

# 占空比可调的氮化镓纳米圆台阵列的制备及其光致发光效率的研究

陈湛旭<sup>1</sup> 万巍<sup>1</sup> 陈耿炎<sup>2</sup> 何影记<sup>1</sup> 陈泳竹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>广东技术师范学院电子与信息学院, 广东 广州 510665

<sup>2</sup>广东技术师范学院机电学院, 广东 广州 510665

**摘要** 实验中在 p-GaN 层制备单层密排的聚苯乙烯(PS)纳米球作为掩模,通过改变纳米球掩膜的直径,制作了周期性的占空比不同的 GaN 纳米圆台阵列结构。实验结果表明,在归一化激发光功率后, p-GaN 层制备纳米圆台阵列的 LED 出光效率最高增加到参考样品的 3.8 倍。三维时域有限差分方法计算表明,周期性纳米结构破坏了 p-GaN 表面的全反射,增大了 LED 结构的光输出临界角,从而提高 LED 的光致发光效率。此外,利用可变的纳米球掩模刻蚀技术,可以在同一个周期下优化纳米圆台的尺寸从而进一步提高 LED 的出光效率,这可以用等效折射率与薄膜透射率理论来解释,计算结果与实验结果比较一致。

**关键词** 光学设计; 发光二极管; 纳米图形化; 纳米球刻蚀; 光致发光

**中图分类号** TN383 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.072201

## Fabrication of GaN Nano-Pillar Arrays with Tunable Duty Ratio and Study on Its Photoluminescence Efficiency

Chen Zhanxu<sup>1</sup> Wan Wei<sup>1</sup> Chen Gengyan<sup>2</sup> He Yingji<sup>1</sup> Chen Yongzhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*School of Electronic and Information, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou, Guangdong 510665, China*

<sup>2</sup>*College of Electromechanical Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou, Guangdong 510665, China*

**Abstract** A monolayer closely-packed polystyrene (PS) nanosphere is prepared as mask on p-GaN substrate in the experiment. The structures of GaN nano-pillar arrays with periodic different duty ratios are prepared by changing the diameter of nanosphere mask. The experiment results show that the photoluminescence efficiency of LED of nano-pillar arrays prepared on p-GaN substrate can be raised to 3.8 times of the reference sample after normalizing power of the laser. The three-dimensional finite difference time-domain simulation shows that photoluminescence efficiency is enhanced because the periodic nano structure breaks total reflection of GaN surface, and critical angle of light output of LED structure is enlarged. In addition, we can optimize the size of nano-pillar in the same period to improve photoluminescence efficiency of LED further by changeable nanosphere mask lithography. It can be explained by effective refractive index theory and film transmittance. The theoretical and calculated results are in agreement with the experimental results.

**Key words** optical design; light emitting diode; nano-patterned; nanosphere lithography; photoluminescence

**OCIS codes** 220.4241; 230.3670; 250.5230

**收稿日期:** 2016-02-04; **收到修改稿日期:** 2016-03-10; **网络出版日期:** 2016-06-17

**基金项目:** 国家自然科学基金(11174061, 11404067, 11447181, 61475038)、广东省自然科学基金(2015A030310213)

**作者简介:** 陈湛旭(1978—),男,博士,讲师,主要从事纳米结构发光二极管的设计与制备方面的研究。

E-mail: chenzhanxu78@126.com

## 1 引言

作为传统灯具的替代产品,发光二极管(LED)照明发展前景广阔,被誉为新一代的光源<sup>[1]</sup>。LED光源是直接电能转化为光能,能量转换效率相当高,理论上它只需要白炽灯 10% 的能耗或者是荧光灯 50% 的能耗。但是,目前 LED 的发光效率依然较低,严重制约了 LED 的应用与发展。究其原因是半导体材料与周围空气存在较大的折射率差<sup>[2]</sup>,根据 Snell 定律,大多数光子在界面会发生全反射,被材料再吸收或者形成波导模,最终只有少数光子能出射到空气中<sup>[3]</sup>。为了解决上述问题,人们发展了许多方法来提高 LED 的出光效率,例如改变的芯片形状<sup>[4]</sup>,纳米图形化表面<sup>[5-10]</sup>和表面等离子体技术<sup>[11-13]</sup>等。其中,纳米图形化或者粗化半导体材料表面,破坏 LED 材料界面的全反射,从而增大光输出的临界角,应该是最直接提高 LED 出光效率的方法<sup>[14]</sup>。例如, Son J H 等<sup>[15]</sup>为让光百分百透射出去在垂直结构 LED 的 n-GaN 的表面制作纳米圆锥结构,这些纳米圆锥的侧壁角能够控制在 24.1°左右,这与 GaN 的光输出临界角 23.4°非常接近,最后实验结果表明,具有该纳米结构的样品的电致发光强度增强到普通 LED 的 3 倍左右。Hao G D 等<sup>[16]</sup>用光刻的方法在平面结构的 p-GaN 表面制作周期性的纳米圆锥结构,具有该纳米结构样品的出光效率也能增加到参考样品的 2.2 倍左右。Hou 等<sup>[17]</sup>则使用直径为 1.5  $\mu\text{m}$  的聚苯乙烯(PS)小球作为掩模,在 p-GaN 的表面制作六角纳米孔阵,与传统 LED 相比,其光输出增加 45%。

在纳米图形化技术中,纳米球掩模刻蚀法具有低成本、高产出、可以大面积制备等特点<sup>[18]</sup>,非常适用于制备纳米结构。在常见的纳米球中,由于 PS 小球在作为掩模时容易被刻蚀,因此在制备纳米结构前,可以先对 PS 小球进行刻蚀,从而控制 PS 小球的直径来获得不同占空比的纳米结构。基于这个原理,可以对纳米结构的占空比进行相关的优化设计,从而找到一个相对好的结构来进一步提高 LED 的出光效率。基于 PS 纳米球掩模刻蚀的上述优势,本研究利用该技术在蓝宝石衬底的 GaN 基蓝光 LED 的 p-GaN 层制备周期性纳米圆台结构。周期性的纳米圆台结构破坏了半导体材料的全反射,能增大 LED 结构的逃逸光锥,从而提高 LED 的出光效率。光致发光(PL)是研究纳米结构光学性质的一种重要手段<sup>[19-23]</sup>,为了研究纳米结构对出光效率的影响,实验制备了不同尺寸的 p-GaN 纳米圆台阵列,并且开展了 PL 实验。实验结果表明,与普通的 LED 相比,p-GaN 层具有纳米圆台阵列的样品的 PL 效率有明显的增强,并且其出光效率与 p-GaN 层的纳米结构的尺寸有密切关系,其物理机制可以用薄膜理论和有效折射率理论来解释。三维时域有限差分(FDTD)方法模拟表明,该出光增强来源于表面的周期性纳米结构可以把 LED 芯片临界角外的光子有效地耦合出去,增大 LED 的光出射临界角,从而提高 LED 的 PL 效率。

## 2 实验方法

实验中使用的 LED 样品结构从下而上依次是 2 英寸(5.08 cm)的双抛型的蓝宝石衬底、3.5  $\mu\text{m}$  的非掺杂 GaN、2.3  $\mu\text{m}$  的 n 型 GaN,中间是发光的 3 个周期的有源层 InGaN/GaN 多量子阱(MQW)结构,上面大约是 200 nm 的 P 掺杂 GaN,样品的发光波长在 460 nm 左右,如图 1 所示。

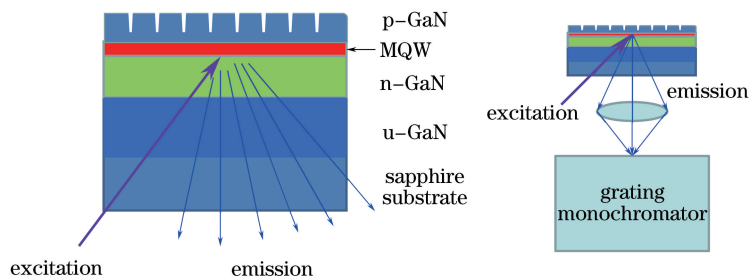


图 1 实验样品结构和光致发光示意图

Fig. 1 Schematic illustrations of the experimental sample structure and PL

在 p-GaN 层制备周期性的纳米圆台的实验流程如图 2 所示:首先,在 p-GaN 表面覆盖单层的密排的 PS 纳米球,纳米球的直径约为 310 nm。其次,用氧等离子垂直地刻蚀纳米球,通过控制刻蚀的时间,可以不同程度地减小 PS 球的直径,但不会刻蚀到 GaN 表面。为了得到不同尺寸的纳米柱,实验中使用氧等离子刻

蚀的时间分别为 7、9、11、13 s,从而得到不同尺寸的纳米球掩模。接着,以被氧等离子刻蚀后得到的非紧密排列的单层纳米球阵列为掩模,利用电感耦合等离子体(ICP)刻蚀 LED 表面材料 GaN,刻蚀时所用的混合气体  $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3$  流量为 40/5 sccm(sccm 为标况下毫升每分钟),刻蚀 GaN 材料的速率大约为 7.5 nm/s,通过控制刻蚀时间可以控制 GaN 纳米柱的高度,实验中刻蚀的时间为 20 s。最后,在氯仿溶液中超声将剩余的 PS 掩模小球剥离,得到周期为 310 nm,具有不同占空比的纳米圆台阵列图案。

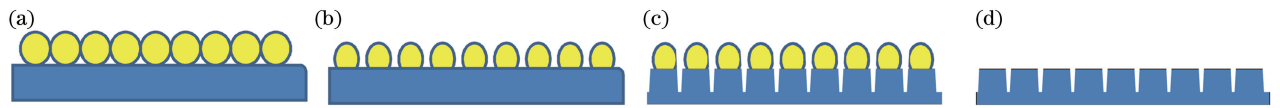


图 2 在 p-GaN 表面制作纳米柱阵列的流程图。(a) 在 p-GaN 表面制作单层密排的 PS 纳米小球;  
(b) 利用氧等离子刻蚀 PS 小球来控制其尺寸;(c) 利用 ICP 刻蚀 p-GaN,刻蚀出周期性的纳米柱阵列;  
(d) 在氯仿中超声去掉 PS 小球,在 p-GaN 表面获得周期性的纳米柱阵列

Fig. 2 Schematic of the fabrication of nano-pillar array on p-GaN surface.

- (a) Deposition of PS nanospheres on p-GaN surface; (b) etching PS spheres using oxygen plasma to control the diameter;  
(c) fabrication on periodic nano-pillar array by ICP etching on p-GaN;  
(d) removal of PS nanospheres in chloroform by supersonic, retaining periodic nano-pillar array on p-GaN surface

在 LED 的 p-GaN 层制作完周期性的纳米圆台结构后,利用 PL 来表征不同纳米结构对出光效率的影响。如图 1 所示,实验中利用发光中心波长在 405 nm 的激光器作为抽运光。由于样品是生长在双面抛光的蓝宝石衬底上的,因此样品是近似透明状的。为了消除 LED 表面结构对入射光散射的影响,使得入射到实验样品的光能量相等,采用的是背面抽运背面出光的方式,入射光的入射角大约为  $45^\circ$ 。接着使用一个透镜系统收集样品的激发光,并且会聚于光栅单色仪中,计算机采集数据最后输出样品的 PL 光谱。

特别需要注意的是,当 405 nm 激发光从背面大约  $45^\circ$  入射抽运 LED 样品时,由于样品的纳米结构存在差异性,其 MQW 层对抽运光的吸收率也会不同。这是因为样品纳米结构会散射部分的抽运光到 MQW 层中,不同参数的纳米结构散射的情况不同,因此各个样品有源层对抽运光的总吸收也不同。所以,有必要测量各个样品对抽运光的吸收率,并对谱线进行归一化。这样得到了各个样品在吸收率相同情况下的发光光谱,因此可以对比相同吸收率下不同纳米结构的出光效果。实验中,用分光光度计的氙灯光源产生 405 nm 的光,并以  $45^\circ$  角从背面入射置于积分球内的 LED 样品,然后用光谱仪收集出射光而得到不同纳米结构样品的吸收谱线。

### 3 实验结果与分析

为了研究不同纳米结构对出光效率的影响,实验中制作了 4 种具有纳米图形化 p-GaN 表面的样品,这 4 种样品在制作过程中除了氧等离子垂直刻蚀 PS 球的时间不同外,其余的工艺均相同,ICP 刻蚀的时间都是 20 s。4 种样品 A、B、C、D 被氧等离子垂直刻蚀的时间分别为 7、9、11、13 s。图 3 是样品 A、B、C、D 的表面图形化后的电镜图。由上述电镜图可见,随着 PS 掩模被刻蚀的越多,所得到的纳米圆柱的直径就越小。也可以看到,上述的纳米柱是圆台形的,也就是上下底面的直径是略有不同的,这种结构存在渐变的折射率效应,一般认为更有利于光的正向输出。

图 4(a) 是实验 LED 样品的 PL 谱线,由图可以看出,与参考样品相比,在 p-GaN 层制备了纳米圆台阵列的样品的 PL 强度有显著的提高。例如,在峰值波长 460 nm 处,样品 A、B、C、D 的峰值强度分别是参考样品的 6.6、7.6、6.7 和 6.6 倍。值得注意的是,该出光增强有部分是来源于纳米结构对 405 nm 抽运光的不同的吸收所引起的,因此,在研究纳米结构与出光效率的关系时要把这部分因素排除。图 4(b) 是积分球测得样品的吸收光谱,由图可以看出,具有纳米结构的样品在抽运波长 405 nm 的吸收率远大于参考样品,其吸收率如表一所示。因此在研究纳米结构与出光效率的关系时,需要把这一部分多余吸收抽运光的能量扣除,以参考样品的吸收率为 1,可以把其他样品的吸收率归一化,结果如表一所示。这样,把原始 PL 光谱除于归一化因子,可以得到归一化 PL 谱线,如图 4(c) 所示。归一化 PL 谱线就是假设样品在相同抽运光条件下的 PL 谱线,其出光效率主要由纳米结构决定。由图 4(c) 可以看出,在峰值波长 460 nm 处,样品 A、B、C 和 D

的峰值强度分别是参考样品的 3.8、2.9、2.6 和 2.8 倍。

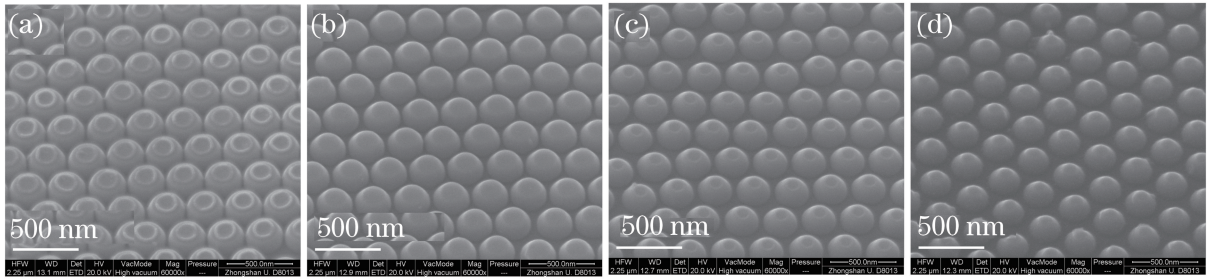


图 3 p-GaN 层的纳米圆台阵列的扫描电镜图。图(a)、(b)、(c)、(d) 分别为样品 A、B、C、D 的倾斜 45°视图，4 种样品使用氧等离子垂直刻蚀的时间分别为 7、9、11、13 s

Fig. 3 Scanning electron microscope images of nano-pillar arrays on p-GaN. (a), (b), (c), (d) are 45° tilt images of samples A, B, C, and D, respectively. The PS nanospheres on p-GaN layers of samples A, B, C, and D are etched with oxygen plasma for 7, 9, 11, 13 s, respectively

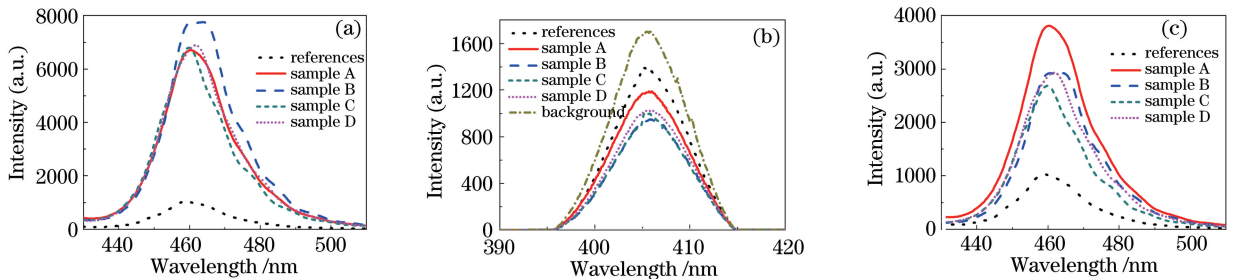


图 4 (a) 参考样品与 p-GaN 层具有纳米图形化的原始 PL 光谱；(b) 参考样品与 p-GaN 层具有纳米结构的吸收光谱；(c) 在相同吸收情况下，参考样品与 p-GaN 层具有纳米图形化的 PL 光谱

Fig. 4 (a) Original PL spectrum of reference sample and nano-patterned p-GaN substrate;

(b) absorption spectrum of reference sample and nano-patterned p-GaN substrate;

(c) PL spectrum of reference sample and nano-patterned p-GaN substrate, under the same absorption

表 1 实验样品在抽运波长 405 nm 的吸收率与计算得到的归一化因子

Table 1 Absorption rate of sample and normalization factor by calculation at pump wavelength of 405 nm

	Reference sample	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D
Absorption rate	17	30	45	43	40
Normalization factor	1	1.76	2.65	2.53	2.35

上述结果可以得到 2 个结论：1) 在 LED 的 p-GaN 层上制备周期性的纳米圆台阵列可以提高 LED 的出光效率；2) 在同一周期下，纳米结构存在 1 个最优出光效率的占空比。在 p-GaN 层制备周期性的纳米结构提高 LED 的出光效率，其主要原因来自以下 2 个方面：1) 纳米结构破坏了 p-GaN 表面的平滑，破坏了样品界面的全反射，使得光有更加多的机会逃逸出来；2) 纳米柱阵列的周期在发射波长量级，其结构具有光栅衍射效应，可以把介质中的波导模耦合到空气中去，从而提高 LED 结构的出光效率。

为了进一步分析其增强机制，开展了三维的 FDTD 计算相关结构的透射谱。模拟计算的结构如图 2(d) 所示，选取样品 A 的结构尺寸作为计算模型，纳米圆台的上底约为 230 nm，下底约为 270 nm，入射光的波长取 LED 的发光主波长 460 nm，GaN 的折射率取 2.49。分别考虑到入射光的 s 偏振和 p 偏振的情况，最终计算得到纳米图形化 p-GaN 层 LED 与 p-GaN 层无纳米结构的 LED 样品的透射谱，如图 5 所示。对于无纳米结构的 LED(参考样品)，透射谱在入射角大于 24°的透射率均为零，这说明大于临界角的光就无法从 LED 结构逃逸出来。而对于纳米图形化 p-GaN 层的 LED 结构，在 LED 结构的临界角外有非常显著的透射峰，并且在入射光为 s 偏振和 p 偏振的情况下都出现了，这就说明在 p-GaN 层制备了纳米圆台阵列的 LED 结构，可以把 LED 结构内的波导模耦合出来，从而提高 LED 的出光效率。

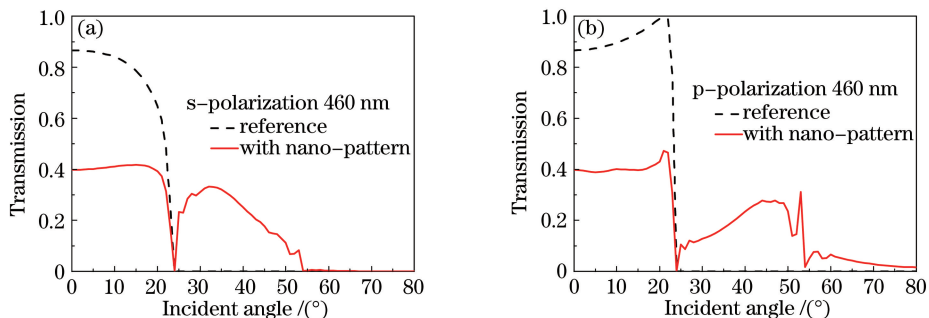


图 5 参考样品结构与纳米图形化 p-GaN 层 LED 结构的三维 FDTD 透射谱。

(a) s 偏振入射光的透射谱; (b) p 偏振入射光的透射谱

Fig. 5 Three-dimensional FDTD transmission spectra of reference sample structure and LED with nano-patterned p-GaN substrate. (a) Transmission spectra with s-polarizations light; (b) transmission spectra with p-polarizations light

从上面的 PL 结果可以看到, 同一个周期下不同占空比的纳米圆台结构其对应的出光效应存在一定的差异。为了进一步分析其出光效率差异的物理机制, 使用等效折射率与薄膜透射率理论来解释。把在 p-GaN 层制备的纳米结构看做是一层薄膜, 纳米结构的等效折射率可以表示为<sup>[24]</sup>

$$n_{\text{eff}} = [n_{\text{GaN}}^2 f + n_{\text{air}}^2 (1 - f)]^{1/2}, \quad (1)$$

式中,  $n_{\text{GaN}}$  是 GaN 的折射率,  $n_{\text{air}}$  是空气的折射率,  $n_{\text{eff}}$  是纳米结构的有效折射率,  $f$  为填充因子, 由结构的占空比决定。当改变纳米圆台的直径时, 其填充因子  $f$  也会改变, 从而导致  $n_{\text{eff}}$  发生变化。因此实验中周期性的纳米圆柱结构可以看作是一层折射率为  $n_{\text{eff}}$ 、厚度为纳米圆柱高度的介质薄膜。只考虑光正入射的情况, 纳米结构等效薄膜的反射率  $R$  随着纳米圆柱半径的变化的计算结果如图 6 所示。实验中样品 A、B、C 和 D 的纳米圆柱半径分别约为 250、200、175、150 nm, 在图 6 中可以看到样品 B、C、D 的纳米结构的反射率差不多, 而样品 A 的反射率最小, 反射率越小越有利于光的出射, 这与实验结果是非常吻合的。

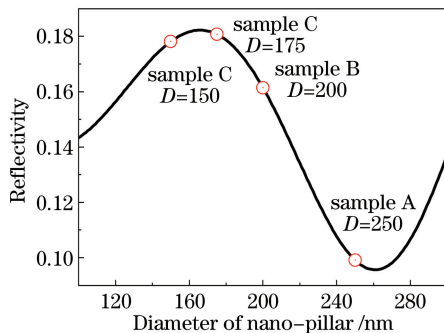


图 6 纳米结构等效薄膜的反射率与该结构的纳米柱直径的关系图

Fig. 6 Relationship between reflectivity of nanostructure equivalent film and nano-pillar diameter of the structure

## 4 结 论

利用可变的纳米球掩膜刻蚀技术, 成功地在 LED 的 p-GaN 层制备了占空比可调的纳米圆台阵列结构。PL 实验结果表明, 具有纳米柱阵列的 p-GaN 的 LED 样品, 其 PL 效率均获得增强。在归一化抽运功率后, 其 PL 的峰值强度最高增强到参考样品的 3.8 倍。该出光增强可以归因于周期性纳米结构可以破坏 GaN 表面的全反射, 从而增大逃逸光锥, 提高 LED 的出光效率。理论计算表明, 占空比变化的纳米圆台阵列结构其透射率也会发生变化, 故而可以在同一个周期下优化纳米柱的尺寸从而优化纳米结构的透射率。因此, 该方法有望发展成为实现高效率 LED 的制备方法。

## 参 考 文 献

- 1 Wiesmann C, Bergenek K, Linder N, *et al.*. Photonic crystal LEDs—designing light extraction[J]. *Laser & Photon Rev*,

- 2009, 3(3): 262-286.
- 2 Lin Chiafeng, Zheng Jinghui, Yang Zhongjie, *et al.*. High-efficiency InGaN-based light-emitting diodes with nanoporous GaN: Mg structure[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(8): 083121.
  - 3 Chung Chiehyang, Chia Fenglin, Chun Minlin, *et al.*. Improving light output power of InGaN-based light emitting diodes with pattern-nanoporous p-type GaN: Mg surfaces[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(20): 203103.
  - 4 Shchekin O B, Epler J E, Trottier T A, *et al.*. High performance thin-film flip-chip InGaN-GaN light-emitting diodes [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(7): 071109.
  - 5 An H M, Sim J I, Shin K S, *et al.*. Increased light extraction from vertical GaN light-emitting diodes with ordered, cone-shaped deep-pillar nanostructures[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2012, 48(7): 891-896.
  - 6 Yonghui Zhang, Tongbo Wei, Zhuo Xiong, *et al.*. Enhanced optical power of GaN-based light-emitting diode with compound photonic crystals by multiple-exposure nanosphere-lens lithography [J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 105(1): 013108.
  - 7 Wang Xiaomin, Li Kang, Kong Fanmin, *et al.*. Effect of structure of nano-hemisphere microlens array on light extraction efficiency of GaN-LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1223001.  
王晓民, 李康, 孔凡敏, 等. 纳米半球微镜阵列结构对 GaN 基 LED 光提取效率的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1223001.
  - 8 Chen Jian, Wang Qingkang, Li Haihua. Effect of random perturbation of structural parameters on the light extraction efficiency of light emitting diode with photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 233-236.  
陈健, 王庆康, 李海华. 光子晶体结构参数的随机扰动对光子晶体 LED 出光效率的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 233-236.
  - 9 Shen Xiaoxia, Dong Guoyan, Ren Yazhou, *et al.*. Light extraction enhancement of photonic crystal LEDs with complex technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100006.  
沈晓霞, 董国艳, 任亚洲, 等. 利用复合技术提高光子晶体 LED 发光效率的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100006.
  - 10 Liu Dan, Tong Aihong, Xiao Ming, *et al.*. Optimizing design for GaN-based light emitting diodes with photonic crystal slab[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 122303.  
刘丹, 童爱红, 肖明, 等. GaN 基光子晶体发光二极管的优化设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 122303.
  - 11 Lin Chunhan, Hsieh Chieh, Tu Charnggan, *et al.*. Efficiency improvement of a vertical light emitting diode through surface plasmon coupling and grating scattering [J]. *Opt Express*, 2014, 22(s3): A842-A856.
  - 12 Zhang Zhengming, Li Kang, Kong Fanmin, *et al.*. Study on improving light emitting efficiency of LED by using silver nanodisk array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0423001.  
张振明, 李康, 孔凡敏, 等. 采用银纳米圆盘阵列提高 LED 发光特性的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0423001.
  - 13 Huang C W, Tseng H Y, Chen C Y, *et al.*. Fabrication of surface metal nanoparticles and their induced surface plasmon coupling with subsurface InGaN/GaN quantum wells[J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(47): 475201.
  - 14 Hu Jinyong, Huang Huamao, Wang Hong, *et al.*. Light-output enhancement of GaN-based light-emitting diodes with surface textured ITO [J]. *Chinese J Luminescence*, 2014, 35(5): 613-617.  
胡金勇, 黄华茂, 王洪, 等. ITO 表面粗化提高 GaN 基 LED 芯片出光效率[J]. *发光学报*, 2014, 35(5): 613-617.
  - 15 Son J H, Kim J U, Song Y H, *et al.*. Design rule of nanostructures in light-emitting diodes for complete elimination of total internal reflection [J]. *Adv Mater*, 2012, 24(17): 2259-2262.
  - 16 Hao Guodong, Jahir A M, Takahashi T, *et al.*. Enhanced light extraction in GaN-based light-emitting diodes by evanescent wave coupling effect [J]. *Appl Phys Express*, 2014, 7(10): 102101.
  - 17 Hou C H, Tseng S Z, Chan C H, *et al.*. Output power enhancement of light-emitting diodes via two-dimensional hole arrays generated by a monolayer of microspheres[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(13): 133105.
  - 18 Chen Zhanxu, Wan Wei, He Yingji, *et al.*. Light-extraction enhancement of GaN-based LEDs by closely-packed nanospheres monolayer[J]. *Acta Phys Sin*, 2015, 64(14): 148502.  
陈湛旭, 万巍, 何影记, 等. 利用单层密排的纳米球提高发光二极管的出光效率[J]. *物理学报*, 2015, 64(14): 148502.

- 19 Kim B J, Jung H, Shin J, *et al.*. Enhancement of light extraction efficiency of ultraviolet light emitting diodes by patterning of SiO<sub>2</sub> nanosphere arrays[J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(8): 2742-2744.
  - 20 Athanasiou M, Kim T K, Liu B, *et al.*. Fabrication of two-dimensional InGaN/GaN photonic crystal structure using a modified nanosphere lithography technique[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(19): 191108.
  - 21 Li K H, Zetao M, Choi H W. Tunable clover-shaped GaN photonic bandgap structures patterned by dual-step nanosphere lithography[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 100(14): 141101.
  - 22 Wu G M, Yen C C, Chien H W, *et al.*. Effects of nano-structured photonic crystals on light extraction enhancement of nitride light-emitting diodes[J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519(15): 5074-5077.
  - 23 Li K H, Choi H W. Air-spaced GaN nanopillar photonic band gap structures patterned by nanosphere lithography[J]. *J Appl Phys*, 2011, 109(2): 023107.
  - 24 Chen Jian, Li Xiaoli, Li Haihua, *et al.*. Research of LED light extraction efficiency of photonic crystal with square and hexagonal lattice[J]. *Acta Phys Sin*, 2009, 58(9): 6216-6221.
- 陈 健, 李小丽, 李海华, 等. 基于正方和六角排列结构光子晶体对发光二极管出光效率的研究 [J]. *物理学报*, 2009, 58(9): 6216-6221.