电压与降落在 p-n 结上的电压相比可以忽略, LED 的  $I$ - $V$  特性主要由(5)式右边第一、二项决定. 由于此时输入功率很小, 自加热效应引起的芯片温度升高不到 0.2 K, 温度变化对能带宽度和反向饱和电流的影响可以忽略, 可以近似将温度  $T$  和能带宽度  $E_c$  看作常数. 对这一部分的  $I$ - $V$  特性实验数据进行拟合, 得到忽略自加热效应时理想二极管的特征参数  $n = 2.50$ ,  $I_0 = 8.24 \times 10^{-18}$  mA, 这里理想因子的数值大于 2, 主要是因为异质结和多量子阱结构 p-n 结中, 载流子辐射复合概率很高造成的, 与理论结果非常接近<sup>[10]</sup>. 随着输入功率增加, LED 芯片的温度变化对  $I$ - $V$  特性的影响变得重要起来, 这时应该将自加热效应引起的温度升高的影响考虑进去, 图 2(b) 是考虑了自加热效应后, 理想二极管的  $I$ - $V$  特性. 对比图 2(a) 的实验数据和图 2(b) 上理想二极管的电压降落, 可以得到不同电流下等效串联电阻上的电压降落, 如图 2(c) 所示. 从图中可以看出等效串联电阻上的电压与电流并不是线性关系, 曲线的斜率  $dV_s/dI_F$  随着电流和电压的增加呈现出增加的趋势, 也就是说在大功率输入的情况下, LED 的等效串联电阻并不是一个常数.

对于 GaN 基 LED, 等效串联电阻由 p 型层电阻、n 型层电阻以及 p-n 结电阻等三部分组成. 由于 GaN 基材料 p 型的电阻率比 n 型电阻率高出一个数量级以上<sup>[11]</sup>, 可以认为等效串联电阻主要产生在 p 型层中. 为了更进一步分析等效串联电阻随输入功率的变化情况, 以芯片温度为纵坐标, 图 3 给出了等效串联电阻随温度的变化关系, 这里温度的变化主要由自加热效应引起. 从图中可以看出, 等效串联电阻呈现出先降后升的变化趋势, 影响等效电阻值的因素主要有电离杂质和晶格散射两种机理. 在温度较低时, 电阻率主要由电离杂质决定, 随着温度升高, 电离的杂质数量增加, 材料的迁移率增大, 相应的电阻

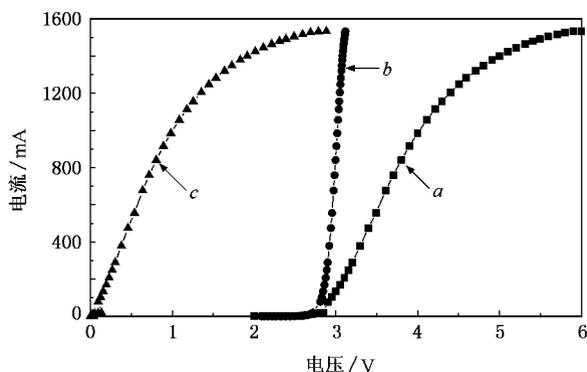


图 2 大功率白光 LED 电流-电压特性曲线

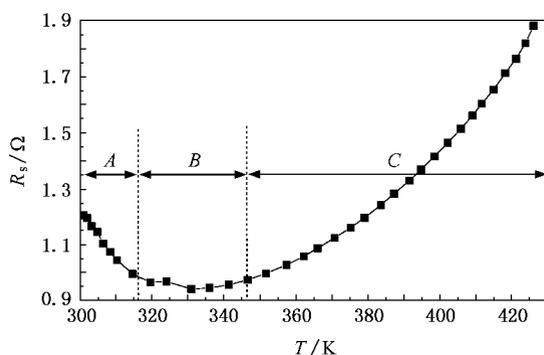


图 3 等效电阻值与芯片温度的变化关系

率下降(图 3 中 A 段). 在温度较高时, 杂质已经全部电离, 本征激发还不十分显著, 晶格振动散射加剧, 使得迁移率随温度升高而降低, 电阻率随温度升高而增大(图 3 中 C 段). 在 426 K 时, 等效串联电阻达到 1.88 Ω. 在图 3 中 B 段, 杂质电离和晶格散射共同作用, 二者对电阻率的影响互相抵消, 在这个温度范围内, 电阻率随温度的变化较小, 等效串联电阻基本上在 0.95 Ω 左右, 约为 426 K 时的 1/2.

## 5. 等效串联电阻功率耗散对大功率白光 LED 流明效率的影响

在大功率白光 LED 中, 当输入电压小于开启电压的时候, 电流很小, 等效串联电阻上的电压降落也很小, 这时, 输入的电功率主要消耗在 p-n 结上. 随着电压增加, 电流也开始迅速增加, 等效串联电阻上的电压降落迅速增加, 相应地, 消耗在等效串联电阻上的功率  $P_R = V_R I_F$  占总输入功率的比例也随着电压和电流的增加迅速增加, 如图 4(a) 所示, 在输入电压在 0—2.75 V 之间,  $P_R/P_e$  在 1% 以下, 输入电压

在 2.75V—6.0V,  $P_R/P_e$  迅速增加到 48%. 与此不同的是, 虽然 p-n 结消耗的功率  $P_D = V_D I_F$  也在不断增加, 但是由于降落在 p-n 结的电压增长速度比较慢, p-n 结消耗的功率占总输入功率的比例却随着输入电压增加开始减小, 如图 4(b) 所示.

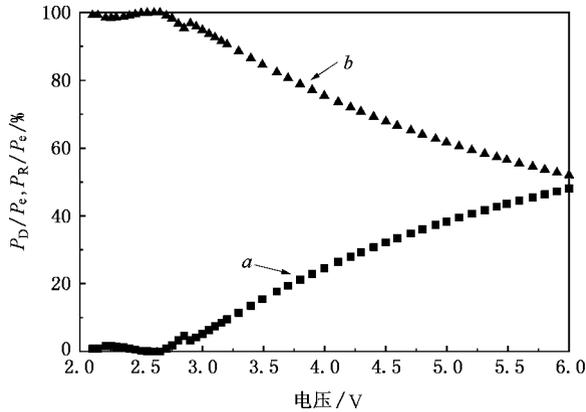


图 4 输入功率在 p-n 结和等效串联电阻上的分配比例与输入电压的关系

消耗在等效串联电阻上的功率都转换成热能散掉, 对光子的产生没有任何贡献, 因此, 等效电阻消耗功率的迅速增加必然会导致大功率白光 LED 流明效率的降低. 为了描述等效电阻消耗功率对流明效率的影响, 我们定义 p-n 结流明效率  $\eta_{p-n} = \phi/P_D$  和总流明效率  $\eta_{total} = \phi/P_e$ . 在图 5 中绘出正向电流大于 80 mA 时, 归一化的 p-n 结流明效率(a)、总的流明效率(b)以及二者之比(c)随输入功率的变化情况. 从图中可以看出, p-n 结流明效率和总流明效率都随着输入功率的增加而下降, 其中 p-n 结流明效率的下降既包括了自加热效应引起的芯片温度升高对载流子辐射复合概率的影响, 也包括了大电流情况下, 泄漏电流增加对流明效率影响. 随着输入功率的增加, 等效电阻上面消耗了大量功率, 所以总流

明效率比 p-n 结流明效率下降得更快, 在大功率输入时, p-n 结流明效率几乎是总流明效率的 2 倍.

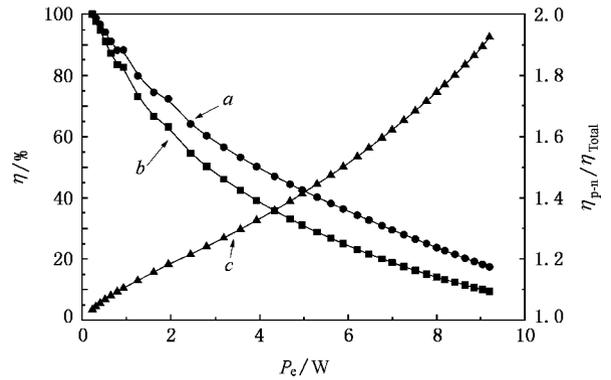


图 5 归一化的 p-n 结流明效率、总的流明效率以及二者之比随输入功率的变化情况

## 6. 结果与讨论

本文研究了 InGaN 基大功率 LED 在大输入功率情况下的电流电压特性, 计算了自加热效应引起 LED 温度升高, 讨论了自加热效应带来的温度升高对发光层材料能带宽度的影响, 并且根据能带宽度的温度依赖特性, 分析了反向饱和电流随输入功率引起的自加热效应改变的情况, 得到了等效串联电阻随输入功率增加的变化情况, 并对其产生原因进行了理论分析. 在此基础上, 计算并分析了等效串联电阻功率耗散对大功率白光 LED 的影响, 在大功率输入的情况下, 等效串联电阻功率耗散的影响, 大功率白光 LED 的流明效率几乎下降了一半. 需要指出的是类似的情况在 AlGaInP 基大功率红、黄光 LED 也广泛存在, 只是由于 AlGaInP 材料系的等效串联电阻比较小, 表现得不像在 InGaN 基大功率 LED 中突出而已.

[1] Hori A, Yasunaga D, Satake A, Fujiwara K 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 3723  
 [2] Cao X A, Leboeuf S F, Rowland L B 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3614  
 [3] Luo Y, Guo W P, Shao J P, Hu H, Han Y J, Xue S, Wang L, Sun C Z, Hao Z B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2720 (in Chinese)  
 [罗毅、郭文平、邵嘉平、胡卉、韩彦军、薛松、汪莱、孙长征、郝智彪 2004 物理学报 **53** 2720]

[4] Jeff Y Tsao 2002 *Light Emitting Diodes (LEDs) for General Illumination* (Washington: Optoelectronics Industry Development Association) pp4-10  
 [5] Park J, Lee C C 2005 *IEEE Elec. Dev. Lett.* **26** 308  
 [6] Cao X A, Teetsov J M, D'Evelyn M P, Merfeld D W 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 7  
 [7] Shan W, Schmidt T J, Yang X H, Hwang S J, Song J J, Goldenberg B 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 985

- [ 8 ] Shan W , Little B D , Song J J , Feng Z C , Schuman M , Stal R A 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 3315
- [ 9 ] Zhang Y Z , Feng S W , Xie X S , Li Y , Yang J , Sun J Y , Lü C Z 2006 *Chinese Journal of Semiconductors* **27** 350 ( in Chinese ) [ 张跃宗、冯士维、谢雪松、李 瑛、杨 集、孙静莹、吕长志 2006 半导体学报 **27** 350 ]
- [ 10 ] Chitnis A , Kumar A , Shatalov M , Adivarahan V , Lunev A , Yang J W , Simin D , Khan M A , Gaska R , Shur M S 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 3800
- [ 11 ] Liu N X , Wang H B , Liu J P , Niu N H , Han J , Shen G D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1424 ( in Chinese ) [ 刘乃鑫、王怀兵、刘建平、牛南辉、韩 军、沈光地 2006 物理学报 **55** 1424 ]

## The power dissipation of equivalent series resistance and its influence on lumen efficiency of GaN based high power light-emitting diodes \*

Li Bing-Qian<sup>1)</sup> Liu Yu-Hua<sup>1)</sup> Feng Yu-Chun<sup>2)</sup>

1) *Department of Optoelectronics & Physics , Foshan University , Foshan 528000 , China )*

2) *Institute of Optoelectronics , Shenzhen University , Shenzhen 518060 , China )*

( Received 14 March 2007 ; revised manuscript received 24 May 2007 )

### Abstract

Because of the self-heating effect of InGaN based high power light-emitting diodes ( LEDs ), the temperature of the LED chip is much higher than the case temperature (  $T_c$  ). The maximum  $T_j$  in our experiment is 148K higher above the case temperature. The voltage drops on p-n junction and equivalent series resistance are extracted from the measured  $I$ - $V$  curve , and then the values of equivalent series resistance at different forward power are obtained. Due to the self-heating effect , the values of equivalent series resistance show a very strong forward power-dependent characteristics , the maximum equivalent series resistance reported in this paper is about 1.9  $\Omega$  at high forward power , being more than twice the minimum value. The power dissipation of equivalent series resistance is increased sharply when the forward power is increased , nearly half of the forward electrical power was dissipated on equivalent series resistance at high power , and it becomes the an important factor restraining the lumen efficiency of high power GaN based light emitting diodes.

**Keywords** : self-heating effect , equivalent series resistance , light-emitting diodes , lumen efficiency

**PACC** : 7280E , 7865P , 7860F , 7840G

\* Project supported by Guangdong Natural Science Foundation ( Grant No 04011642 ) , Foshan Science & Technical Foundation ( Grant No 04030021 ) , Ministry of Education Key Laboratory Foundation of Optoelectronic Devices and Systems.