

# 大功率 GaN 基 LED 的提取效率

郭金霞 马 龙 伊晓燕 王良臣 王国宏 李晋闽

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 影响 GaN 基 LED 效率的主要因素是内量子效率和提取效率. 蓝光 GaN 基的 LED 内量子效率可达 70% 以上, 紫外 GaN 基 LED 可达 80%, 进一步改善的空间较小. 而传统大面积结构 GaN 基 LED 由于全反射和吸收等原因, 外提取效率只有百分之几, 提高空间很大. 本文从几何和物理光学角度分析了影响 GaN 基 LED 外提取效率的因素, 针对全反射、吸收、横向光波导等问题总结了现有的各种提高 GaN 基 LED 提取效率的手段及其优缺点.

关键词: GaN 基 LED; 提取效率; 内量子效率; 全反射

PACC: 4280L; 4225B; 7280E

中图分类号: TN312<sup>+</sup>.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0170-06

## 1 前言

随着氮化镓(GaN)基的高亮度 LED 的开发和应用, 新一代绿色环保型固体照明光源——GaN 基白光 LED 已成为人们关注的焦点. 传统照明光源使用钨丝灯, 发光效率为 7.4~16lm/W, 日光灯的发光效率为 60~100lm/W, LED 为电子-空穴辐射复合发光, 目前国内大功率 GaN 基白光 LED(蓝光+荧光粉)的发光效率仅为 20~30lm/W, 国际上同类产品产品的发光效率也只有 50lm/W. 因此, 若想用 LED 取代现有照明光源, 还需进一步提高其效率. 从 LED 发光原理来看, LED 效率(外量子效率)主要由注入效率、内量子效率和提取效率来决定, 即

$$\eta_{\text{ext}} = \eta_{\text{inj}} \eta_{\text{int}} \eta_{\text{esc}} \quad (1)$$

其中 注入效率  $\eta_{\text{inj}}$  (injection efficiency) 与材料结构和器件串联电阻有关, 内量子效率  $\eta_{\text{int}}$  (internal quantum efficiency) 主要由晶体生长的质量(如位错密度)、量子阱的结构和器件制作过程中对有源层的损伤等因素决定. 目前, 在室温下, GaN 基蓝光 LED 的内量子效率在 70% 以上<sup>[1]</sup>, 以 GaN 为衬底的 AlGaIn 紫外光(UV)LED 的内量子效率达 80% 以上<sup>[2]</sup>. 而生长在蓝宝石衬底上的 GaN 基 BALED 的提取效率(light extraction efficiency)只有百分之几. 因此分析影响 GaN 基 LED 提取效率的原因, 进

一步提高其外提取效率是当前提高 GaN 基 LED 效率的主要努力方向.

## 2 GaN 基 LED 提取效率分析

首先, 导致 GaN 基 LED 提取效率很低的主要原因是 GaN 材料内部的全反射(total internal reflection). 由于 GaN( $n \approx 2.5$ )材料与空气( $n = 1$ )的折射率差较大, 在界面处发生全反射的临界角( $\theta_c = \arcsin(n_{\text{air}}/n_{\text{GaN}})$ )相对较小, GaN 与空气界面的全反射临界角为 23.6°, 而且有源区内产生的光线向各个方向传播的几率相同, 所以大部分光线被限制在器件内部不能出射, 使得 LED 的外提取效率只有大约  $1/4n^2$  ( $n$  为 GaN 的折射率).

其次, 在全反射临界角以内的光线也会由于 Fresnel 反射而不能全部出射, 提取效率为

$$\eta_{\text{esc}} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_c} T(\theta) \sin\theta d\theta \quad (2)$$

$$T(\theta) \approx T_{\perp}, \quad T_{\perp} = \frac{4n_s n_{\text{out}}}{(n_s + n_{\text{out}})^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{esc}} &\approx \frac{1}{4\pi} T_{\perp} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_c} \sin\theta d\theta \\ &= \frac{T_{\perp}}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{n_{\text{out}}}{n_s}\right)^2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $T(\theta)$  是半导体和空气界面处平均透射系数, 是入射角的函数;  $T_{\perp}$  为垂直入射光线的透射系数;

$n_s$  和  $n_{out}$  分别是半导体和空气的折射率. 对于 GaN 材料和空气的界面透射率为  $T_{\perp} = 81.6\%$ , 所以 Fresnel 反射也会使 GaN 基 LED 的提取效率有所下降.

另外, 如图 1 所示, 对于 BALED, 滞留在器件内部的光线, 经 GaN 和蓝宝石与空气的界面形成的波导层多次反射后, 大部分都被有源层、金属电极、焊点以及衬底吸收. 因此, 即使从 BALED 器件表面出射的光线能全部被收集, 提取效率也只有百分之十几, 而由于波导层多次反射吸收造成的光的损耗占 80% 以上. 因此本文就从减少和避免全反射、波导层反射吸收和转变光学传播模式等几个方面总结了现有的各种提高外提取效率的方法.

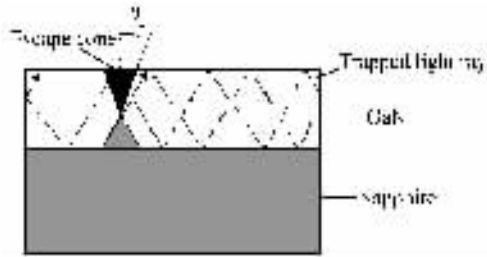


图 1 由于全反射造成的光损失示意图<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram for light loss due to total internal reflection<sup>[3]</sup>

## 3 提高 LED 的提取效率的方法

### 3.1 减少和消除全反射的方法

#### 3.1.1 表面粗化技术

现有的表面粗化技术很多, Huh 等人<sup>[4]</sup>在 p-GaN 表面电子束蒸发 Pt 金属薄膜 (5nm), 并在 900℃ 下退火形成金属团簇 (metal cluster) 作为掩蔽, 用湿法腐蚀在 p-GaN 表面形成 5~6nm 的粗糙度 (图 2(a)) 来减少全反射, 增加光子出射的几率. 这种结构使得 LED 的功率效率 (输出功率/输入功率) 与传统结构相比提高了 62%. 但是这种结构要求电阻较大的 p-GaN 层比较厚, 将会增加整个器件的串联电阻. 为了避免增加 p-GaN 层的厚度, Fujii 等人<sup>[5]</sup>选择将 n-GaN 表面粗化. 他们首先把 p-GaN 粘贴在 Si 片上, 用激光剥离技术 (LLO) 将 GaN 与蓝宝石衬底分离, 然后减薄至 n-GaN 层, 并利用湿法腐蚀在 n-GaN 表面构造六棱锥形突起 (图 2(b)), 湿法腐蚀表面 10min 后与未经表面腐蚀的 LED 相

比, 功率效率提高了 2.3 倍.

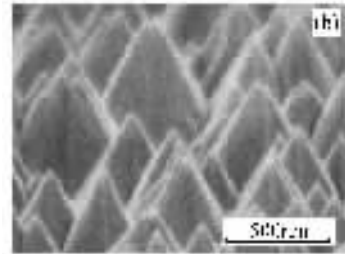
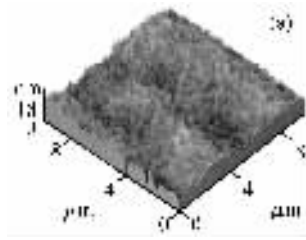


图 2 湿法腐蚀粗化后的 p-GaN(a)<sup>[4]</sup>和 n-GaN(b)<sup>[5]</sup>表面

Fig. 2 Microroughing p-GaN (a) and n-GaN (b) surfaces after wet etching

另外, 也有人在生长 GaN 材料之前先将蓝宝石表面粗化来增加光的提取效率, Tadatomo 采用 LEPS 技术<sup>[6]</sup>来增加光子的出射几率, 即先在蓝宝石衬底上干法刻蚀沟槽 (patterned sapphire substrate, 简称 PSS), 然后在其上横向外延生长 (ELO) GaN 材料制作倒装结构 LED. 它与在传统蓝宝石衬底上生长的材料制作的正装结构 LED 相比, 20mA 下的功率效率提高约 3.4 倍. 也有在 PSS 上制作正装结构的 LED<sup>[7]</sup>, 同时用 Rh 网状电极代替 Ni-Au 透明电极, 从而减少电极对光的吸收. 得到的蓝光 LED 器件 (图 3) 在 20mA 下的外量子效率为 34.9%.

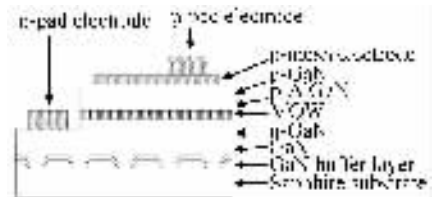


图 3 蓝宝石表面粗化后制作的大功率蓝光 LED 结构图<sup>[7]</sup>

Fig. 3 Schematic cross-sectional structure of the high-power blue LED with patterned sapphire substrate<sup>[7]</sup>

#### 3.1.2 倒金字塔 (TIP) 型 LED

由图 1 可以看出, 矩形结构的 LED 几乎将出射角大于全反射临界角的光线全部限制在器件内部, 所以将 LED 器件的侧面做成斜面可有效地减少器

件与空气界面处的全反射. 图 4(a)和(b)是 Osram 公司研制的矩形和 TIP 型 SiC 衬底 LED, 并分别对生长在立方 SiC 衬底上和不同侧面倾角的梯形 SiC 衬底上的 GaN LED 进行光线追踪(ray tracing)模拟<sup>[8]</sup>, 结果如图 4 所示.

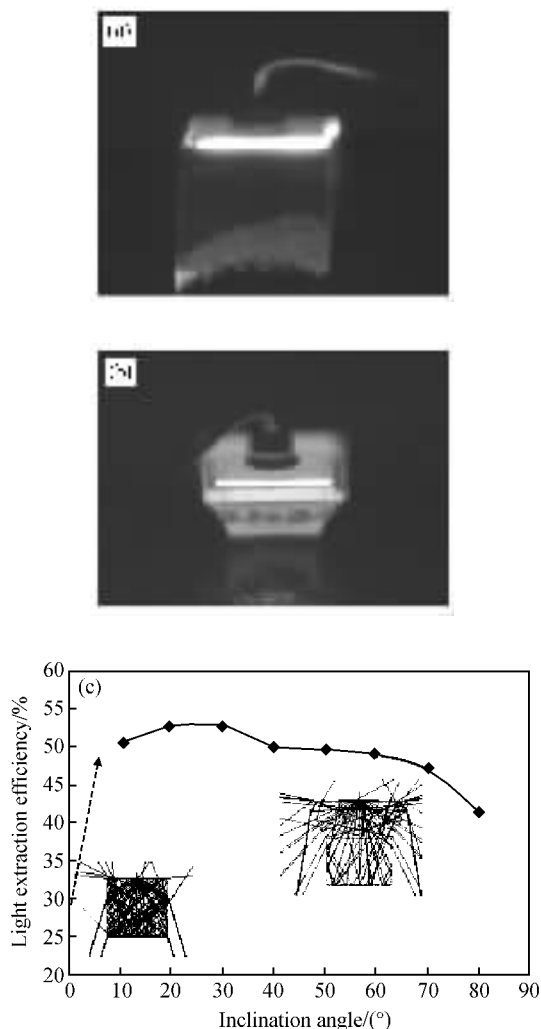


图 4 SiC 衬底 GaN LEDs 及其提取效率光线追踪模拟结果 (a)矩形 SiC 衬底 LED; (b) TIP 型 SiC 衬底 LED; (c) 不同侧面倾斜角的 SiC 衬底上的 GaN LEDs 提取效率光线追踪模拟结果

Fig. 4 GaN LEDs and ray tracing simulation of light extraction efficiency of GaN LEDs with different inclination SiC-substrate wall (a) GaN LED on cubic SiC-die; (b) GaN LED on TIP SiC-die; (c) Ray tracing simulation of light extraction efficiency of GaN LEDs with different inclination SiC-substrate wall

模拟结果显示, 当 SiC 衬底侧面的倾斜角为  $30^\circ$  时, 光的提取效率在 50% 以上, 相对矩形(倾斜角为零度)提高近 1 倍. 但是对于蓝宝石衬底的 GaN 基

LED 来讲, 宝石的硬度非常大, 制作这样的倾斜角比较困难.

### 3.2 提高电流扩展均匀性和减少吸收的方法

#### 3.2.1 衬底剥离技术

激光剥离技术可以实现蓝宝石衬底与器件的分离, 同时配合减薄抛光技术, 不但可以消除 GaN 缓冲层对光线的吸收, 消除蓝宝石衬底造成的散热困难的问题, 而且可以将 p 电极和 n 电极分别制作在器件的上下表面, 使得电流分布更均匀, 同时去掉 GaN 缓冲层还可以减小整个器件的串联电阻; 此外, 如果再在 LED 的 p-GaN 一侧制作高反金属电极, 这样出光效率可以大大提高. 2002 年日本利用此技术制作的波长为 365nm 的 UVLED, 结构如图 5 所示, 在 500mA 脉冲电流下的提取效率达 6.9%<sup>[9]</sup>.

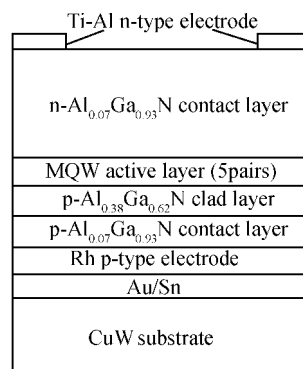


图 5 无蓝宝石衬底和 GaN 缓冲层的紫外光 LED<sup>[9]</sup>

Fig. 5 Schematic structure of the GaN-free UVLED after removing sapphire substrate

#### 3.2.2 倒装技术

LED 倒装技术有很多优点, 例如 Si-submount 的引入有利于散热、制作保护电路和集成. 除此之外, 由于 p 电极为加厚的高反电极, 使电流的扩展更为均匀, 内量子效率必然会优于正装结构. 在外提取效率方面, 倒装结构中蓝宝石对于蓝光基本上是透明的, 但是正装结构中 Ni/Au 透明电极对蓝光的吸收达 20%~30%; 另外, 正装结构中焊点对光线的吸收和阻挡也不容忽视, 而倒装结构如果使用高反射率的 Ag 基金属电极, 电极吸收很小. 图 6(a)和(b)分别是两种结构的光线出射示意图. 如果再在 Si-submount 上制作高反电极, 可进一步增加 LED 的提取效率. Lumiled 比较结果表明: 倒装结构 LED 的提取效率相对正装结构可以提高 1.6 倍.

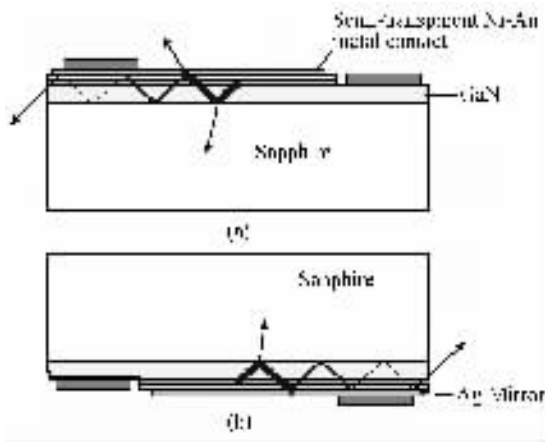


图6 正装结构(a)和倒装结构(b) GaN LEDs 的出光路径示意图<sup>[10]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of light extracted from conventional (a) and flip-chip (b) LEDs

### 3.3 减少光线横向光波导反射吸收, 增加出光面积的方法

由前面的分析我们看出, 由于波导层的存在, 大

部分光线都沿着波导层侧向传播且被吸收, 因此就有人提出微盘结构 LED( $\mu$ -LED), 通过减少光线横向传播长度, 同时增加出光面积来提高 LED 的提取效率. 图 7 是现在比较常用的  $\mu$ -LED.

微结构的尺寸一般在  $10\mu\text{m}$ , 这个长度正好是波长为  $470\text{nm}$  左右蓝光在 GaN 中的平均吸收长度<sup>[11,12]</sup>, 大部分横向传播的光线可以从微结构的边墙表面出射. BALED 与  $\mu$ -LED 光线传播路径如图 8 所示. Choi 等人的试验表明<sup>[13]</sup>, 在相同的发光面积下, 图 7 中的(b)和(c)与 BALED 相比, 光的提取效率分别提高了 30%和 100%. 但是, 如果要增加提取效率, 势必要大大增加整个器件的面积. 而且这两种结构很难实现接触电阻较高的 p 电极的互连, 造成电流扩展不均匀, 影响整个 LED 的注入效率, 目前还没有基于这两种结构的实用器件. 而 Jin 等人<sup>[14]</sup>设计了如图 7(a)所示的  $\mu$ -LED, 实验也证实了这种结构 LED 在相同器件面积下, 与大面积 LED 相比外量子效率提高了 60%. 相比之下, 这种结构容易实现 p 电极的互连.

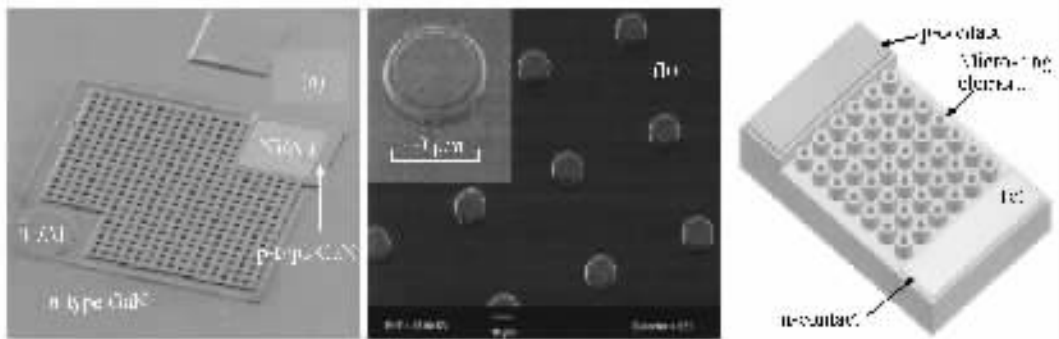


图7 三种常见的  $\mu$ -LEDs 的 SEM 照片和结构图 (a)互连微盘结构<sup>[14]</sup>; (b)微尺寸 LEDs<sup>[18]</sup>; (c)微环结构<sup>[13]</sup>

Fig. 7 SEM images and schematic diagram of three kinds of regular  $\mu$ -LEDs (a) Interconnected  $\mu$ -disk LEDs<sup>[14]</sup>; (b) Microsize LEDs<sup>[18]</sup>; (c) Micro-ring LEDs<sup>[13]</sup>

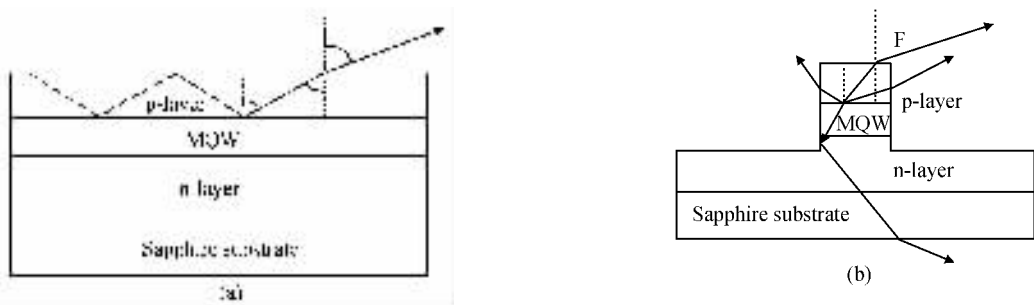


图8 传统大面积 LED 与  $\mu$ -LED 的光线传播路径示意图<sup>[15]</sup> (a)大面积 LED; (b)微结构 LED

Fig. 8 Schematic diagram of light extracted from conventional broad-LED and  $\mu$ -LED<sup>[15]</sup> (a) BALED; (b)  $\mu$ -LED

### 3.4 改变光学传播模式的方法

#### 3.4.1 谐振腔结构 LED(RCLED)

图 9(a)表示 BALED 有源区发出的光沿各个方向均匀分布,图 9(c)为 RCLED 器件结构图,在 LED 有源层的两侧生长高反的 DBR 层形成谐振腔,使腔中的自发辐射大大加强,同时使有源区发出的光线主要集中分布在全反射临界角内,因此出光

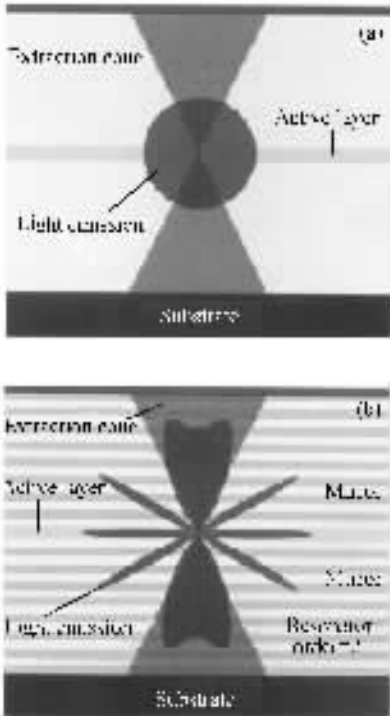


图 9 传统的 LED 和 RCLED 有源层中光线的分布及下表面发光 RCLED 的结构图 (a)大面积 LED;(b)谐振腔 LED;(c)下表面发光 RCLED

Fig. 9 Distribution of light ray in active layers of conventional LED ,RCLED and the schematic diagram of bottom surface emitting RCLED device (a) BALED; (b) RCLED; (c) Bottom surface emitting RCLED

效率大大提高.图 9(b)是 RCLED 中光线的分布状况,看得出,谐振腔结构能使大部分光线分布在全反射临界角内<sup>[16]</sup>.

#### 3.4.2 光子晶体 LED(PCLED)

在 GaN LED 上制作二维光子晶体(2D PCs),如图 10 所示<sup>[18]</sup>,光子在光子晶体中被折射率指数周期性变化的点阵多次散射后形成光子带隙(PBGs),带隙中沿水平波导方向传播的光被抑制,光只能从器件上下表面出射,使得光的外提取效率增加.而且光子晶体的尺寸约几百纳米,大部分光能在被 GaN 材料吸收耗尽之前逃逸出去,提取效率会进一步提高. Jiang 等人<sup>[19]</sup>利用光子晶体技术成功研制成了 GaN 蓝光(460nm)和紫外(340nm)LED,能使光功率较 BALED 分别提高 63%和 95%.但是光子晶体制作困难,成本很高,距实现产业化尚有一段时间.

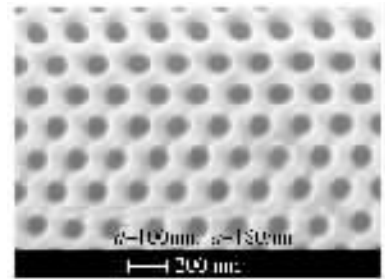


图 10 氮化物二维光子晶体的 SEM 照片<sup>[17]</sup>

Fig. 10 SEM image of 2D PCs with hole diameter of 100nm/180nm

目前,有各种各样提高 LED 提取效率的方法,有许多人开始研究如何在除蓝宝石外其他衬底上外延生长和制作 LED,并且已经取得了一定的成果.另外,有的研究开始转向用有机材料来取代现有的晶体材料来制作 LED.相信在不久的将来 LED 在效率方面会有很大的提高,实现 LED 的照明也不再是梦想.

## 4 结论

LED 的发展要想取代现有的照明光源,重要的是要解决提取效率问题.目前在蓝宝石上生长和制作 GaN 基 LED 的技术比较成熟,现有的生长技术可以让 GaN 基 LED 的内量子效率达到 70%以上,但是由于 GaN 材料与蓝宝石和空气的折射率差较大,界面处的全反射和半导体材料的吸收使得 LED

外提取效率很低,因此,人们用各种办法来减少和消除这些因素的影响,从而提高 LED 的外提取效率,本文分析了影响提取效率的主要原因,从减少和避免全反射、吸收和转变光学传播模式等几个方面总结了现有的各种提高外提取效率的方法。

## 参考文献

- [ 1 ] Kawakami Y, Narukawa Y, Omae K, et al. Dimensionality of excitons in InGaN-based light emitting devices. *Phys Status Solidi A*, 2000, 178:331
- [ 2 ] Nishida T, Saito H, Kobayashi N. Efficient and high-power AlGaN-based ultraviolet light-emitting diode grown on bulk GaN. *Appl Phys Lett*, 2001, 79:711
- [ 3 ] <http://www.ee.sc.edu/classes/Spring04/elct871/Lecture%2032-gk-Ⅷ.ppt>
- [ 4 ] Huh C, Lee K S, Kang E J, et al. Improved light-output and electrical performance of InGaN-based light-emitting diode by micro-roughening of the p-GaN surface. *J Appl Phys*, 2003, 93:9383
- [ 5 ] Fujii T, Gao Y, Sharma R, et al. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening. *Appl Phys Lett*, 2004, 84:855
- [ 6 ] Tadatomo K, Okagawa H, Ohuchi Y, et al. High output power InGaN ultraviolet light emitting diodes fabricated on patterned substrates using metalorganic vapor phase epitaxy. *Jpn J Appl Phys*, 2001, 40:L583
- [ 7 ] Yamada M, Mitani T, Narukawa Y, et al. InGaN-based near-ultraviolet and blue-light-emitting diodes with high external quantum efficiency using a patterned sapphire substrate and a mesh electrode. *Jpn J Appl Phys*, 2002, 41:L1431
- [ 8 ] Eisert D, Härle V. Simulations in the development process of GaN-based LEDs and laser diodes. Osram Opto Semiconductors GmbH, Germany
- [ 9 ] Morita D, Sano M, Yamamoto M, et al. High output power 365nm ultraviolet light emitting diode of GaN-free structure. *Jpn J Appl Phys*, 2002, 41:L1434
- [ 10 ] Steigerwald D, et al. High power, high efficiency InGaN light emitting diodes. Lumileds™ Light From Silicon Valley
- [ 11 ] Ambacher O, Rieger W, Ansmann P, et al. Sub-bandgap absorption of gallium nitride determined by photothermal deflection spectroscopy. *Solid State Commun*, 1996, 97(5):365
- [ 12 ] Choi H W, Jeon C W, Dawson M D, et al. Mechanism of enhanced light output efficiency in InGaN-based microlight emitting diodes. *J Appl Phys*, 2003, 93(10):5987
- [ 13 ] Choi H W, Dawson M D, Edwards P R, et al. High extraction efficiency InGaN micro-ring light-emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(22):4483
- [ 14 ] Jin S X, Li J, Lin J Y, et al. InGaN/GaN quantum well interconnected microdisk light emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(20):3236
- [ 15 ] <http://www.phys.ksu.edu/people/faculty/research/Jiang.pdf>
- [ 16 ] [http://www.pofac.de/downloads/itgfg/fgt16/FGT16\\_Mch\\_Lambkin\\_green-LED.pdf](http://www.pofac.de/downloads/itgfg/fgt16/FGT16_Mch_Lambkin_green-LED.pdf)
- [ 17 ] Jin S X, Li J, Li J Z, et al. GaN microdisk light emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2000, 76:631
- [ 18 ] Oder T N, Shakya J, Lin J Y, et al. III-nitride photonic crystals. *Appl Phys Lett*, 2003, 83:1231
- [ 19 ] Oder T N, Kim K H, Lin J Y, et al. III-nitride blue and ultraviolet photonic crystal light emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2004, 84:466

## Light Extraction Efficiency of High-Power GaN-Based Light-Emitting Diodes

Guo Jinxia, Ma Long, Yi Xiaoyan, Wang Liangchen, Wang Guohong, and Li Jinmin

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** GaN-based LED efficiency can be improved by increasing internal quantum efficiency and increasing light extraction efficiency. Internal quantum efficiency for GaN-based blue LEDs and UVLED is more than 70% and 80%, respectively. Because only a few percents of the internal light emitted from active layer can escape out of LED mainly due to total internal reflection (TIR), there is much room for improvement of the light extraction efficiency. The main reasons for low light extraction efficiency from point of geometric and physical view are analyzed, then all kinds of methods to improve the light extraction efficiency and their advantages and disadvantages are investigated.

**Key words:** GaN-based LED; extraction efficiency; internal quantum efficiency; total internal reflection

**PACC:** 4280L; 4225B; 7280E

**Article ID:** 0253-4177(2005)S0-0170-06