

文章编号: 1000-7032(2012)06-0616-08

# 非等温模型下 LED 芯片性能与衬底的关系

王天虎<sup>1</sup>, 徐进良<sup>1\*</sup>, 王晓东<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 华北电力大学 低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 发光二极管(LED)中载流子的输运及复合决定了其非均匀的内热源强度及分布,而芯片温度又影响载流子的输运及复合,两者具有强烈的耦合关系。本文利用非等温多物理场耦合模型对以蓝宝石、Si及SiC为衬底的LED芯片的内量子效率、光谱特性及光电转换效率进行了系统研究。结果表明:以SiC为衬底的LED芯片具有最小的效率下垂效应(Efficiency droop)及最高的光谱强度和光电转换效率。这是因为与其他两种衬底的LED芯片相比,以SiC为衬底的LED芯片具有最好的散热性能,因此非均匀温度场对其载流子输运及复合的影响最小,使得活性区中的载流子浓度显著增强,漏电流明显下降。

**关键词:** 发光二极管; 内量子效率; 衬底; 温度场

中图分类号: TN312.8 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20123306.0616

## Relationship Between Light-emitting Diode Performance and Different Substrates Working Under Non-isothermal Model

WANG Tian-hu<sup>1</sup>, XU Jin-liang<sup>1\*</sup>, WANG Xiao-dong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

\* Corresponding Author, E-mail: xjl@ncepu.edu.cn

**Abstract:** The carrier transport and recombination in light-emitting diodes (LEDs) determine the non-uniform intensity and distribution of the internal heat source. The non-uniform temperature field also influences the carrier transport and recombination in LEDs. Thus the carrier transport and recombination are strongly coupled with temperatures. In this paper, the internal quantum efficiency, spectrum characteristic and photoelectric conversion efficiency of LEDs with substrates of sapphire, Si and SiC are systematically studied by a non-isothermal multi-physics-field coupling model. It is shown that the LED with SiC substrate has the smallest efficiency droop effect and exhibits the highest spectrum intensity and photoelectric conversion efficiency, among the LEDs with substrates of sapphire, Si and SiC. This is because the LED with the substrate of SiC has the best thermal dissipation capability, thus the non-uniform temperature field has the smallest effect on the carrier transport and recombination, leading to the significantly enhanced carrier concentration in the active region and decreased current leakage.

**Key words:** light-emitting diodes; internal quantum efficiency; substrate; temperature field

收稿日期: 2012-03-19; 修订日期: 2012-04-10

基金项目: 国家自然科学基金-广东省联合重点基金(U1034004); 国家杰出青年基金(50825603); 中央高校基本科研业务费专项资金(11ZG01)资助项目

作者简介: 王天虎(1985-), 男, 河北邢台人, 主要从事大功率发光二极管的研究。

E-mail: semi.thwang@ncepu.edu.cn, Tel: (010)61772053

## 1 引言

基于Ⅲ族氮化物材料体系的发光二极管(LED)具有能耗低、寿命长、体积小、环保等诸多优点,已经被广泛应用在许多商业领域,包括全彩色显示、交通灯、液晶显示器背光以及白光照明等<sup>[1-3]</sup>。目前,LED正在朝着大功率的方向发展<sup>[3-4]</sup>。当LED工作在大电流密度下(电流密度高于 $10\text{ A/cm}^2$ )时,LED的内量子效率将显著下降,该现象被称为效率下垂效应(Efficiency droop)<sup>[5-6]</sup>。效率下垂效应的物理机制目前仍存在争议,一些研究证明效率下垂效应是由于温度造成的<sup>[7-8]</sup>。

为进一步研究效率下垂效应与温度的依赖关系,改善LED的量子效率与性能,很多研究者进行了温度对LED性能影响的研究工作,并验证了温度对LED性能影响的重要性。Wang等<sup>[9]</sup>研究了在不同的量子阱宽度下,温度对InGaN/GaN多量子阱LED电致发光效率的影响,发现达到最高电致发光效率时的注入电流强烈地依赖于势阱宽度和温度。Huh等<sup>[10]</sup>研究了不同的In浓度下InGaN/GaN多量子阱LED的光特性和电特性,并指出In浓度对LED光效的影响强烈依赖于温度。其他的研究也证明了温度对LED性能有强烈的影响<sup>[11-13]</sup>。然而,这些模型都是基于等温模型的。Efremov等<sup>[7]</sup>利用热阻模型研究了温度、注入电流、热沉的材料及尺寸对LED光效的影响,指出温度严重影响了载流子向量子阱中的注入率,在良好的冷却条件下,工作电流可以提高5~7倍;但模型中假设芯片中的电流分布均匀,忽略了热量在活性区内的传递与扩散。Lee等<sup>[14-15]</sup>的工作虽然包含能量方程,但是内热源强度通过宏观实验测量来获得,没有耦合载流子的微观效应。

总之,上述研究都没有考虑载流子的输运复合机制与LED内部的非均匀温度场耦合。实际上,LED工作时载流子在LED内部的输运及复合决定了芯片的内热源,导致LED内部存在显著的温度梯度。另一方面,载流子的扩散系数、迁移率、输运、复合以及能带结构等都受内部温度的影响,两者具有强烈的耦合效应。根据Wang等<sup>[16]</sup>建立的非等温耦合模型,大电流密度下芯片内部存在显著温差,等温模型和非等温模型下芯片的

性能差异显著,等温模型无法准确预测芯片内量子效率、光谱特性、光电转换效率等性能。因此利用耦合模型来研究LED性能是非常必要的。在LED结构中,发光层只有几个微米,而衬底的厚度在几十到几百个微米,不同衬底的导热系数等物性参数差异显著<sup>[17]</sup>,对LED内部的温度场起决定作用。鉴于此,本文在3种不同的衬底下利用非等温模型<sup>[16]</sup>研究不同衬底LED的性能,揭示了衬底对LED性能的影响。

## 2 数学模型、芯片结构与参数

图1为芯片结构示意图。本文设计了3种芯片结构,分别记为芯片A、B和C。3种芯片只有衬底部分不同,芯片A衬底为蓝宝石,芯片B为Si,芯片C为SiC。厚 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的衬底上生长有 $50\text{ nm}$ 未掺杂的GaN缓冲层,其上生长 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的n-GaN层(掺杂浓度为 $5\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ),活性区是5个周期的 $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N/GaN}$ 多量子阱(MQW)结构,垒(Barrier)厚 $15\text{ nm}$ ,阱(Well)厚 $2.2\text{ nm}$ 。活性区上是一层 $50\text{ nm}$ 厚的 $\text{p-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 电子阻挡层(EBL),p型掺杂浓度为 $1\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 。最后生长 $0.25\text{ }\mu\text{m}$ 的p-GaN层(掺杂浓度为 $1.2\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ),衬底宽度 $300\text{ }\mu\text{m}$ ,活性区宽度 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。n型电极和p型电极的宽度分别为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 和 $80\text{ }\mu\text{m}$ 。

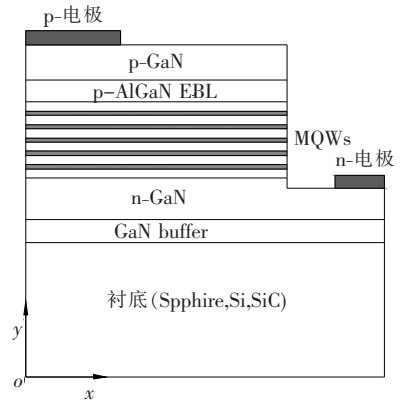


图1 LED芯片结构示意图

Fig. 1 Schematic of LED structure

根据文献<sup>[16]</sup>,内热源主要发生在多量子阱区,载流子在LED内部的传递及复合决定了内热源在LED内部的不均匀强度分布,进而决定了LED内部的不均匀温度场。反之,温度场又影响描述电子空穴传递及复合的基本物性参数,从而影响电子空穴在LED内部的传递及复合过程,两者具有强烈的耦合效应。因此模型中的基本方程

势必包括描述载流子浓度分布的连续性方程<sup>[18]</sup>:

$$\nabla \cdot (D_n \nabla n - n\mu_n \nabla \psi) - R = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (D_p \nabla p - p\mu_p \nabla \psi) - R = 0, \quad (2)$$

式中  $n$  和  $p$  为电子和空穴浓度,  $R$  为静复合率,  $\psi$  为静电势,  $\mu_n, \mu_p$  分别为电子和空穴的迁移率,  $D_n, D_p$  分别为电子和空穴的扩散系数。

由于电子空穴的传递是在电势驱动下完成的, 因此还需要描述电势分布的泊松方程<sup>[19]</sup>:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \psi) - e(n - p + N_A - N_D) = 0, \quad (3)$$

式中  $\varepsilon_0, \varepsilon_r$  为材料的真空介电常数和相对介电常数,  $e$  为单位元电荷,  $N_A$  和  $N_D$  为浅能级施主和受主浓度。

由于量子阱的厚度是纳米量级, 具有量子效应, 因此还需要引入薛定谔方程来求解载流子在量子阱中的波函数<sup>[20]</sup>, 进而获得它们在量子阱中的浓度分布:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{m(x, y)} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right] - \frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{m(x, y)} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right] + \psi(x, y) \Phi = E \Phi, \quad (4)$$

式中  $\Phi, m, E$  分别为载流子的波函数、有效质量和本征能量。

在 LED 内部载流子的传递及复合过程中, 伴随有焦耳热、非辐射复合热、汤姆逊热及珀尔帖热 4 种产热机理, 并且每种内热源强度均依赖于载流子在 LED 内部的传递及复合, 因此还需要引入能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q = 0, \quad (5)$$

式中  $\lambda$  为材料的导热系数;  $T$  为晶格的绝对温度;  $q$  为内热源, 是焦耳热  $q_j$ 、非辐射复合热  $q_r$ 、汤姆逊热  $q_t$ 、珀尔帖热  $q_p$  之和, 即<sup>[21]</sup>:

$$q = q_j + q_r + q_t + q_p. \quad (6)$$

由此模型实现了 LED 内部多物理场的耦合。上述控制方程中相关物理量的计算参考文献 [16], 能带的计算方法与材料的物性参数参考文献 [22-23]。图 2 给出了  $I$ - $V$  特性数值结果与文献 [5] 中实验结果的对比, 以此来验证模型的正确性。电流密度为 0 ~ 150 mA, 其他参数与文献 [5] 相同。比较表明, 本文的非等温模型可准确预测 LED 的性能, 特别是对于高电流密度的情况。

假设 LED 芯片工作在稳态条件下, 衬底底部设为等温边界条件 ( $T = 313$  K), 其他外边界绝热, 模拟中忽略界面热阻, 设界面处的温度与热流密度连续。注入 LED 中的电流分为在量子阱中复合的电流  $I_{QW}$  与溢出活性区的漏电流  $I_{leak}$ ,  $I_{QW}$  又包括辐射复合电流  $I_{rad}$ 、Shockley-Read-Hall (SRH) 复合电流  $I_{SRH}$  及俄偈复合电流  $I_{Auger}$ 。内量子效率 ( $\eta_{IQE}$ ) 定义为活性区中产生的光子数与注入 LED 的电子数之比, 即:

$$\eta_{IQE} = \frac{e P_{int}}{hv I} = \frac{I_{rad}}{I} = \frac{I_{rad}}{I_{rad} + I_{SRH} + I_{Auger} + I_{leak}}, \quad (7)$$

其中,  $e$  为单位元电荷,  $hv$  为光子能量,  $P_{int}$  为活性区中产生的光能量。

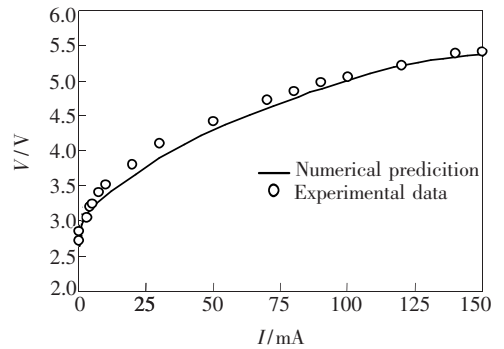


图 2  $I$ - $V$  特性数值结果与实验结果的对比

Fig. 2 Comparison of the computed  $I$ - $V$  curve with the experimental determined one

### 3 结果与讨论

图 3 给出了芯片 A、B、C 的  $\eta_{IQE}$  随电流的变化特性。相对于芯片 A, 芯片 B、C 的  $\eta_{IQE}$  显著提高, 随着电流的升高更加明显。效率下垂度定义为  $(\eta_{IQE, max} - \eta_{IQE, min}) / \eta_{IQE, max}$ 。计算得出芯片 A、B、C 的效率下垂度分别为 35%、17%、10%, 此结果与外延层 (n-GaN 与 p-GaN 之间的区域) 的不均匀温度场密切相关。

图 4 给出了 3 种衬底的芯片的最高温度随电流的变化规律。相同电流下, Si 衬底 LED 的结温要低于蓝宝石衬底, 而 SiC 衬底要低于 Si 衬底。随着电流的增加, Si 衬底 LED 结温的上升速度小于蓝宝石衬底, 而 SiC 衬底结温的上升速度要低于 Si 衬底, 且在大电流时更明显。其原因主要是蓝宝石热导率为  $0.46 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ , Si 为  $1.56 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ , SiC 为  $4.9 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ <sup>[17, 24]</sup>, 所以

SiC 衬底具有最好的散热性。

衬底热导率的不同使外延层温度具有显著差异。图 5 给出了 600 A/m 电流下芯片 A、B、C 外延层的温度场分布。生长方向上没有温度梯度的原因在于外延层厚度  $H_a$  仅为 250 nm, 其导热系数  $\lambda$  约为 1.5 W/(cm · K), 通常 LED 冷却热沉的对流换热系数  $h$  在  $10^6$  W/(m<sup>2</sup> · K) 量级, 所以厚度方向的  $Bi = H_a h / \lambda \ll 1$ , 满足集总热容系统。而外延层宽度  $W_a$  为 200  $\mu$ m, 使宽度方向的  $Bi = W_a h / \lambda \gg 1$ , 不满足集总热容系统, 因此宽度方向温度不

均匀。这将导致外延层能带结构发生明显变化, 进而影响 LED 芯片的性能。

图 6 给出了 600 A/m 电流时不同衬底下导带的能带图。量子阱区温度升高使得势垒和势阱的导带发生上移, 但由于势垒与势阱的材料不同, 上移的程度不同, 导致蓝宝石、Si、SiC 衬底的 LED 势阱深度依次加深; 使电子在活性区中的运输阻力依次增大, 减弱了电子向最后一个势阱中积累的程度, 从而减少了电子从活性区向 p 型区的泄漏, 增加量子阱中的电子浓度。图 7 给出了 600 A/m 电流时不同衬底的价带图。外延层的温度降低也使价带费米能级降低, 减小价带中的有效势垒, 削弱了电子阻挡层价带势垒对空穴的阻碍作用, 增加了空穴的注入率。有效势垒定义为 EBL 前端的费米能级与 EBL 的最高势垒之差<sup>[25]</sup>。从图 7 可得蓝宝石、Si、SiC 衬底的价带有效势垒分别为 439, 370, 343 meV, 降低的价带有效势垒使空穴更容易注入量子阱内, 增强的空穴浓度使电子的复合率提高, 使得活性区中未复合的电子减少, 进一步减小了电子的漏电流。

图 8 分别给出了 600 A/m 电流下芯片 A、B、C 的活性区中电子和空穴的浓度分布。在所有量子阱中, 芯片 B 和芯片 C 的载流子浓度均明显增强。和芯片 A 相比, 以最后一个量子阱为例, 芯片 B 的电子浓度提高了 14.66%, 空穴浓度提高了 26.85%; 而芯片 C 的电子浓度提高了 28.47%, 空穴浓度提高了 38.69%。以上结果表明, 由于外延层能带结构的变化, 显著增强了空穴的注入率, 有效限制了电子从活性区向 p 区溢出, 增强了活性区中的载流子浓度。

图 9、图 10 进一步验证了上述分析。图 9 给出了不同衬底时从量子阱向 p 区逃逸的漏电流率。LED 工作时, 电子和空穴分别从 n 区和 p 区

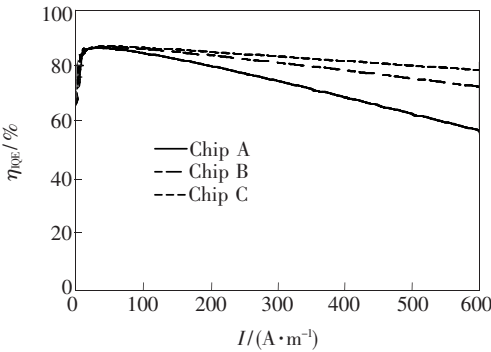


图 3 不同衬底 LED 的  $\eta_{OQE}$  随电流的变化

Fig. 3  $\eta_{OQE}$  as a function of injection current for LEDs with different substrates

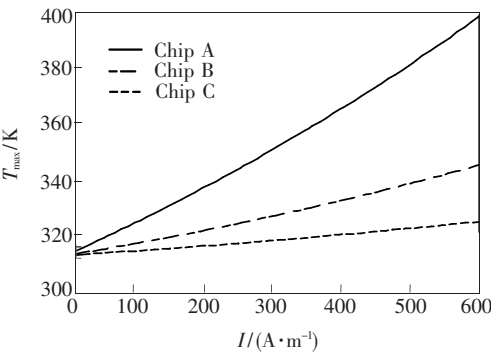


图 4 不同衬底芯片的最高温度随电流的变化

Fig. 4 The max chip temperature as a function of injection current for LEDs with different substrates

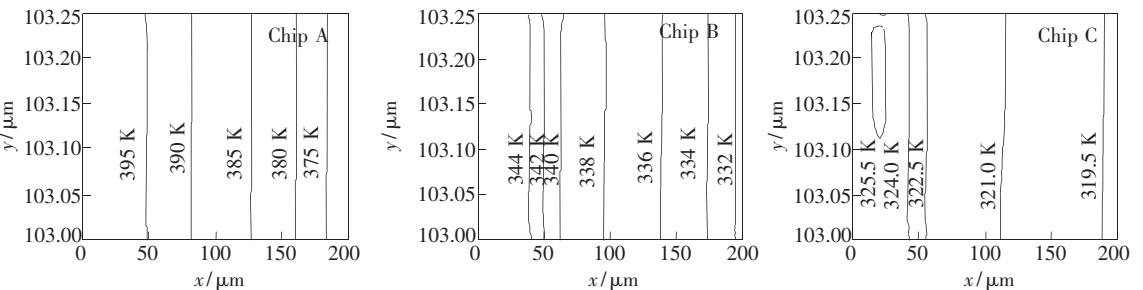


图 5 600 A/m 电流时, 芯片 A、B、C 外延层的温度场分布。

Fig. 5 The epilayer temperature profile for chips A, B and C at injection current of 600 A/m.

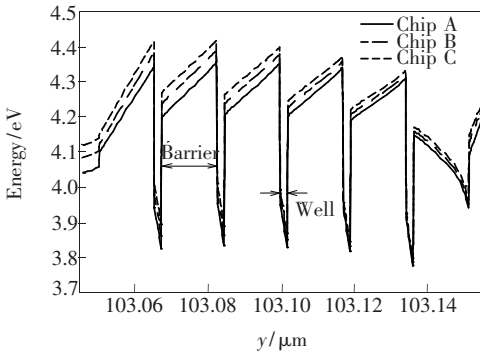


图 6 600 A/m 电流时,不同衬底 LED 的导带图。

Fig. 6 The conduction band diagrams for LEDs with different substrates at injection current of 600 A/m

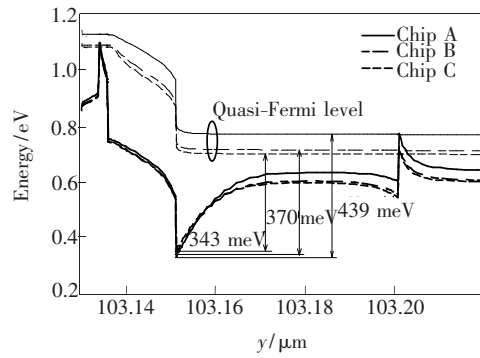


图 7 600 A/m 电流时,不同衬底 LED 的价带图。

Fig. 7 The valence band diagrams for LEDs with different substrates at injection current of 600 A/m

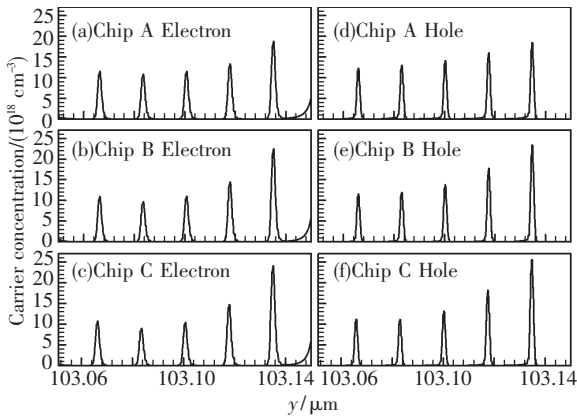


图 8 600 A/m 电流时,不同衬底 LED 活性区中的电子和空穴浓度分布。

Fig. 8 The carrier concentration in the active region for LEDs with different substrates at injection current of 600 A/m

注入量子阱中,并在阱中发生复合,没有被量子阱捕获而溢出到 p 区的电流称之为漏电流。通过上述分析,漏电流由两种效应共同决定:一是活性区对电子运输的抑制,减少电子从活性区向 p 型区

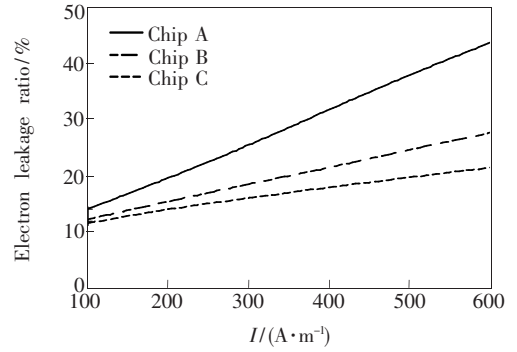


图 9 不同衬底 LED 的漏电流率

Fig. 9 The current leakage ratio as a function of injection current for LEDs with different substrates

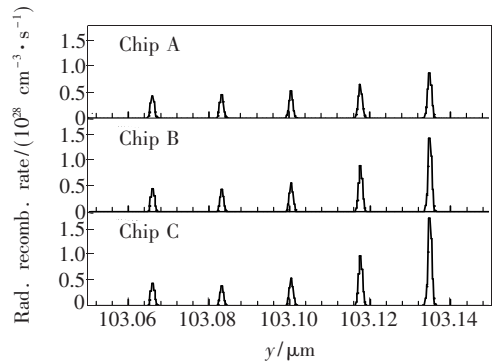


图 10 600 A/m 电流时,不同衬底 LED 的辐射复合率。

Fig. 10 The radiative recombination rate for LEDs with different substrates at injection current of 600 A/m

泄漏;二是空穴的注入率提高后,增加了活性区中的电子复合率,导致溢出活性区的电子减少。电子漏电流率  $\delta$  定义为从活性区溢出到 p 型区的电流与注入电流之比,即  $\delta = I_{\text{leak}}/I$ ,如式(7)所示。

由图 9 可知,在相同的电流下,芯片 B 的  $\delta$  显著低于芯片 A,芯片 C 的  $\delta$  低于芯片 B。3 种芯片的  $\delta$  都随电流的升高而增加,且  $\delta$  之差也随着电流的升高而增加。根据式(7),在相同注入电流下,漏电流减小使活性区中复合电流增加,增加了辐射复合率。图 10 给出了 600 A/m 电流下不同衬底 LED 的辐射复合率,和芯片 A 相比,芯片 B 和 C 多量子阱中的平均复合率分别提高了 27.33% 和 37.26%,使得内量子效率提高(见图 3)。

图 11 给出了 600 A/m 电流时不同衬底 LED 的光谱特性。芯片 C、B、A 的光谱强度依次降低,和芯片 C 相比,芯片 B 和 A 的峰值波长分别发生了 1.5 nm 和 3 nm 的红移。此结果可解释如下。

在模型中,半导体材料的物性参数、载流子的

输运与分布、复合率、能带结构等都是温度的函数。Ⅲ-V族化合物半导体中的 GaN、AlN、InN 及其他二元化合物的带隙可表示如下<sup>[26]</sup>:

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T^2 / (T + \beta), \quad (8)$$

其中  $E_g(T)$  和  $E_g(0)$  分别是温度为  $T$  K 和 0 K 时的带隙,  $\alpha, \beta$  是与材料相关的常数。三元化合物  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  的带隙可表示为二元化合物的线性组合<sup>[26]</sup>:

$$E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x \cdot E_g(\text{InN}) + (1-x) \cdot E_g(\text{GaN}) - 3.0 \cdot x \cdot (1-x), \quad (9)$$

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x \cdot E_g(\text{AlN}) + (1-x) \cdot E_g(\text{GaN}) - 1.0 \cdot x \cdot (1-x), \quad (10)$$

其中  $E_g(\text{InN})$ 、 $E_g(\text{AlN})$ 、 $E_g(\text{GaN})$  分别为 InN、AlN、GaN 在温度为  $T$  时的带隙。由方程(8)~(10)可知, 随着温度的升高, 活性区带隙会变窄。光谱的发射波长与带隙密切相关, 可表述如下<sup>[18]</sup>:

$$hv \approx E_g, \quad v \approx c/\lambda_0, \quad E_g \approx hc/\lambda_0, \quad (11)$$

其中  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $\lambda_0$  为光波长。从方程(11)可看出, 带隙减小后, LED 的发光波长会变长, 导致红移现象。在能带结构中, 设能量  $E$  到  $E + dE$  区间内的量子态为  $dZ$ , 则有<sup>[18]</sup>:

$$dZ = \kappa (E - E_c)^{1/2} dE, \quad (12)$$

其中  $E_c$  是导带能级,  $\kappa$  为一常数:

$$\kappa = 4\pi V (2m_n^*)^{3/2} / h^3, \quad (13)$$

其中  $2V$  为  $k$  空间中的量子态密度,  $m_n^*$  为导带底电子有效质量。由方程(12)可知, 当带隙变小后, 量子态增多, 但在相同的注入电流下, 总的电子数相同, 因此电子密度就会减小, 即  $dN/dZ < 0$ 。这意味着单位能量内复合的电子和空穴的数目减

少, 因此削弱了辐射复合率, 使内量子效率下降, 光谱强度降低, 和前面讨论的结果相吻合。本文非等温模型的结果也与 Lee 等<sup>[15]</sup> 的实验结果一致, 在他们的工作中, 在特定电流下, 随着衬底温度升高, 光谱强度下降并发生红移。

图 12 给出了不同衬底的芯片的光电转换效率。光电转换效率定义为自发辐射光功率与输入电功率之比, 是衡量 LED 性能的重要参数。外加电流密度增加导致量子阱内部温度升高, 内量子效率降低, 自发辐射功率减小; 另外, 温度升高使得驱动电压升高, 例如 600 A/m 电流时, 蓝宝石、Si、SiC 三种衬底的输入电压分别为 11.61, 11.70, 11.73 V。二者共同作用使得光电转换效率下降。在大电流 600 A/m 时, Si 和 SiC 衬底的光电转换效率与蓝宝石相比, 分别增加了 4.1% 和 5.7%。由此可见, 有效地移除 LED 芯片内部的产热量、降低芯片温度是提升其性能的重要途径。

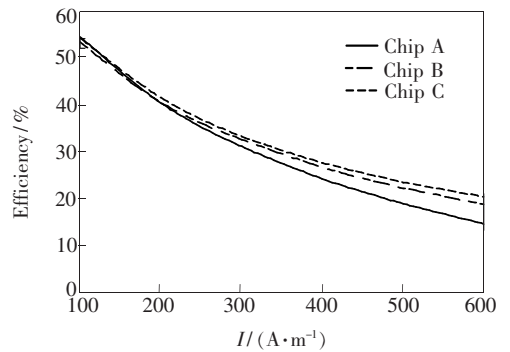


图 12 不同衬底 LED 的光电转换效率

Fig. 12 The photoelectric conversion efficiency for LEDs with different substrates

## 4 结 论

载流子在 LED 内部的输运及复合与 LED 内部的非均匀温度场之间具有强烈的耦合效应。本文利用非等温多物理场耦合模型研究了蓝宝石、Si、SiC 三种衬底的 LED 芯片的性能。结论如下:

1. 随着电流的增加, Si 衬底 LED 结温的上升速度小于蓝宝石衬底, 而 SiC 衬底结温的上升速度要低于 Si 衬底, 在大电流时差异更明显。外延层的温度分布存在显著差异, 宽度方向上温度呈不均匀分布, 厚度方向上不存在温度梯度。

2. 芯片 A、B、C 的导带势阱深度依次加深, 增加了对电子的限制; 价带有效势垒依次降低, 增大了空穴向活性区中的注入率。这使得以 SiC 为衬

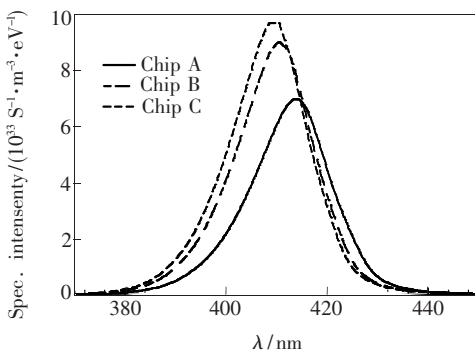


图 11 不同衬底下 LED 的光谱特性

Fig. 11 The spectrum characteristic for LEDs with different substrates

底的 LED 活性区中载流子浓度最高,漏电流最小,因而具有最优的内量子效率特性和最高的光电转换效率。

3. 和芯片 C 相比,芯片 B 和 A 的光谱强度明

显下降,且峰值波长发生红移。降低芯片温度对于提升 LED 性能至关重要。

4. 效率下垂效应归因于由于温度升高而导致的漏电流增加。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Krames M R, Shechkin O B, Mueller-Mach R, *et al.* Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting [J]. *IEEE J. Display Technol.*, 2007, 3(2):160-175.
- [ 2 ] Yin Yue, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.* Effects of electrode structure on the current distribution of AlGaInP-LED array [J]. *Chin. J. Lumin. (发光学报)*, 2011, 32(10):1051-1056 (in Chinese).
- [ 3 ] Chai Weiwei, Chen Qinghua, Li Linghong, *et al.* Heat dissipation analysis of high power LED connected to copper coated heat sink by soldering [J]. *Chin. J. Lumin. (发光学报)*, 2011, 32(11):1171-1175 (in Chinese).
- [ 4 ] Wang Wanqing, Li Xifeng, Shi Jifeng, *et al.* Effect of ITO interface modulation layer on the performances of LEDs with Ga-doped ZnO electrode [J]. *Chin. J. Lumin. (发光学报)*, 2012, 33(2):210-215 (in Chinese).
- [ 5 ] Kuo Y K, Chang J Y, Tsai M C, *et al.* Advantages of blue InGaN multiple-quantum well light-emitting diodes with InGaN barriers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(1):011116-1-3.
- [ 6 ] Hader J, Moloney J V, Koch S W. Density-activated defect recombination as a possible explanation for the efficiency droop in GaN-based diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(22):221106-1-3.
- [ 7 ] Efremov A A, Bochkareva N I, Gorbunov R I, *et al.* Effect of the Joule heating on the quantum efficiency and choice of thermal conditions for high-power blue InGaN/GaN LEDs [J]. *Semiconductors*, 2006, 40(5):605-610.
- [ 8 ] Schubert E F. *Light-emitting Diodes* [M]. New York: Cambridge University Press, 2006:38-43.
- [ 9 ] Wang C H, Chen J R, Chiu C H, *et al.* Temperature dependent electroluminescence efficiency in blue InGaN-GaN light emitting diodes with different well widths [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, 22(4):236-238.
- [ 10 ] Huh C, Schaff W J, Eastman L F, *et al.* Temperature dependence of light-output performance of InGaN/GaN multiple-quantum well light-emitting diodes with various In compositions [J]. *SPIE*, 2004, 5187:330-335.
- [ 11 ] Fujiwara K, Jimi H, Kaneda K. Temperature-dependent droop of electroluminescence efficiency in blue (In, Ga)N quantum-well diodes [J]. *Phys. Stat. Sol. c*, 2009, 6(S2):S814-S817.
- [ 12 ] Kim C S, Kim J H, Yee K J, *et al.* Temperature- and bias-dependent study of photocurrent spectroscopy in an InGaN light-emitting diode operating near 400 nm [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2010, 57(4):793-796.
- [ 13 ] Li Y, Zhao W, Xia Y, *et al.* Temperature dependence of the quantum efficiency in green light emitting diode dies [J]. *Phys. Stat. Sol. c*, 2007, 4(7):2784-2787.
- [ 14 ] Lee H K, Yu J S. Thermal analysis of InGaN/GaN multiple quantum well light emitting diodes with different mesa sizes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010, 49(4):04DG11-1-5.
- [ 15 ] Lee D H, Lee H K, Yu J S, *et al.* Temperature and thermal characteristics of InGaN/GaN vertical light-emitting diodes on electroplated copper [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2011, 26(5):055014-1-6.
- [ 16 ] Wang T H, Wang X D, Xu J L. The investigation of high power LED by a non-isothermal coupling model [J]. *Journal of Engineering Thermophysics (工程热物理学报)*, 2012, 33(4):647-650 (in Chinese).
- [ 17 ] Liu L, Edgar J H. Substrates for gallium nitride epitaxy [J]. *Materials Science and Engineering R*, 2002, 37(3):61-127.
- [ 18 ] Liu E K, Zhu B S, Luo J S. *The Physics of Semiconductor* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994:108-125 (in Chinese).
- [ 19 ] Grupen M, Hess K. Simulation of carrier transport and nonlinearities in quantum well laser diodes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, 34(1):120-140.
- [ 20 ] Ebaisieux G D, Herve-Gruyer G, Palmier J F, *et al.* Self-consistent 1-D solution of multi-quantum-well laser equations [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1997, 29(6):651-660.

- [21] Wachutka G K. Rigorous thermodynamic treatment of heat generation and conduction in semiconductor modeling [J]. *IEEE Transactions on Computer Aided Design*, 1990, 9(11):1141-1149.
- [22] Chuang S L, Chang C S.  $k \cdot p$  method for strained wurtzite semiconductors [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, 54(4):2491-2504.
- [23] Vurgaftman I, Meyer J R. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 94(6):3675-3696.
- [24] Wang R G, Chen Z Q, Hu G Y. The comparison of LED dedding materials SiC, ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. *Science Technology and Engineering* (科学技术与工程), 2006, 6(2):121-126 (in Chinese).
- [25] Kuo Y K, Shih Y H, Tsai M C, et al. Improvement in electron overflow of near-ultraviolet InGaN LEDs by specific design on last barrier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, 23(21):1630-1632.
- [26] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 89(11):5815-5875.

## 《中国光学》征稿启事

《中国光学》,双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN22-1400/04;国内外公开发行,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- ★中国科技核心期刊
- ★中国光学学会会刊
- ★中国学术期刊(光盘版)源期刊
- ★万方数字化期刊全文数据库源期刊
- ★中国科技期刊数据库源期刊
- ★美国《化学文摘》(CA)源期刊
- ★美国乌利希国际期刊指南(Ulrich LPD)源期刊
- ★俄罗斯《文摘杂志》(AJ)源期刊
- ★波兰《哥白尼索引》(IC)源期刊

**报道内容:**基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

**发稿类型:**学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿,洽谈合作。

**主管单位:**中国科学院

**主办单位:**中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

**编辑出版:**《中国光学》编辑部

**投稿网址:**<http://www.chineseoptics.net.cn>

**邮件地址:**[chineseoptics@ciomp.ac.cn](mailto:chineseoptics@ciomp.ac.cn), [zgxcn@126.com](mailto:zgxcn@126.com)

**联系电话:**(0431)86176852;(0431)84627061      **传 真:**(0431)84613409

**编辑部地址:**长春市东南湖大路3888号(130033)