

InGaN 基发光二极管光效下降效应研究进展

汪延明 徐林炜 谈 健 许亚兵

(湘能华磊光电股份有限公司, 湖南 郴州 423038)

摘要 InGaN 基发光二极管(LED)芯片大电流密度下效率的下降影响了其在功率型器件方面的应用,因此效率下降的原因和克服的方法成了当前的研究热点。综述了近年来研究者提出的光效下降效应的几种产生机制,包括 Read-Shockley-Hall (RSH)复合、俄歇复合、载流子局域化、极化电场、载流子注入效率及热效应等。同时介绍了一些克服光效下降效应的方法。

关键词 光学器件;LED;光效下降效应;外量子效率

中图分类号 TN312⁺.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.120002

Research Progress in Droop Effect of InGaN-Based Light-Emitting Diodes

Wang Yanming Xu Linwei Tan Jian Xu Yabing

(Xiangneng Hualei Optoelectronic Corporation, Chenzhou, Hunan 423038, China)

Abstract Since the efficiency droop at the high current density of the InGaN-based light-emitting diodes (LEDs) influences the application of power-LEDs, the origin and the overcoming method of the efficiency droop have become a hotspot. Several possible mechanisms are discussed, such as Read-Shockley-Hall (RSH) recombination, Auger recombination, carrier localization, polarization field, efficiency of injected carries and heat effect. Some methods for overcoming efficiency droop are also discussed.

Key words optical devices; LED; droop effect; external quantum efficiency

OCIS codes 230.3670; 260.3800; 260.5430

1 引言

固态照明要走进千家万户,提高发光效率、降低成本是必由之路。InGaN/GaN 基发光二极管(LED)已被深入研究^[1~5]和广泛应用到社会各个领域,高的发光效率、高的出光功率是研究者们梦寐以求的,但随着驱动电流密度的增加,其发光效率急剧减小,这个现象被称为“光效下降”效应。光效下降效应涵盖了绿、蓝、紫、紫外甚至深紫外波长范围^[6,7]。近年来,很多研究者对光效下降现象提出了解释,但没有哪一种被广泛接受,各种报道都是为了解释自己的实验现象。本文综述了 InGaN 基 LED 关于光效下降效应起源的报道,并介绍了一些解决或缓解光效下降效应的方法。

2 光效下降效应的发生机制

大多数关于光效下降现象根源的研究都集中在 GaN 基 LED 载流子可能的损失机制上。一般说来,载流子的损失包括量子阱内的损失和量子阱外的损失。量子阱内的损失表现为阱内非辐射复合,包括与位错等缺陷相关的 Read-Shockley-Hall (RSH)复合和俄歇复合。引起阱外损失的机制有多种,如载流子局域化、极化电场、载流子注入效率、热效应等,但最终都归结于载流子从阱中泄漏至垒层或者通过电子阻挡层(EBL)至 p-GaN。

收稿日期: 2012-08-02; 收到修改稿日期: 2012-09-07; 网络出版日期: 2012-10-19

作者简介: 汪延明(1981—),男,硕士,主要从事 GaN 基 LED 芯片制造方面的研究。E-mail: wym8105@163.com

2.1 RSH 复合

半导体中载流子通过一些具有深束缚能级的杂质或缺陷中心的复合,称为间接复合,即 RSH 复合。在光提取效率相同的前提下,发光效率主要由注入载流子被辐射复合中心的俘获率决定^[8],因此 RSH 复合能强烈地影响最大发光效率,即外量子效率(EQE)峰值,但不能影响发光效率下降的快慢,证据是不同位错密度的 LED 样品其效率随电流密度的下降基本一致。Schubert 等^[9]通过对比位错密度为 $5.3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 和 $5.7 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 的两种 GaN 基 LED 样品发现,在相同驱动电流下,低缺陷密度样品具有高 EQE,但是光效下降很严重。高缺陷密度样品 EQE 很低,但是几乎没有光效下降现象。

2.2 俄歇复合

阱内非辐射复合的另一种重要形式是俄歇复合。如图 1 所示,它是指载流子复合时将多余的能量传递给其他的电子或空穴,使它们的动能增加而产生跃迁。俄歇复合影响发光效率只发生在高激发密度或者高载流子注入的情况,因为俄歇复合率 R 与载流子浓度 n 的三次方成正比^[10]:

$$R_{\text{Auger}} = Cn^3, \quad (1)$$

式中 C 为俄歇复合系数。

随着材料禁带宽度的增加,俄歇复合的概率急剧减小,因此在宽禁带材料中一般忽略俄歇复合。由于使用不同的方法和模型,测出 GaN 材料的俄歇复合系数 C 分布在不同的数量级,考虑很宽的范围后,一般认为俄歇复合系数的上限在 $10^{-34} \text{ cm}^6/\text{s}$,不过也有很多文献报道远大于这个值。如 Shen 等^[11]利用光致发光(PL)技术,对不同 InN 组分、不同厚度、不同位错密度的准块状 InGaN 样品进行测试,得出其俄歇复合系数在 $1.4 \times 10^{-30} \sim 2.0 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$,并认为俄歇复合是 InGaN 基 LED 的 EQE 峰值在很低电流密度处的根源;Zhang 等^[12]用大信号调制测量法测得室温下 410 nm InGaN 基 LED 的俄歇复合率为 $1.5 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$,并认为俄歇复合是 InGaN 基 LED 在大注入电流时限制效率的主要因素;Meneghini 等^[13,14]通过测试同一绿光量子阱(SQW)在 4 K 和 300 K 下的电致发光(EL)与 PL(PL 用的是 405 nm 激光激发,这个波长比 GaN 垒层带宽窄,即排除了量子阱以外的寄生载流子复合),发现 EL 内量子效率(IQE)与 EL 电流密度关系曲线和 PL 发光效率与 PL 激发密度关系曲线几乎完美重合,认为带-带俄歇复合引起大电流损失是不可能的,但声子、缺陷等辅助俄歇复合是可能的。后来又通过实验测试了 523 nm LED 的俄歇复合系数为 $0.35 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$ 。Pasenow 等^[16]用全显微多体模型(Fully microscopic many-body models)研究了 InGaN/GaN 量子阱的俄歇载流子损失,也认为带-带俄歇复合对实验中出现效率下降的影响非常小了,而声子辅助俄歇过程则完全可能。

然而,也有不少研究组对俄歇复合是大电流密度下效率下降的原因持否定意见^[17]。Lai 等^[18]通过插入一层 20 nm 厚的 p-AlGaIn 电子阻挡层,使 InGaIn 基双异质结(DH)结构 LED 的 EQE 在 $200 \text{ A}/\text{cm}^2$ 电流密度下提高 89.3%,认为 DH 活性区与 EBL 的表面态对效率下降很重要,因此虽然没得到引起效率下降的具体原因,但可以肯定不是因为俄歇损失引起的。Li 等^[19]通过研究效率下降与辐射复合、非辐射复合以及载流子溢出等对 IQE 与注入电流关系曲线的影响,认为如果只是单纯模拟拟合的话,俄歇复合和载流子溢出的经验公式均与实验吻合,但是考虑到量子阱设计能相当大地影响效率下降,而且有些研究表明脉冲 PL 在很大注入水平时效率衰减很小,故认为他们的研究支持载流子溢出是导致大电流下效率下降的原因,而不是俄歇复合。

2.3 载流子局域化

量子阱内 In 组分的涨落引起 In 相分凝,富 In 团簇区阱更浅,导致载流子局域化,在低电流密度下,富 In 团簇束缚住载流子使之远离位错等非辐射复合中心,当载流子浓度增大到一定程度时,富 In 区的低能隙被填满,这时载流子会溢出富 In 区而被位错等缺陷俘获,表现为效率下降。Lee 等^[20]的实验正是利用这种思想在外延生长 InGaIn 基绿光 LED 的量子阱之前用 60 sccm (sccm 即在 0°C , 1 atm 的标准状态下毫升每

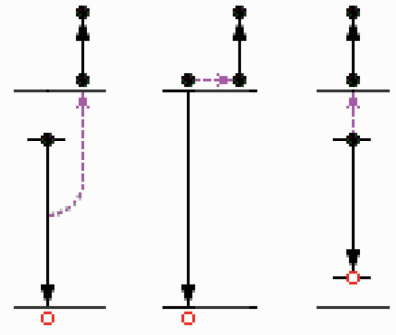


图 1 俄歇复合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Auger recombination

分)的三甲基铟(TMI_n)预处理 10 s,为了防止升温使 InGa_n 分解,在 InGa_n 量子阱生长完后在同一温度生长 2 nm Ga_n 再升温生长 Ga_n 垒层。TMI_n 预处理增加了阱中 In 的团簇,形成的富 In 量子点有效地抑制了线位错俘获激子,也抑制了升高温度时载流子向活性区外的溢出,减小了与温度相关的效率下降。而 Ahn 等^[21]则通过实验演示了 InGa_n/Ga_n LED 载流子溢出活性区与效率下降的关系,得出载流子溢出可以发生并且能显著影响效率光效下降的快慢。

Ga_n 基蓝光 LED 比紫外 LED 具有更高 In 组分的量子阱,In 组分涨落引起的局域化更严重,因此低电流密度下蓝光 LED 由于载流子局域化阻碍了空位、位错等非辐射复合中心对载流子的俘获而具有更高的发光效率,但其在大电流密度下由于载流子局域化的消失从而发光效率下降也更严重^[22]。

2.4 极化电场

一般 Ga_n 外延层是在蓝宝石(Al₂O₃)_c 面生长的,具有纤锌矿结构,其结构决定其存在自发极化电场,再则由于 Ga_n 与衬底材料之间存在晶格失配以及热失配使外延层处于一种压应力或者张应力状态下,因此而产生压电极化^[23,24],两种极化作用使多量子阱(MQW)内部具有 MV/cm 量级的极化电场。强的极化电场导致电子空穴波函数在空间上的分离^[25],即电子空穴复合几率下降。此外,极化电场引起能带倾斜^[26],使电子不能被适当地束缚在活性区,加剧了在大电流下载流子向 EBL 或者 p-Ga_n 的泄漏^[27],引起载流子的损失,发光效率下降。

一些能缓解极化效应的措施能在一定程度上缓解光效下降效应。量子阱越厚,相同电流密度下阱区载流子浓度越小,溢出量子阱的载流子更少,效率下降也就被缓解了^[28],但是厚阱同时导致了强的内建电场,电子空穴波函数空间分离更多,导致 IQE 下降。Liu 等^[29]在 MQW 上下分别插入 u-InGa_n 和 n-InGa_n 层,增加了与量子阱层的应力匹配,减小了极化效应,缓解了效率下降。也可以在 MQW 中用 AlGaInN 四元合金作为垒层来使阱垒之间极化更为匹配^[30],使之在大电流密度下效率的下降得到缓解。通过调节外延生长时的 TMI_n 流量使量子阱能带呈现梯形^[31],减少 InGa_n 与 Ga_n 之间的极化场,增加电子空穴波函数的空间重叠,能有效缓解大电流密度下效率下降。此外,p-Ga_n 应力的释放也能在一定程度上削弱极化作用^[32],进而提高发光效率,出现 EQE 峰值的电流密度大大增加,缓解光效下降效应。

另有一种从衬底匹配上减弱极化电场的方式是用半极性、非极性衬底,或者用同质外延生长。在图形化硅衬底上生长的半极性(1 $\bar{1}$ 01)InGa_n 基 LED^[33]随驱动电流的增大其波长蓝移比极性 LED 要小,表明极化场减弱,软件模拟显示其能带更平滑,从而限制了电子向 p-Ga_n 溢出,减弱了光效下降效应。高效率的半极性 Ga_n 基蓝光^[34]、绿光^[35]、蓝紫光^[36] LED 均已制造出。在 Ga_n 半极性(20 $\bar{2}$ 1)面上外延生长的 LED 电流密度到 200 A/cm² 时效率只比峰值低 14.3%^[37]。非极性结构的量子阱极化效应小,所以因极化而产生在量子阱底部的电荷积聚更少,有利于空穴顺利地通过此界面,同时小的极化增强了 EBL 的势垒高度,减少了载流子的泄漏。在 Ga_n 同质衬底上外延生长的位错密度低至 5×10^6 cm⁻² 的 LED 电流密度从 22 A/cm² 增至 330 A/cm²,EQE 只下降 18%^[38]。Pan 等^[39]则在半极性面(20 $\bar{2}$ 1)上外延出 SQW-LED,在 400 A/cm² 电流密度下 EQE 为 41.2%,波长蓝移很小,半峰全宽很窄,光效下降效应得到明显抑制。这些优越的性能归结于低的极化电场和高的 InGa_n 晶体质量。

不管是半极性面^[40,41]还是非极性面 LED^[42],各报道均认为由于极性的减弱而缓解了光效下降效应,且均采用了归一化的 EQE。与极性 LED 相比,半极性或非极性 LED 的 EQE 或者出光功率相对低很多。因此,有些研究者认为半极性、非极性 LED 与极性 LED 一样存在光效下降效应,说明极化电场不是光效下降效应的主要原因。随着研究的深入,半极性、非极性 LED 的绝对出光功率与极性 LED 相当时,很难说其光效下降效应还是比极性 LED 优越。

2.5 载流子注入效率

与电子相比,空穴具有更重的有效质量,且 p-Ga_n 较难达到较高的掺杂浓度,再加上掺杂元素 Mg 的离化率很低,导致了 p-Ga_n 中空穴浓度有限。这些因素导致空穴的运输比电子困难,再加上高 Al 组分 EBL 层充当了空穴迁移的势垒,使得空穴的注入效率很低,阱中电子在与空穴迁移进量子阱参与复合前就已经泄漏出去,进入垒层,发生非辐射复合,即仅靠近 p-n 结的量子阱对发光有贡献。Han 等^[43]设计了三种样品:无 EBL、Al 组分为 22% 的 p-AlGa_n 的 EBL 和 Al 组分为 32% 的 p-AlGa_n 的 EBL,发现在小电流密度下有

EBL 的样品比没有 EBL 的样品 EQE 高,但是大电流密度下有 EBL 的样品比没有 EBL 的样品 EQE 低,认为是小电流密度下 EBL 增加了电子空穴复合效率,大电流密度下能带中 EBL 对空穴有长钉状的势垒,阻碍了空穴的注入,导致 EQE 下降。他们还用在垒中掺 Mg 的 InGaN/GaN 样品^[44]提高了 PL 强度、热稳定性和 IQE,原因归结于提高了空穴注入阱层的效率。后来他们将 p-AlGaIn 电子阻挡层做成具有 Al 组分梯度 (Al 组分从 0 增加至 16%) 的超晶格结构,此结构降低了 EBL 的势垒高度,结果能在一定程度上提高发光效率,减缓了效率下降,不过在大电流密度下,电子溢出严重^[45]。

活性区阱垒的宽度和高度会很大程度地影响载流子的注入效率。Ni 等^[46]通过改变垒的厚度和高度对 MQW-LED 和 DH-LED 进行了研究,表明对于 MQW-LED,更宽的垒宽能使 EQE 峰值变大,并且 EQE 下降也变得相对缓慢,相同的垒宽条件下,垒越高,EL 强度越低;对于 DH-LED, EQE 下降很小,且活性区越宽, EQE 下降越不明显。这些结果均证实载流子的注入效率对光效下降效应的影响。Chang 等^[47]在 p-AlGaIn 电子阻挡层外插入一层波长为 520 nm 的 InGaIn 阱,而 MQW 的波长是 440 nm,所以 EL 光谱中如果发现 520 nm 的峰则表明有电子从 MQW 中泄漏,实验发现在电流密度 1 A/cm^2 就有电子泄漏,但是插入 InGaIn 阱的样品 EQE 峰值电流密度达 200 A/cm^2 ,且在大电流密度下改善了光效下降效应。这表明电子泄漏是 EQE 峰值对应电流密度下降和大电流密度下效率开始下降对应的电流密度往更小值移动的原因,而不是产生光效下降的原因,产生光效下降的原因是空穴注入效率低下。Zakheim 等^[48]认为增加量子阱的宽度以减小光效下降效应其原因不是抑制了载流子的溢出,而是减小了载流子浓度,他们用短周期超晶格代替传统的 MQW,减小垒的宽度至几纳米,如图 2 所示,得到了较好的光电性能。其样品载流子浓度比传统 MQW 样品低的有力证明一方面是驱动电流从 10 mA 增加至 500 mA 时短周期超晶格样品的波长蓝移只有 1 nm,远小于传统 MQW 样品的小,另一方面是在相同电流下的 EL 半峰全宽也远小于传统 MQW 样品。Zhu 等^[49]也持此观点,认为载流子的对称性分布能减小效率下降。

若能提高空穴的注入效率,能在一定程度上缓解光效下降效应。Zhao 等^[50]的研究证明载流子注入效率随量子阱区载流子浓度增大而减小,提出用 AlInN 垒替代传统的 GaIn 垒能在一定程度上缓解光效下降效应。Lee 等^[51]用 In 组分逐渐变化的量子阱代替传统的统一 In 组分量子阱绿光 InGaIn 基 LED,减轻了阱中能带弯曲,提高了空穴的注入效率,抑制了光效下降效应。

2.6 热效应

对于 GaIn 基 LED,用 100% 占空比和 1% 占空比的脉冲电流测试,不同的热效应使得 EQE 与电流密度的关系曲线不一样,表现为光效下降行为不一样,由此可知热效应对效率下降有一定影响。Chen 等^[52]的研究支持了此观点。传统的观点是 LED 产生的热致使载流子发生俄歇损失,而最新的研究^[53]认为与俄歇损失无关,而是与温度相关的缺陷散射有关。

图 3 为蓝光 InGaIn 基 LED 不同温度下 EQE 与电流密度的关系,图中明确显示出环境温度越高其相同电流密度下的 EQE 越低,而且不同温度下的 EQE 与环境温度的关系曲线虽然走势相似,但明显不一样,突出表现在小电流密度下的 EQE 上。此图充分证明了热效应对效率下降有一定影响,但不是唯一的影响因素,因为就算

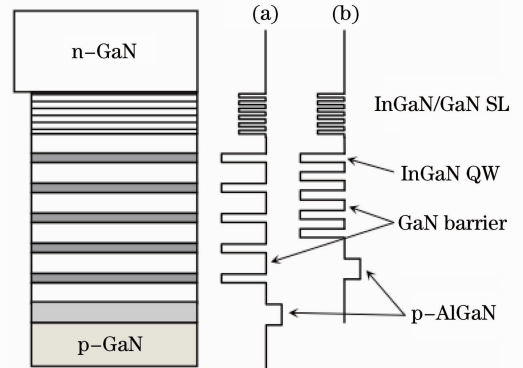


图 2 (a)具有典型结构的活性区和(b)具有短周期超晶格结构的活性区

Fig. 2 Schematic diagram of active region with (a) standard and short-period superlattices

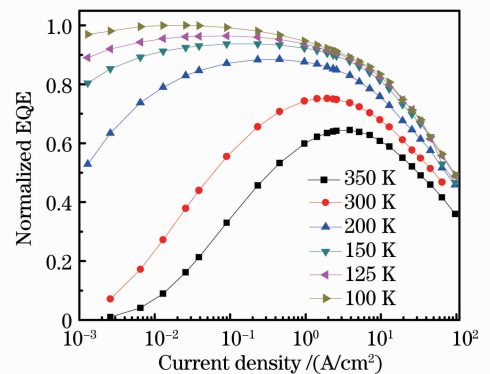


图 3 不同温度下 EQE 与电流密度的关系

Fig. 3 EQE versus current density under different temperatures

是在很低的温度下,光效下降现象依然发生。

更广义的光效下降效应分两类,一类随驱动电流密度增大而发光效率下降,称为电流密度型光效下降;另一类随温度的增加而发光效率下降,称为温度型光效下降。热效应对光效下降的影响更趋于第二种类型,因此基板^[54]、衬底^[55,56]、芯片尺寸^[57]、电极设计而决定的电流拥挤^[58]等对光效下降也会构成影响,但这类影响也可归结于热效应和载流子溢出。

3 结束语

关于 InGaN 基 LED 的光效下降效应的起源,众多研究者以自己的实验结果为证据提出了一些观点和缓解光效下降效应的方法,有些取得了很明显的成效,但是,至今没有一种观点能被广泛接受,提出的缓解光效下降效应的方法也往往牺牲了一部分发光效率,即无法在做到正常发光效率的前提下还能抑制光效下降效应。因此,对 InGaN 基 LED 的光效下降效应的研究和克服,仍是广大 LED 研究者努力的方向。

参 考 文 献

- 1 Yu Fei, Jin Lei. Mathematical model of aging and the life test method for GaN LED[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0806001
- 2 余 菲, 金 雷. GaN 基发光二极管的老化数学模型及寿命测试方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 190~194
- 3 Cui Miao, Zhou Taofei, Zhang Jinping *et al.*. Influence of In fraction on the optical properties on InGaN/GaN blue light-emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1016004
- 4 崔 苗, 周桃飞, 张锦平等. In 组分对 InGaN/GaN 蓝光 LED 的发光性质的影响[J]. *光学学报*, 2011, **38**(8): 158~163
- 5 Wang Yanming, Xiong Chuanbing, Wang Guangxu *et al.*. Study on aging characterization of 1 W epitaxy on Si substrate blue LED based on different substrates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1749~1754
- 6 汪延明, 熊传兵, 王光绪等. 不同基板 1 W 硅衬底蓝光 LED 老化性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1749~1754
- 7 Zhu Youzhang, Fu Guanxin, Wang Hongxia *et al.*. Luminescence of GaN thick film grow by HVPE[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 093101
- 8 竹有章, 傅关新, 王红霞等. HVPE 生长 GaN 厚膜发光特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 152~156
- 9 Liu Junlin, Qiu Chong, Jiang Fengyi. Research of passivation and anti reflecting layer on GaN based blue LED on silicon substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2978~2982
- 10 刘军林, 邱 冲, 江风益. Si 衬底 GaN 基蓝光 LED 钝化增透膜研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2978~2982
- 11 H. Hirayama, S. Fujikawa, N. Noguchi *et al.*. 222~282 nm AlGaIn and InAlGaIn-based deep-UV LEDs fabricated on high-quality AlN on sapphire[J]. *Phys. Stat. Sol. A*, 2009, **206**(6): 1176~1182
- 12 W. Sun, M. Shatalov, J. Deng *et al.*. Efficiency droop in 245~247 nm AlGaIn light-emitting diodes with continuous wave 2 mW output power[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(6): 061102
- 13 Y. Yamane, K. Fujiwara, J. K. Sheu. Largely variable electroluminescence efficiency with current and temperature in a blue InGaN multiple-quantum-well diode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(7): 073501
- 14 M. T. Schubert, S. Chhajed, J. K. Kim *et al.*. Effect of dislocation density on efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(23): 231114
- 15 E. Fred Schubert. *Light-Emitting Diodes* (2nd ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 40
- 16 Y. C. Shen, G. O. Mueller, S. Watanabe *et al.*. Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(14): 141101
- 17 M. Zhang, P. Bhattacharya, J. Singh *et al.*. Direct measurement of Auger recombination in In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN quantum wells and its impact on the efficiency of In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN quantum wells light emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(20): 201108
- 18 M. Meneghini, N. Trivellin, G. Meneghesso *et al.*. A combined electro-optical method for the determination of the recombination parameters in InGaN-based light-emitting diodes[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(11): 114508
- 19 A. Laubsch, M. Sabathil, M. Strassburg *et al.*. Improving the High-Current Efficiency of LEDs[OL]. <http://spie.org/x34705.xml>, April 16, 2009
- 20 A. Laubsch, M. Sabathil, J. Baur *et al.*. High-power and high-efficiency InGaN-based light emitters[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2010, **57**(1): 79~87
- 21 B. Pasenow, S. W. Koch, J. Hader *et al.*. Auger losses in GaN-based quantum wells: microscopic theory[J]. *Phys. Stat.*

- Soli. C.*, 2009, **6**(S2): S864~S868
- 17 A. Mao, J. Cho, E. Fred Schubert *et al.*. Reduction of efficiency droop in GaInN/GaN light emitting-diodes with thick AlGaIn cladding layers[J]. *Electron. Mater. Lett.*, 2012, **8**(1): 1~4
- 18 M. J. Lai, L. B. Chang, R. M. Lin *et al.*. Improvement of external quantum efficiency in InGaIn-based double-heterostructure light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Express*, 2010, **3**(7): 072102
- 19 X. Li, H. Liu, X. Ni *et al.*. Effect of carrier spillover and Auger recombination on the efficiency droop in InGaIn-based blue LEDs[J]. *Superlattices Microstruct.*, 2010, **47**(1): 118~122
- 20 Y. J. Lee, Y. C. Chen, C. J. Lee *et al.*. Stable temperature characteristics and suppression of efficiency droop in InGaIn green light-emitting diodes using pre-TMIn flow treatment[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(17): 1279~1281
- 21 B. J. Ahn, T. S. Kim, Y. Q. Dong *et al.*. Experimental determination of current spill-over and its effect on the efficiency droop in InGaIn/GaN blue-light-emitting-diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **100**(3): 031905
- 22 J. Cho, E. Yoon, Y. Park *et al.*. Characteristics of blue and ultraviolet light-emitting diodes with current density and temperature[J]. *Electron. Mater. Lett.*, 2010, **6**(12): 51~53
- 23 S. H. Park, S. L. Chuang. Comparison of zinc-blende and wurzite GaN semiconductors with spontaneous polarization and piezoelectric field effects[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**(1): 353~364
- 24 J. J. Shi, Z. Z. Gan. Effects of piezoelectricity and spontaneous polarization on localized excitons in self-formed InGaIn quantum dots[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **94**(1): 407~415
- 25 A. David, M. J. Grundmann. Influence of polarization fields on carrier lifetime and recombination rates in InGaIn-based light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(3): 033501
- 26 H. W. Jang, J. H. Lee, J. L. Lee. Characterization of band bendings on Ga-face and N-face GaN films grown by metalorganic chemical-vapor deposition[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(21): 3955~3957
- 27 M. H. Kim, M. F. Schubert, Q. Dai *et al.*. Origin of efficiency droop in GaInN-based light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(18): 183507
- 28 Y. L. Li, Y. R. Huang, Y. H. Lai. Efficiency droop behaviors of InGaIn/GaN multiple-quantum-well light-emitting diodes with varying quantum well thickness[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(18): 181113
- 29 C. W. Liu, W. N. Wang, P. A. Shields *et al.*. Improvement of efficiency droop in resonance tunneling LEDs[C]. *SPIE*, 2008, **7058**: 70580D
- 30 M. F. Schubert, J. Xu, J. K. Kim *et al.*. Polarization-matched GaInN/AlGaInN multi-quantum-well light-emitting diodes with reduced efficiency droop[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(4): 041102
- 31 S. H. Han, D. Y. Lee, H. W. Shim *et al.*. Improvement of efficiency droop in InGaIn/GaN multiple quantum well light-emitting diodes with trapezoidal wells[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, **43**(35): 354004
- 32 Y. H. Sun, Y. W. Cheng, S. C. Wang *et al.*. Optical properties of the partially strain relaxed InGaIn/GaN light-emitting diodes induced by p-type GaN surface texturing[J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2011, **32**(2): 182~184
- 33 C. H. Chiu, D. W. Lin, C. C. Lin *et al.*. Reduction of efficiency droop in semipolar (1 $\bar{1}$ 01) InGaIn/GaN light-emitting diodes grown on patterned silicon substrates[J]. *Appl. Phys. Express*, 2011, **4**(10): 012105
- 34 Y. Zhao, J. Sonoda, C. C. Pan *et al.*. 30-mW-class high-power and high-efficiency blue semipolar (10 $\bar{1}\bar{1}$) InGaIn/GaN light-emitting diodes obtained by backside roughening technique[J]. *Appl. Phys. Express*, 2010, **3**(10): 102101
- 35 S. Yamamoto, Y. Zhao, C. C. Pan *et al.*. High-efficiency single-quantum-well green and yellow-green light-emitting diodes on semipolar (20 $\bar{2}$ 1)GaIn substrates[J]. *Appl. Phys. Express*, 2010, **3**(12): 122102
- 36 A. Tyagi, H. Zhong, N. N. Fellows *et al.*. High brightness violet InGaIn/GaN light emitting diodes on smipolar bulk GaIn substrates[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, **46**: 129~131
- 37 Y. Zhao, S. Tanaka, C. C. Pan *et al.*. High-power blue-violet semipolar (20 $\bar{2}\bar{1}$) InGaIn/GaN light-emitting diodes with low efficiency droop at 200 A/cm²[J]. *Appl. Phys. Express*, 2011, **4**(8): 08210
- 38 S. P. Chang, T. C. Lu, L. F. Zhuo *et al.*. Low droop nonpolar GaIn/InGaIn light emitting diodes grown on m-plane GaIn substrate[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2010, **157**(5): H501~H503
- 39 C. C. Pan, S. Tanaka, F. Wu *et al.*. High power, low efficiency-droop semipolar (20 $\bar{2}\bar{1}$) single-quantum-well blue light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Express*, 2012, **5**(6): 062103
- 40 J. Lee, X. Li, U. Ozgur *et al.*. On carrier spillover in c- and m-plane InGaIn light emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(20): 201113
- 41 S. C. Ling, T. C. Lu, S. P. Chang *et al.*. Low efficiency droop in blue-green m-plane InGaIn/GaN light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(23): 231101

- 42 H. Masui, S. Nakamura, S. P. DenBaars. Nonpolar and semipolar III-nitride light-emitting diodes: achievements and challenges[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2010, **57**(1): 88~100
- 43 S. H. Han, D. Y. Lee, S. J. Lee *et al.*. Effect of electron blocking layer on efficiency droop in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(23): 231123
- 44 S. H. Han, C. Y. Cho, S. J. Lee *et al.*. Effect of Mg doping in the barrier of InGaN/GaN multiple quantum well on optical power of light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(5): 051113
- 45 S. J. Lee, S. H. Han, C. Y. Cho *et al.*. Improvement of GaN-based light-emitting diodes using p-type AlGaIn/GaN superlattices with a graded Al composition[J]. *J. Physics D: Appl. Phys.*, 2011, **44**(10): 105101
- 46 X. Ni, X. Li, J. Xie *et al.*. Reduction of efficiency droop in InGaIn-based blue LEDs[C]. *SPIE*, 2009, **7216**: 72161W
- 47 L. B. Chang, M. J. Lai, Ray-Ming Lin *et al.*. Effect of electron leakage on efficiency droop in wide-well InGaIn-based light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Express*, 2011, **4**(1): 012106
- 48 D. A. Zakheim, A. S. Pavluchenko, D. A. Bauman. Blue LEDs: way to overcome efficiency droop[J]. *Phys. Stat. Sol. C*, 2011, **8**(1-7): 2340~2344
- 49 D. Zhu, A. N. Noemaun, M. F. Schubert *et al.*. Enhanced electron capture and symmetrized carrier distribution in GaInN light-emitting diodes having tailored barrier doping[J]. *Appl. Phys. Express*, 2010, **96**: 121110
- 50 H. P. Zhao, G. Y. Liu, R. A. Arif *et al.*. Current injection efficiency induced efficiency-droop in InGaIn quantum well light-emitting diodes[J]. *Solid-State Electron.*, 2010, **54**: 1119~1124
- 51 Y. J. Lee, C. H. Chen, C. J. Lee. Reduction in the efficiency-droop effect of InGaIn green light-emitting diodes using gradual quantum wells[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(20): 1506~1508
- 52 L. Y. Chen, Y. Y. Huang, C. S. Chang *et al.*. High output power density and low leakage current of InGaIn/GaN nanorod light emitting diodes with mechanical polishing process[J]. CS MANTECH Conference, 2010, 251~254
- 53 J. Hader, J. V. Moloney, S. W. Koch. Temperature-dependence of the internal efficiency droop in GaInN-based diodes[J]. *Appl. Phys. Express*, 2011, **99**(18): 181127
- 54 T. Doan, C. Tran, C. Chu *et al.*. Vertical GaInN based light emitting diodes on metal alloy substrate boosts high power LED performance[C]. *SPIE*, 2007, **6669**: 666903
- 55 M. L. Lin, Z. Q. Ye, M. S. Lei. Efficiency droop in blue InGaIn/GaN single-quantum-well light-emitting diodes on the Si substrate[J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2012, **27**(4): 045010
- 56 C. L. Chao, R. Xuan, H. Hsuan *et al.*. Reduction of efficiency droop in InGaIn light-emitting diodes grown on self-separated freestanding GaInN substrates[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(12): 798~780
- 57 D. S. Meyaard, Q. F. Shan, J. Cho *et al.*. Temperature dependent efficiency droop in InGaIn light-emitting diodes with different current densities[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **100**(8): 081106
- 58 Y. Y. Kudryk, A. K. Tkachenko, A. V. Zinouchuk. Temperature-dependent efficiency droop in InGaIn-based light-emitting diodes induced by current crowding[J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2012, **27**(5): 055013