

自加热效应下 AlGaInN 电子阻挡层对 LED 性能的影响

王天虎^①, 徐进良^{②*}, 王晓东^{②*}

① 华北电力大学能源的安全与清洁利用北京市重点实验室, 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

* 联系人, E-mail: xjl@ncepu.edu.cn; wangxd99@gmail.com

2013-06-26 收稿, 2013-07-24 接受, 2014-04-01 网络版发表

国家自然科学基金(U1034004, 51210011, 50825603)和中央高校基本科研业务费专项资金(12QX14)资助

摘要 在自加热效应下, 对有、无 AlGaInN 电子阻挡层的两种发光二极管芯片进行了数值研究. 系统分析了芯片能带结构, 载流子输运与分布特性, 内部焦耳热和复合热特性, 内量子效率衰落的物理机制, 并讨论了不同俄侗复合系数在自加热效应下对效率衰落效应的影响. 模拟结果表明: 当在 p-GaN 层与活性层间插入 AlGaInN 电子阻挡层后, 效率衰落效应得到显著改善, 芯片结温明显升高. 俄侗复合热不是内热源的主要贡献, 可忽略不计. 效率衰落效应受芯片结温影响不大, 电子漏电流与俄侗复合是效率衰落的主要原因.

关键词

发光二极管
效率衰落
自加热
电子阻挡层
俄侗复合

基于有机及氮化物的发光二极管(LED), 由于在医学诊断、光存储、全彩色显示、固体照明等领域具有广泛的应用前景而备受关注^[1-10]. 然而, 在大电流条件下(电流高于几个毫安培)会呈现效率衰落效应, 即随着注入电流的增加内量子效率(IQE)显著降低^[11-13], 严重阻碍了 LED 在大功率、高亮度领域的应用. 为改善效率衰落效应, 研究者提出了各种各样的芯片结构设计, 包括优化活性区中多量子阱(MQW)的结构^[5,14-19], 设计不同类型的量子阱势垒^[20-26], 优化电子阻挡层(EBL)的结构^[13,27-32], 优化活性区中最后一个势垒的结构^[33-37], 减小内部极化效应等^[11,12,15,20,21]. 伴随着这些研究, 一些揭示效率衰落效应的物理机制被提出, 包括从活性区溢出的漏电流^[11-13,30,34,35]、活性区中的量子限制斯塔克效应^[15,18]、较弱的空穴注入率^[25,26,31,32]、俄侗复合^[38,39]、自加热效应等^[40,41]. 然而, 这些机理之间仍存在争议, 导致效率衰落效应的物理机制还不够清楚, 仍需进一步研究.

对于电子阻挡层结构的优化, 有研究指出, 在 p 型 GaN 层和活性区之间插入 p 型 AlGaInN EBL 可以有

效阻止电子漏电流, 与没有 EBL 的 LED 相比, 具有 p 型 AlGaInN EBL 的 LED 拥有更好的发光性能^[27,29,42]. 然而 Ryu 等人^[43]指出, 无 EBL 的 LED 比有 EBL 的 LED 具有更高的内量子效率. Yen 等人^[28]的研究中, 将传统的 p 型 AlGaInN EBL 移除, 并在 n 型 GaN 层和活性区之间插入 n 型 AlGaInN 层, 可使漏电流减小且活性区中的载流子分布更加均匀, 效率衰落效应得到很大程度改善. Han 等人^[27]系统研究了 InGaInN/GaN LED 中 EBL 对效率衰落效应的影响, 在大电流条件下, 去除 EBL 可以增强空穴的注入率, 效率衰落效应得到有效抑制. 因此, LED 中是否采用 EBL 仍无明确定论, 而且这些研究所用的模型均为等温模型^[27,28,30,31], 忽略了芯片内热源导致的自加热效应. 因此, 有必要在自加热效应下, 研究 EBL 对 LED 性能的影响.

一些研究证明, 内热源对 LED 效率衰落效应及发光性能具有强烈影响. Chen 等人^[41]指出, 在大电流下, LED 工作中产生的内部热会减小内量子效率与外量子效率. Efremov 等人^[40]研究了温度、注入电流、衬底材料及尺寸对 LED 发光效率的影响, 结果表明,

引用格式: 王天虎, 徐进良, 王晓东. 自加热效应下 AlGaInN 电子阻挡层对 LED 性能的影响. 科学通报, 2014, 59: 1564-1572

英文版见: Wang T H, Xu J L, Wang X D. Self-heating dependent characteristic of GaN-based light-emitting diodes with and without AlGaInN electron blocking layer. Chin Sci Bull, 2014, 59, doi: 10.1007/s11434-014-0235-4

大电流条件下,内量子效率的降低归因于内部焦耳热,且芯片温度严重影响了载流子向活性区中的注入.Wang 等人^[14]研究了 InGaN/GaN LED 电致发光对温度的依赖特性,发现当芯片达到最高发光效率时,对应的注入电流大小强烈地依赖于势阱宽度和芯片温度.相反, Kim 等人^[11]的实验中,随着温度的升高,效率衰落程度反而减弱,因此指出温度不是导致效率衰落的原因. Crawford^[3]的工作中指出,效率衰落并非只是由简单的自加热效应导致的,在有、无自加热效应下 LED 均呈现效率衰落效应.因此,自加热效应与效率衰落效应之间的关系仍不清楚.

鉴于以上原因,本文设计了有、无 AlGaInN EBL 的两种 LED 芯片,引入芯片内热源,在自加热条件下研究 EBL 对 LED 性能的影响.在此基础上,通过两种芯片性能的对比,系统分析了自加热效应对效率衰落效应的影响,试图揭示效率衰落效应的物理机制.

1 芯片结构和模型参数

文中选取了两种 LED 芯片(分别记为芯片 A 和芯片 B). 芯片 A 生长在 100 μm 厚蓝宝石衬底上,在生长 InGaN/GaN 多量子阱结构之前,先在蓝宝石衬底上生长 50 nm 厚的未掺杂 GaN 缓冲层及 3 μm 厚的 n 型 GaN 层(n 型掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). 活性区包括 5 个 2.5 nm 厚的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 量子阱,分别被 6 个 9 nm 厚的 GaN 量子势垒隔开. 活性区之上生长 150 nm 厚的 p 型 GaN 层(p 型掺杂浓度为 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). 芯片

B 的结构与芯片 A 一致,只是在活性区与 p 型 GaN 层之间插入 1 个 20 nm 厚的 p 型 $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.46}\text{In}_{0.16}\text{N}$ 电子阻挡层(p 型掺杂浓度为 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). 芯片 A 和 B 的几何尺寸均为 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$. 图 1 给出了两种芯片结构的示意图.

LED 的光特性与电特性采用 APSYS 软件进行模拟研究, APSYS 通过求解泊松方程、载流子输运方程、电子和空穴的连续性方程、量子力学方程、光子速率方程及引入的能量方程来求解 LED 的物理特性. 模拟中将非辐射复合及漏电流效应考虑在内,利用 Chuang 等人^[44,45]和他们发展的 $6 \times 6 k p$ 方法来计算能带结构. InN, GaN 和 AlN 的带隙均视为温度的函数,可以用 Varshni 定律表示为^[46]

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

其中 $E_g(T)$ 表示温度为 T 时的带隙, $E_g(0)$ 表示温度为 0 K 时的带隙, α 和 β 是与材料相关的常数. 与 InN, GaN 和 AlN 相关的 $E_g(0)$, α 和 β 的取值分别列于表 1 中. 对于 InGaN 和 AlGaN 的三元化合物,相关的带隙可以表示如下^[46]:

$$E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = E_g(\text{InN})x + E_g(\text{GaN})(1-x) - b(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})x(1-x), \quad (2)$$

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = E_g(\text{AlN})x + E_g(\text{GaN})(1-x) - b(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})x(1-x), \quad (3)$$

其中 $E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})$ 和 $E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})$ 分别表示 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的带隙能, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的能带

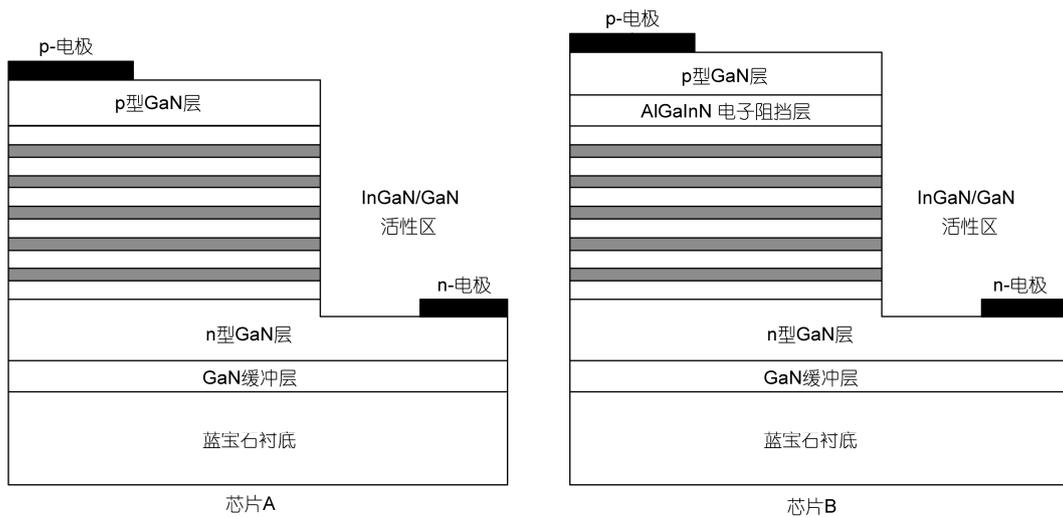


图 1 芯片 A 和芯片 B 的结构示意图

表1 二元化合物半导体材料能带参数

参数	InN	GaN	AlN
$E_g(0)(\text{eV})$	0.735	3.507	6.230
$\alpha(\text{meV K}^{-1})$	0.245	0.909	1.799
$\beta(\text{K})$	624	830	1462

弯曲系数 $b(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})$ 和 $b(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})$ 分别取值为 1.43 和 1.0 eV. 四元化合物 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_y\text{N}$ 的带隙可表示为

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_y\text{N}) = \frac{xyE_g(\text{AlInN}) + yzE_g(\text{InGaN}) + zxE_g(\text{AlGaN})}{xy + yz + zx}, \quad (4)$$

$$E_g(\text{AlInN}) = uE_g(\text{InN}) + (1-u)E_g(\text{AlN}) - u(1-u)b(\text{AlInN}), \quad (5)$$

$$E_g(\text{InGaN}) = vE_g(\text{GaN}) + (1-v)E_g(\text{InN}) - v(1-v)b(\text{InGaN}), \quad (6)$$

$$E_g(\text{AlGaN}) = wE_g(\text{GaN}) + (1-w)E_g(\text{AlN}) - w(1-w)b(\text{AlGaN}), \quad (7)$$

$$u = \frac{1-x+y}{2}, \quad v = \frac{1-y+x}{2}, \quad w = \frac{1-x+z}{2}, \quad (8)$$

其中 x, y 和 $z=1-x-y$ 分别为 Al, In 和 Ga 在 AlGaInN 材料系中的组分浓度. $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$ 的能带弯曲系数 $b(\text{AlInN})$ 为 2.5 eV, 模拟中用到的其他参数可参考文献[47].

利用 Fiorentini 等人^[48]发展的方法计算由于自发极化效应和压电极化效应导致的界面极化电荷. 总极化为自发极化和压电极化之和. 考虑到缺陷等因素对极化电荷的屏蔽效应, 实际的表面电荷密度一般为理论值的 20%~80%^[49,50]. 本文中, 表面电荷密度采用理论值的 50%进行计算^[35].

Caughey 和 Thomas^[51]近似用来计算载流子的迁移率, 可表述为载流子浓度的函数:

$$\mu_i(N) = \mu_{\min,i} + \frac{\mu_{\max,i} - \mu_{\min,i}}{1.0 + \left(\frac{N}{N_{\text{ref},i}}\right)^{\alpha_i}}, \quad (9)$$

其中 i 代表电子或者空穴, 公式中的所有参数已列于表 2 中.

总复合率包括非辐射复合率、辐射复合率、俄偈复合率. 可表示为速率方程模型^[34]:

$$R_{\text{total}} = An + Bn^2 + Cn^3, \quad (10)$$

表2 载流子迁移率参数

参数	AlGaIn	InGaIn
$\mu_{\max,n}(\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1})$	306	684
$\mu_{\min,n}(\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1})$	132	386
$N_{\text{ref},n}(\text{cm}^{-3})$	1×10^{17}	1×10^{17}
α_n	0.29	1.37
$\mu_{\max,p}(\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1})$	10	2
$\mu_{\min,p}(\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1})$	10	2
$N_{\text{ref},p}(\text{cm}^{-3})$	3×10^{17}	2.75×10^{17}
α_p	0.395	0.395

其中 A, B, C, n 分别为非辐射复合系数、辐射复合系数、俄偈复合系数和载流子浓度. 总电流包括载流子参与发光的辐射复合电流(I_{rad})及未参与发光的电流. 未参与发光的载流子分为两部分: 一部分在量子阱中发生非辐射复合, 包括 Shockley-Read-Hall(SRH)复合电流(I_{SRH})和俄偈复合电流(I_{Auger}); 另一部分溢出量子阱形成漏电流(I_{leak}). 故总注入电流可表示为

$$I = I_{\text{rad}} + I_{\text{SRH}} + I_{\text{Auger}} + I_{\text{leak}}. \quad (11)$$

内量子效率定义为辐射复合电流与总注入电流之比, 可表示为

$$\eta_{\text{IQE}} = \frac{I_{\text{rad}}}{I} = \frac{I_{\text{rad}}}{I_{\text{rad}} + I_{\text{SRH}} + I_{\text{Auger}} + I_{\text{leak}}}. \quad (12)$$

根据半导体材料中的热产生机理, LED 内热源包括焦耳热、载流子复合热、汤姆逊热、帕尔贴热^[52]. 有研究指出, 焦耳热和复合热在 LED 的内热源中起主要贡献, 而汤姆逊热和帕尔贴热的贡献很小可忽略^[53]. 因此本文只考虑了焦耳热和复合热. 其中焦耳热可表示为^[52]

$$H_j = -\frac{1}{q}(\vec{j}_n \nabla E_{\text{Fn}} + \vec{j}_p \nabla E_{\text{Fp}}), \quad (13)$$

其中, q 为单位元电荷; \vec{j}_n 和 \vec{j}_p 分别为电子和空穴的电流密度; E_{Fn} 和 E_{Fp} 分别为电子和空穴的准费米能级. 复合热可表示为^[52]

$$H_r = R(E_{\text{Fn}} - E_{\text{Fp}}), \quad (14)$$

其中 $R=R_{\text{SRH}}+R_{\text{Aug}}$, R_{SRH} 和 R_{Aug} 分别为 Shockly-Read-Hall 复合率和俄偈复合率. 芯片中每一层材料的导热系数列于表 3 中^[54], 由于声子限制效应和界面效应, 多量子阱的导热系数与体材料的导热系数有很大差异^[54], 其导热系数可分为横向导热系数 k_L 与纵向导热系数 k_V (沿生长方向), 均比体材料的导热系数

表 3 芯片各层材料导热系数

名称	材料	导热系数 (W mK ⁻¹)	厚度 (μm)
蓝宝石衬底	Al ₂ O ₃	38	100
GaN 缓冲层	GaN	177	0.05
n 型 GaN 层	GaN	177	3
活性区	InGaN(阱)/GaN(垒)	$k_L=134.3, k_V=22.8$	0.0665
电子阻挡层	AlGaInN	69	0.02
p 型 GaN 层	GaN	177	0.15

小. 假设 LED 芯片衬底固定在 Cu 热沉上, 热沉放在恒温箱中, 用热电制冷器和热敏电阻控制热沉温度保持在 300 K. 为简化模拟, 假设其他外边界面绝热^[55].

为研究自加热效应下俄偈复合对内量子效率的影响, 模拟中选取了不同的俄偈复合系数. 其他参数可参考文献[21], 该文献研究了 InGaN 势垒 LED 的优越特性, 文中模拟结果与实验数据吻合得很好. 在本小组^[56]以前的工作中已经做了模型的验证工作, 可参考相关细节.

2 结果与分析

能带结构强烈影响载流子的输运特性. 图 2 给出了 120 mA 电流下, 两种芯片 EBL 和 p 型 GaN 层附近的能带结构和准费米能级. 载流子的有效势垒高度定义为 EBL(或 p 型 GaN 层)的最高能量点与其前端准费米能级之差. 如图 2 所示, 对于无 EBL 的芯片 A, 导带中限制电子的有效势垒高度只有 238 meV, 当引入 AlGaInN EBL 后, 有效势垒高度增加到 386 meV, 因此芯片 B 显著增强了抑制电子溢出活性区的能力. 而且, 在芯片 B 的价带中, 空穴的阻挡势垒从 267 meV 减小到 222 meV, 提高了空穴向活性区中的注入率. 因此当 p 型 GaN 层和活性区之间插入 p 型 AlGaInN EBL 后, 由于 AlGaInN 具有相对 p 型 GaN 层较宽的带隙及较好的晶格匹配度, 不但增强了导带中对电子起限制作用的有效势垒高度, 也降低了价带中阻碍空穴注入活性区的阻挡势垒. 优化了 p 型层附近的能带结构, 从而减小了电子漏电流, 提高了空穴的注入率. 此结果可通过漏电流的分布规律得到证实.

图 3 给出了两种芯片 120 mA 电流下漏电流的分布. 电子从 n 型区注入量子阱, 并在量子阱中与空穴发生复合, 沿着生长方向电子被不断消耗, 电子电流

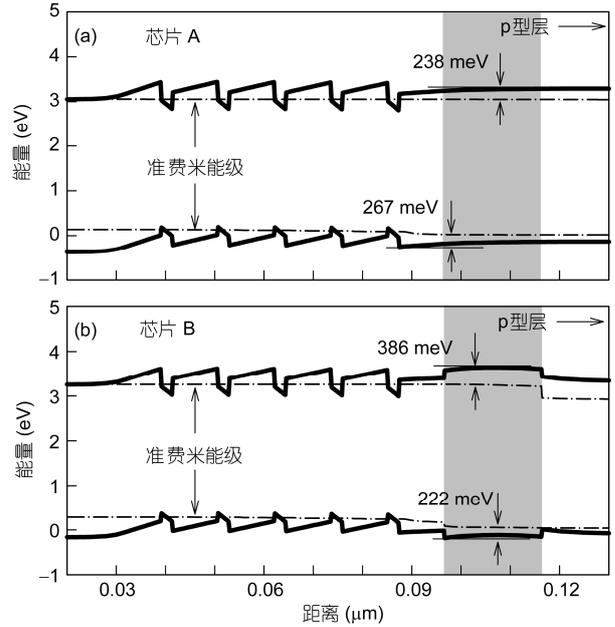


图 2 120 mA 电流时, 芯片 A(a)和芯片 B(b)的能带图

密度不断减小, 没有参与复合而从量子阱中溢出的电子称为漏电流. 如图 3 所示, 芯片 A 中大量电子从活性区中溢出, 漏电流较为严重, 说明电子的限制能力较弱. 引入 AlGaInN EBL 后, 由于提高了有效势垒高度, 漏电流显著减小, 几乎接近零. 因此, 更多的电子可被限制在活性区中与空穴发生复合. 此结果与图 2 中改善的能带结构相吻合.

当溢出到 p 型层的电子减少后, 不但量子阱中的电子增多, 空穴向活性区中的注入率也会增强. 这是由于在活性区外与漏电子进行非辐射复合的空穴随漏电子的减少而减少, 使更多的空穴输运到量子阱

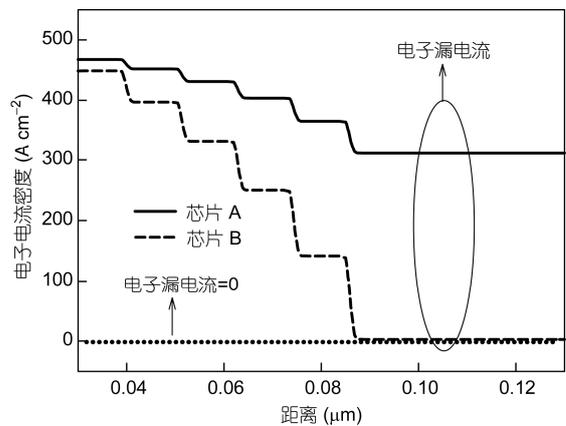


图 3 120 mA 电流时, 芯片 A 和芯片 B 的漏电流分布

中. 此结果可由活性区中的载流子浓度进一步证实. 图4给出了120 mA电流下, 两种芯片活性区中电子和空穴的浓度分布, 芯片B的每个量子阱中载流子浓度均明显提高. 相对于芯片A, 芯片B活性区中的电子和空穴浓度分别提高了72.2%和73.5%. 图5(a)给出了芯片A和芯片B在120 mA电流下各自的辐射复合率. 由于减小的漏电流和增强的空穴注入率, 芯片B每个量子阱中的辐射复合率均明显增强. 因此, 芯片B的效率衰落效应得到明显改善. 图6给出了芯片A和B的内量子效率及光输出功率随电流的变化规律. 效率衰落度定义为 $(IQE_{peak}-IQE_{min})/IQE_{peak}$, 其中 IQE_{peak} 为内量子效率的最大值, IQE_{min} 为内量子效率的最小值. 芯片A和芯片B的效率衰落度分别为57%和0. 增强的IQE将改善光输出功率, 与芯片A相比, 在120 mA电流时, 芯片B的光输出功率提高了1.92倍, 且效率衰落效应消失.

载流子的输运特性强烈影响内热源特性. 如图7所示, 芯片A中, 焦耳热与复合热的贡献相差较小, 由于漏电流较大, 使焦耳热贡献略高于复合热. 而芯片B中, 复合热成为内热源的主要贡献. 此结果与两种芯片活性区中的载流子复合和漏电流分布相吻合. 如图5(b)和(c)所示, 120 mA电流时, 芯片B的非辐射复合率高于芯片A, 导致复合热升高(式(14)). 芯片B与芯片A的复合热之差随注入电流升高而增大. 然

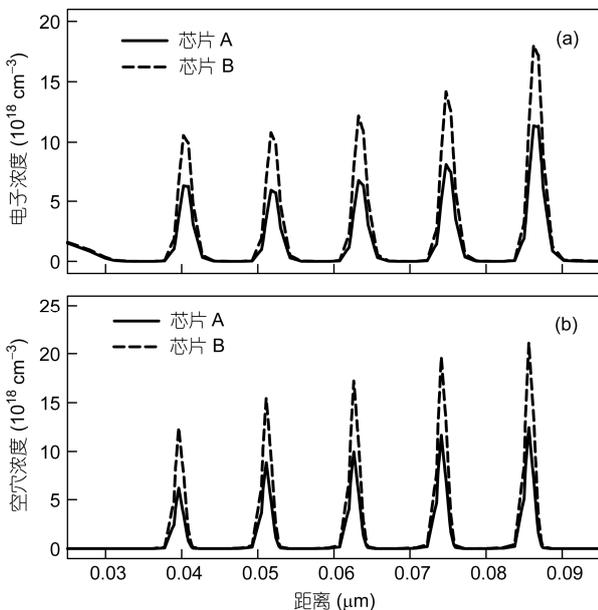


图4 120 mA 电流时, 芯片A和芯片B的电子浓度(a)和空穴浓度分布(b)

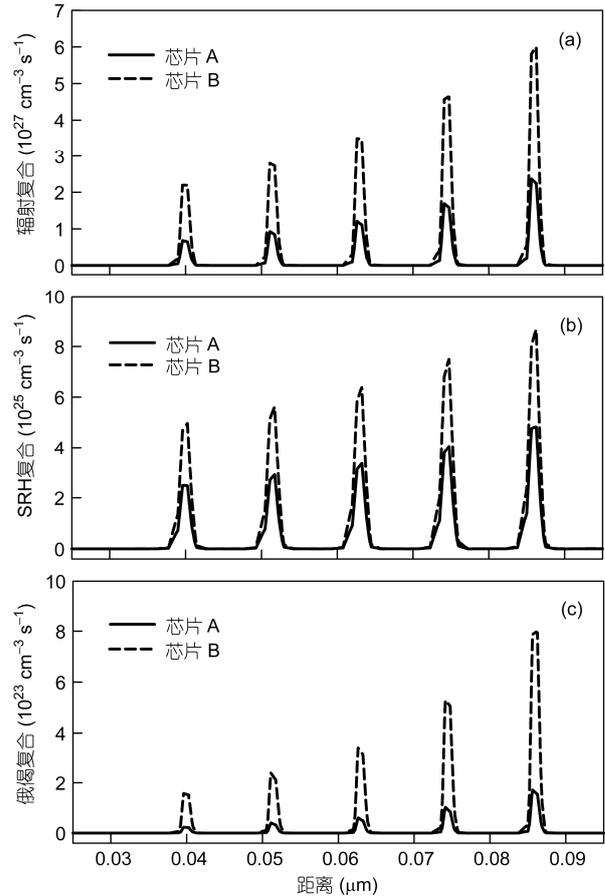


图5 120 mA 电流时, 芯片A和芯片B活性区中的辐射复合率(a)、非辐射复合率(b)和俄歇复合率(c)

而, 由于引入AlGaInN EBL后, 漏电流减小, 所以芯片B的焦耳热小于芯片A. 图7还表明, 随着电流的增加, 芯片B复合热的增加度小于焦耳热的减小度, 因此在整个电流范围内复合热和焦耳热的共同作用使芯片B的内热源强度高于芯片A, 且随电流增加, 芯片B内热源的增长速度要快于芯片A.

图8给出了芯片B与芯片A的热功率之差及芯片最高温度随电流的变化规律. 两种芯片的最高芯片温度均随注入电流的增加而升高. 由于热功率之差随注入电流的增加而变大, 芯片B的最高芯片温度随电流增加而升高的程度大于芯片A, 当注入电流达到120 mA时, 芯片B的最高芯片温度达到335 K, 高于芯片A的321 K. 然而, 尽管在整个电流范围内芯片B的温度高于芯片A, 却没有出现效率衰落效应. 相反, 芯片A虽具有较低的芯片温度, 却呈现严重的效率衰落效应(图6). 这说明内热源可能不是导致效率衰落的原因.

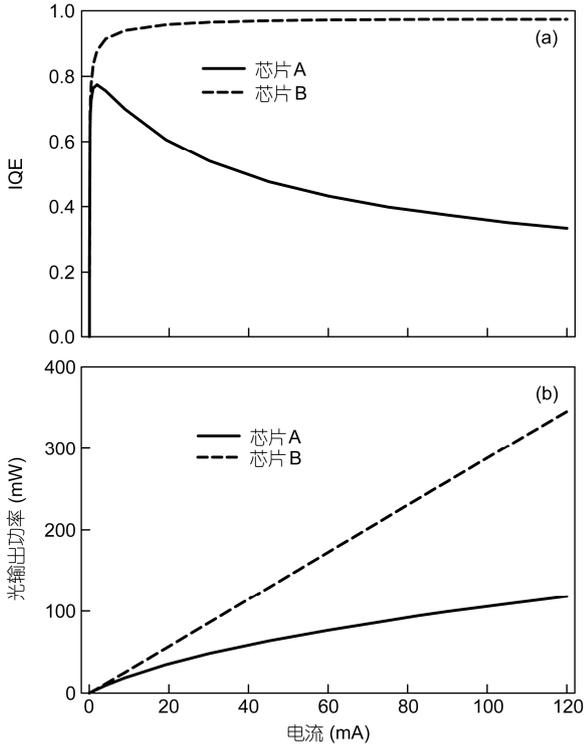


图6 芯片A和芯片B的内量子效率(a)和光输出功率(b)随注入电流的变化规律

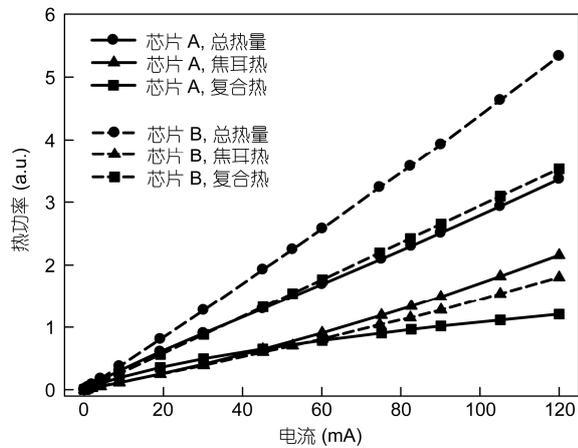


图7 芯片A和芯片B的内热源(焦耳热、复合热、总热量)随注入电流的变化规律

据目前的研究来看,很多研究仅限于讨论某一种导致效率衰落效应的物理机制.此部分将证明效率衰落效应与多种因素有关.根据不同的理论与实验数据报道,俄偈复合系数的取值范围在 $1 \times 10^{-34} \sim 1 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ 之间^[38,39].有研究^[39]利用等温模型指出,俄偈复合是导致效率衰落的机理之一,为研究自加热效应下俄偈复合对效率衰落效应的影响,分析

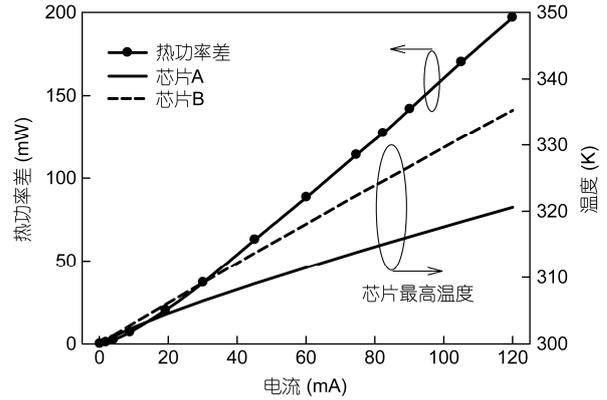


图8 芯片A和芯片B的热功率差和最高芯片温度随注入电流的变化规律

大小两种俄偈复合系数下内量子效率随电流的变化规律.图9给出了俄偈系数不同时,两种芯片在自加热效应下内量子效率特性.对于芯片A,大小两种俄偈复合系数下均呈现效率衰落,且当俄偈复合系数较大时,效率衰落度从57%增加到66%.对于芯片B,小俄偈系数下($C=1 \times 10^{-34} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$)未呈现效率衰落,但俄偈系数增加到 $1 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ 时,呈现30%的效率衰落度.因此在自加热效应下,除漏电流外俄偈复

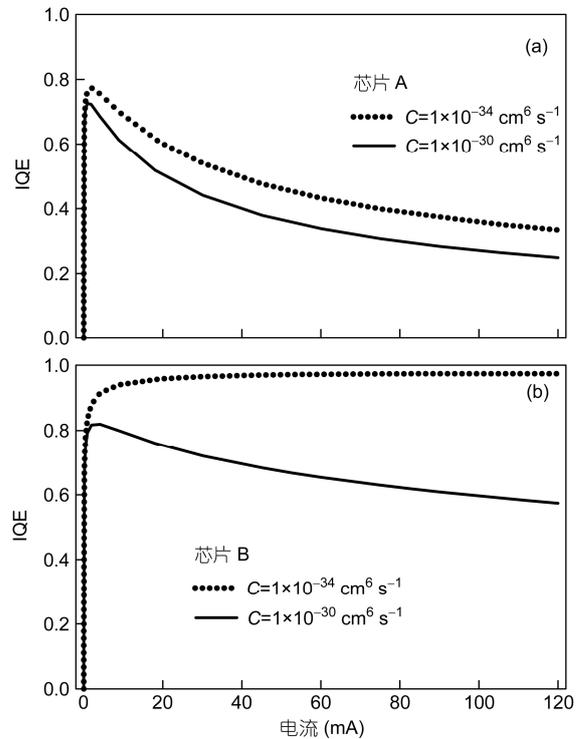


图9 不同俄偈复合系数下,芯片A(a)和芯片B(b)的内量子效率随电流的变化规律

合可能是导致效率衰落效应的另一个原因。

为进一步比较不同俄偈复合系数下，自加热效应对效率衰落特性的影响，将不同俄偈复合系数下，芯片 A 和 B 的最高芯片温度随电流的变化规律如图 10。对于芯片 A，大俄偈系数与小俄偈系数的热功率差在 120 mA 电流时只有 2 mW。对于芯片 B，热功率差大于芯片 A，但与芯片的总热功率相比，仍十分小，热功率差在 120 mA 时只有 7 mW。因此，由俄偈复合所产生的复合热不是内热源的主要贡献，基本可忽

略不计，提高俄偈复合系数几乎不会改变芯片温度。基于此结果，对于芯片 A，增加俄偈系数使得芯片温度不变的情况下衰落效应更加严重，对于芯片 B，增加俄偈系数使效率衰落效应从无到有。自加热效应可能不是导致效率衰落的原因，而俄偈复合是其中原因之一。Kim 等人^[11]的实验报道中指出，效率衰落度会随芯片温度升高而降低，温度不是导致效率衰落的原因，与本文的结果一致。

3 结论

本文选择两种 LED 芯片为研究对象，芯片 A 中无 EBL，芯片 B 中插入 AlGaInN EBL。考虑了内部焦耳热和复合热内热源，研究了自加热效应下，EBL 对 LED 发热特性及发光特性的影响。并深入分析了自加热效应与 LED 效率衰落效应之间的关系。结论如下：(1) 和无 EBL 的 LED 芯片相比，引入 AlGaInN EBL 后，可显著增强导带中限制电子的有效势垒高度，并减小价带中阻碍空穴注入活性区的阻挡势垒，从而减小了漏电流，提高了空穴的注入率，显著改善了效率衰落效应，漏电流是导致效率衰落的主要原因之一；(2) 与芯片 A 相比，芯片 B 的复合热明显增加，焦耳热相应减小，但复合热的增加程度大于焦耳热的减小程度，使得具有 AlGaInN EBL 的芯片 B 内热源强度及芯片温度高于无 EBL 的芯片 A，在 120 mA 电流时，芯片 B 最高温度为 335 K，高出芯片 A 10 K；(3) 小俄偈复合系数下，在整个电流范围内芯片 B 的温度高于芯片 A，但没有出现效率衰落效应。相反，芯片 A 虽具有较低的芯片温度，但呈现严重的效率衰落效应，说明内热源不是导致效率衰落的原因；(4) 俄偈复合所产生的复合热不是内热源的主要贡献，基本可忽略不计，提高俄偈复合系数几乎不会改变芯片温度。俄偈复合是导致效率衰落效应的主要原因之一。

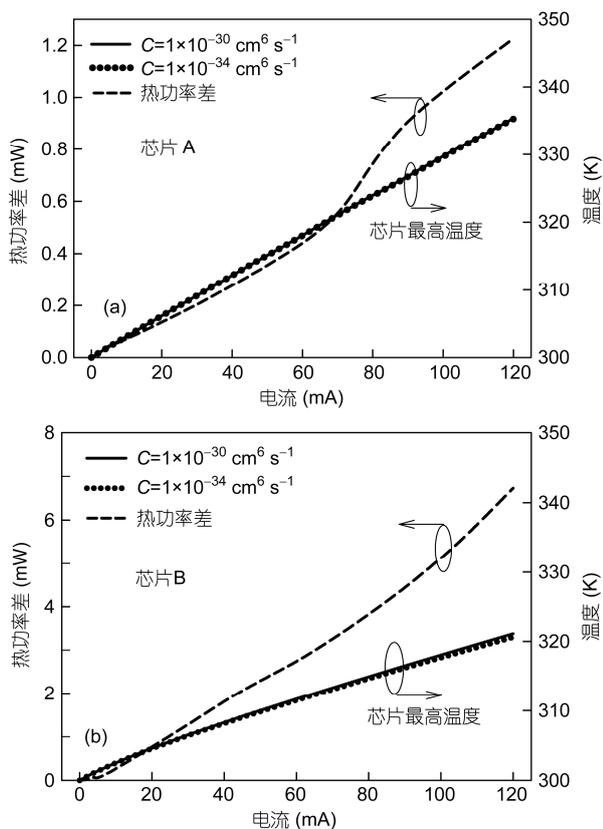


图 10 芯片 A(a)和 B(b)中，不同俄偈系数下热功率差和最高芯片温度随注入电流变化特性

参考文献

- 1 Schubert E F, Kim J K. Solid-state light sources getting smart. *Science*, 2005, 208: 1274–1278
- 2 Krames M R, Shchekin O B, Mueller-Mach R, et al. Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting. *J Disp Technol*, 2007, 3: 160–175
- 3 Crawford M H. LEDs for solid-state lighting: Performance challenges and recent advances. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15: 1028–1040
- 4 Niu Q L, Zhang Y, Wang Y L, et al. High-efficiency conjugated-polymer-hosted blue phosphorescent light-emitting diodes. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 3639–3643

- 5 Xu Y Q, Fan G H, Zhou D T, et al. Advantage of dual wavelength light-emitting diodes with dip-shaped quantum wells. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 2562–2566
- 6 Zhang W W, Wu Z X, Zhang X W, et al. Dependence of the stability of organic light-emitting diodes on driving mode. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 2210–2214
- 7 Jiang H J. Effective adjustment of the optoelectronic properties of organic conjugated materials by synthesizing p-n diblock molecules. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 119–136
- 8 Meng L C, Lou Z D, Yang S Y, et al. Energy distribution in white organic light-emitting diodes with three primary color emitting layers. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2011, 54: 84–88
- 9 Wang X L, Wang X H, Jia H Q, et al. Recent progress in single chip white light-emitting diodes with the InGaN underlying layer. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2010, 53: 445–448
- 10 甄红楼, 熊大元, 周旭昌, 等. 红外-近红外波长变换器件 p-QWIP-LED 研究. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2006, 36: 327–336
- 11 Kim M H, Schubert M F, Dai Q, et al. Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 183507
- 12 Schubert M F, Xu J, Kim J K, et al. Polarization-matched GaInN/AlGaInN multi-quantum-well light emitting diodes with reduced efficiency droop. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 041102
- 13 Choi S, Kim H J, Kim S S, et al. Improvement of peak quantum efficiency and efficiency droop in III-nitride visible light-emitting diodes with an InAlN electron-blocking layer. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 221105
- 14 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. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22: 236–238
- 15 Zhao H P, Liu G Y, Zhang J, et al. Approaches for high internal quantum efficiency green InGaN light-emitting diodes with large overlap quantum wells. *Opt Express*, 2011, 19: A991–A1007
- 16 Ding K, Zeng Y P, Wei X C, et al. A wide-narrow well design for understanding the efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes. *Appl Phys B*, 2009, 97: 465–468
- 17 Li Y L, Huang Y R, Lai Y H. Efficiency droop behaviors of InGaN/GaN multiple-quantum-well light-emitting diodes with varying quantum well thickness. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 181113
- 18 Han S H, Lee D Y, Shim H W, et al. Improvement of efficiency droop in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes with trapezoidal wells. *J Phys D Appl Phys*, 2010, 43: 354004
- 19 Lee Y J, Chen C H, Lee C J. Reduction in the Efficiency-droop effect of InGaN green light-emitting diodes using gradual quantum wells. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22: 1506–1508
- 20 Chang J Y, Tsai M C, Kuo Y K. Advantages of blue InGaN light-emitting diodes with AlGaIn barriers. *Opt Lett*, 2010, 35: 1368–1370
- 21 Kuo Y K, Chang J Y, Tsai M C, et al. Advantages of blue InGaN multiple-quantum well light-emitting diodes with InGaIn barriers. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 011116
- 22 Kuo Y K, Wang T H, Chang J Y. Advantages of blue InGaN light-emitting diodes with InGaIn-AlGaIn-InGaIn barriers. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 031112
- 23 Liu J P, Ryou J H, Dupuis R D, et al. Barrier effect on hole transport and carrier distribution in InGaIn/GaN multiple quantum well visible light-emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 021102
- 24 Tsai M C, Yen S H, Kuo Y K. Deep-ultraviolet light-emitting diodes with gradually increased barrier thicknesses from n-layers to p-layers. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 111114
- 25 Wang C H, Chang S P, Ku P H, et al. Hole transport improvement in InGaIn/GaN light-emitting diodes by graded-composition multiple quantum barriers. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 171106
- 26 Ni X, Fan Q, Shimada R, et al. Reduction of efficiency droop in InGaIn light emitting diodes by coupled quantum wells. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 171113
- 27 Han S H, Lee D Y, Lee S J, et al. Effect of electron blocking layer on efficiency droop in InGaIn/GaN multiple quantum well light-emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 231123
- 28 Yen S H, Tsai M C, Tsai M L, et al. Effect of n-type AlGaIn layer on carrier transportation and efficiency droop of blue InGaIn light-emitting diodes. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21: 975–977
- 29 Lee K B, Parbrook P J, Wang T, et al. Effect of the AlGaIn electron blocking layer thickness on the performance of AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diodes. *J Crystal Growth*, 2009, 311: 2857–2859
- 30 Xia C S, Li Z M, Lu W, et al. Efficiency enhancement of blue InGaIn/GaN light-emitting diodes with an AlGaIn-GaN-AlGaIn electron blocking layer. *J Appl Phys*, 2012, 111: 094503
- 31 Kuo Y K, Chang J Y, Tsai M C. Enhancement in hole-injection efficiency of blue InGaIn light-emitting diodes from reduced polarization by some specific designs for the electron blocking layer. *Opt Lett*, 2010, 35: 3285–3287

- 32 Wang C H, Ke C C, Lee C Y, et al. Hole injection and efficiency droop improvement in InGaN/GaN light-emitting diodes by band-engineered electron blocking layer. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 261103
- 33 Xia C S, Li Z M, Lu W, et al. Droop improvement in blue InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes with indium graded last barrier. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 233501
- 34 Kuo Y K, Tsai M C, Yen S H, et al. Effect of p-type last barrier on efficiency droop of blue InGaN light-emitting diodes. *IEEE J Quant Electron*, 2010, 46: 1214–1220
- 35 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. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23: 1630–1632
- 36 Yen S H, Tsai M L, Tsai M C, et al. Investigation of optical performance of InGaN MQW LED with thin last barrier. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22: 1787–1789
- 37 Chen J R, Lu T C, Kuo H C, et al. Study of InGaN-GaN light-emitting diodes with different last barrier thicknesses. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22: 860–862
- 38 Shen Y C, Mueller G O, Watanabe S, et al. Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 141101
- 39 Chen J R, Wu Y C, Ling S C, et al. Investigation of wavelength-dependent efficiency droop in InGaN light-emitting diodes. *Appl Phys B*, 2010, 98: 779–789
- 40 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. *Semiconductors*, 2006, 40: 605–610
- 41 Chen Y X, Shen G D, Guo W L, et al. Internal quantum efficiency drop induced by the heat generation inside of light emitting diodes (LEDs). *Chin Phys B*, 2011, 20: 017204
- 42 Hirayama H. Quaternary InAlGaIn-based high-efficiency ultraviolet light-emitting diodes. *J Appl Phys*, 2005, 97: 091101
- 43 Ryu H Y, Shim J I, Kim C H, et al. Efficiency and electron leakage characteristics in GaN-based light-emitting diodes without AlGaIn electron-blocking-layer structures. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23: 1866–1868
- 44 Chuang S L, Chang C S. k-p method for strained wurtzite semiconductors. *Phys Rev B*, 1996, 54: 2491–2504
- 45 Chuang S L, Chang C S. A band-structure model of strained quantum-well wurtzite semiconductors. *Semicond Sci Technol*, 1997, 12: 252–263
- 46 Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *J Appl Phys*, 2001, 89: 5815–5875
- 47 Vurgaftman I, Meyer J R. Band parameters for nitrogen containing semiconductors. *J Appl Phys*, 2003, 94: 3675–3696
- 48 Fiorentini V, Bernardini F, Ambacher O. Evidence for nonlinear macroscopic polarization in III-V nitride alloy heterostructures. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 1204–1206
- 49 Renner F, Kiesel P, Döhler G H, et al. Quantitative analysis of the polarization fields and absorption changes in InGaN/GaN quantum wells with electroabsorption spectroscopy. *Appl Phys Lett*, 2002, 81: 490–492
- 50 Zhang H, Miller E J, Yu E T, et al. Measurement of polarization charge and conduction-band offset at $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterojunction interfaces. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 4644–4646
- 51 Caughey C M, Thomas R E. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field. *Proc IEEE*, 1967, 55: 2192–2193
- 52 Piprek J. *Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation*. London: Academic Press, 2003. 45–147
- 53 王天虎, 徐进良, 王晓东. 非等温模型下多量子势垒结构对 LED 性能的影响. *科学通报*, 2012, 57: 2231–2236
- 54 Lee H K, Yu J S, Lee Y T. Thermal analysis and characterization of the effect of substrate thinning on the performances of GaN-based light emitting diodes. *Phys Status Solid A*, 2010, 207: 1497–1504
- 55 Huang S, Wu H, Fan B, et al. A chip-level electro thermal coupled design model for high-power light-emitting diodes. *J Appl Phys*, 2010, 107: 054509
- 56 Xu J L, Wang T H. Efficiency droop improvement for InGaN-based light-emitting diodes with gradually increased In-composition across the active region. *Physica E*, 2013, 52: 8–13