

# 侧壁粗化 GaN 基倒装芯片光提取效率的模拟分析

王雪<sup>\*\*</sup>, 崔志勇, 王兵, 郭凯, 段瑞飞, 曾一平<sup>\*</sup>, 李晋闽

北京中科优唯科技有限公司, 北京 100083

**摘要** 针对由激光隐形切割技术导致的蓝宝石衬底侧壁粗化对 GaN 基发光二极管(LED)倒装芯片光提取效率(LEE)的影响,提出一种蒙特卡罗光线追踪的方法。使用蒙特卡罗光线追踪法具体分析侧壁隐形切割对 LED 倒装芯片各出光面 LEE 的影响,并对 LED 倒装芯片蓝宝石侧壁隐形切割的层数和位置进行优化设计。仿真结果表明,随着蓝宝石侧壁隐形切割层数的增多,以及蓝宝石侧壁等效粗糙度的提升,LED 倒装芯片顶部出光面的 LEE 缓慢减少,而侧壁和 LED 倒装芯片总的 LEE 逐渐增加。采用蒙特卡罗光线追踪法模拟均匀激光打点与组合激光打点对 LED 倒装芯片 LEE 的影响。实验结果表明,当隐形切割层数固定时,均匀激光打点的侧壁和总的 LEE 均高于组合激光打点。

**关键词** 光学器件; 发光二极管; 激光隐形切割; 侧壁粗化; 光提取效率

中图分类号 O472+.8

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0723001

## Simulation and Analysis of Light Extraction Efficiency of GaN-Based Flip Chip with Sidewall Roughness

Wang Xue<sup>\*\*</sup>, Cui Zhiyong, Wang Bing, Guo Kai, Duan Ruifei, Zeng Yiping<sup>\*</sup>, Li Jinmin

Beijing Youwill Hitech Co., Ltd, Beijing 100083, China

**Abstract** Herein, a Monte Carlo ray-tracing method is proposed to investigate the influence of the roughening of the sapphire substrate sidewall caused by laser hidden cutting technology on the light extraction efficiency (LEE) of GaN-based flip chip light-emitting diodes (LEDs). Monte Carlo ray tracing method is used to analyze the influence of the sidewall invisible cutting on the LEE of each light-emitting surface of the LED flip chip and optimize the number and position of the sapphire sidewall invisible cutting of the LED flip chip. Simulation results show that as the number of invisible cutting layers on the sapphire sidewall and equivalent roughness of the sapphire sidewall increase, the LEE of the light-emitting surface on the top of the LED flip chip gradually decreases and the total LEE of the sidewall and LED flip chip gradually increase. The Monte Carlo ray-tracing method is used to simulate the effect of uniform and combined laser dotting on the LEE of the LED flip chip. Experimental results show that when the number of invisible cutting layers is fixed, the sidewalls and total LEE of uniform laser dots are higher than those of combined laser dots.

**Key words** optical devices; light-emitting diode; laser hidden cutting; sidewall roughness; light extraction efficiency

**OCIS codes** 230.3670; 130.5990; 160.6000

收稿日期: 2020-07-03; 修回日期: 2020-07-28; 录用日期: 2020-08-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0404202)

<sup>\*</sup>E-mail: zengyiping@htmocvd.com; <sup>\*\*</sup>E-mail: wangxue@luan-uv.com

## 1 引言

GaN 是一种第三代宽禁带半导体材料,使用其制备的发光二极管(LED)具有光电转换效率高、使用寿命长和环境友好性的优点,广泛应用于空气/水杀菌消毒、聚合物固化、生化探测和医疗等领域<sup>[1-2]</sup>。但受到材料的限制,GaN 和蓝宝石以及蓝宝石和空气之间存在较大的折射率差异(GaN 的折射率约为 2.16~2.60,空气的折射率为 1),而且容易发生全反射,导致 LED 的光提取效率(LEE)和光输出功率低,从而限制了 LED 的应用发展,因此 LED 的 LEE 仍有很大的提升空间<sup>[3-5]</sup>。近年来,许多研究者采用倒装结构的设计和衬底图形化的处理,如采用蛾眼、锥型、圆柱和圆台等来改变衬底结构<sup>[6-8]</sup>,可以减少出射界面的全反射损失,进而提高 LEE。刘顺瑞等<sup>[9]</sup>在衬底背面制备了蛾眼结构,当微结构的底面占空比为 0.55 和侧壁倾角为 70° 时,器件的 LEE 取得最优值。方晓敏等<sup>[10]</sup>模拟研究了不同的光栅形状对 LED 倒装芯片 LEE 的影响,结果表明当光栅为等腰三角形时,芯片的 LEE 最高可达 77.75%。

对于传统矩型结构的 LED,光子会在器件内部来回多次反射,反射过程中有一部分的光子会到达器件的侧壁,通过侧壁出射;另一部分的光子则在多次反射过程中被吸收。为了使更多的光子逃逸出去,可以对器件的侧壁进行粗化以达到提高出光效率的目的<sup>[11-12]</sup>。Lee 等<sup>[13]</sup>使用了激光隐形切割技术对蓝宝石衬底的侧壁进行粗化以减少侧壁全反,可以使更多的光子从粗糙的侧壁表面提取出来,从而提升 LED 的出光效率。

激光隐形切割技术是衬底侧壁粗化的一种有效手段,目前鲜有科研人员对其进行系统研究。本文采用蒙特卡罗光线追踪方法并根据由激光打点导致蓝宝石衬底侧壁粗化的原理,模拟蓝宝石衬底侧壁粗化结构对 GaN 基 LED 倒装芯片 LEE 的影响。

## 2 LED 倒装芯片结构模型的建立与仿真

根据一般的 GaN 基 LED 倒装芯片结构建立的简单模型如图 1 所示。倒装芯片的平面尺寸为 60  $\mu\text{m}$   $\times$  60  $\mu\text{m}$ ,模型从下往上的结构依次为反射层、p 层(p-GaN)、量子阱(MQW)层(有源层)、n 层(n-GaN)、蓝宝石衬底和接收面,其中接收面包含顶



图 1 LED 倒装芯片的模型

Fig. 1 Model of LED flip chip

部和侧壁共 5 面。实际生产中,MQW 层和 p 层比较薄,故实验将 n 层、MQW 层和 p 层的折射率均定为 2.45。根据相似原理,将 n 层、MQW 层和 p 层的吸收系数均定为 10  $\text{mm}^{-1}$ 。由于 MQW 层比较薄,故令其发光面为上下两面且背向发射光源,每一面的光输出功率定为 10 mW。蓝宝石衬底的折射率定为 1.67,此时假设蓝宝石对光是透明的,吸收系数设为 0  $\text{mm}^{-1}$ 。为了使 MQW 层发射光源中的大部分能够从蓝宝石的表面射出,故将反射层定为理想镜面,吸收系数定为 0  $\text{mm}^{-1}$ ,反射率定为 100%。接收面距离芯片 1  $\mu\text{m}$ <sup>[14]</sup>。各层对应的厚度与材料性能如表 1 所示。

表 1 模型中每层材料的厚度、吸收系数、折射率和反射率  
Table 1 Material thickness, absorption coefficient, refractive index and reflectance of each layer in model

Item	Thickness (H) / $\mu\text{m}$	Absorptivity (A) / $\text{mm}^{-1}$	Refractive index (n)	Reflectivity / %
Sapphire	100.0	0	1.67	-
n layer	4.0	10	2.45	-
MQW	0.1	10	2.45	-
p layer	0.2	10	2.45	-
Reflector	1.0	0	-	100

根据图 1 和表 1 建立一个常规表面粗化的 LED 倒装芯片,并采用蒙特卡罗光线追踪方法对其进行仿真追迹,光线追迹图如图 2 所示。经过仿真得到,表面粗化的 LED 倒装芯片的 LEE 为 35.60%,而实际生产的无侧壁粗化的 LED 倒装芯片的 LEE 约为 33%,仿真结果比实际生产的 LED 约提高 2.6 个百分点,可以看到两者 LEE 比较接近,具有参考意义。从图 2 可以看到,光子主要从顶部出光面逸出,衬底

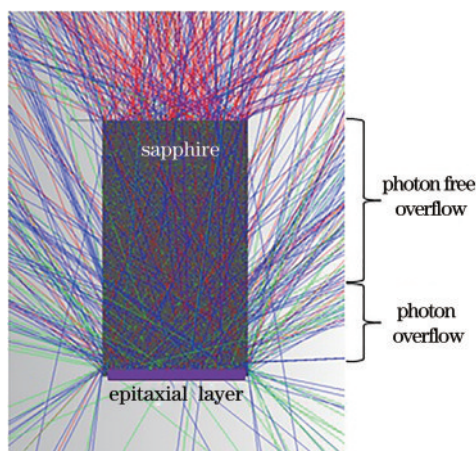


图2 LED倒装芯片模型的光线追迹图  
Fig. 2 Ray tracing picture of LED flip chip model

侧壁距外延层0~25 μm处均有部分光子逸出,而其余侧壁部位由于受到全反射的影响几乎没有光子逸出。若对衬底侧壁进行粗化处理,将会有大量的光子从侧壁逸出,这可以提升芯片的LEE。文献[13]指出了激光隐切打点是形成侧壁粗化、改善侧壁结构以及增加LEE的一种有效方法,采用该方法处理会在侧壁形成一排线性的点。图3(a)为使用高倍显微镜观察激光隐形打点后的蓝宝石侧壁,图3(b)为隐切点的仿真模型,图3(c)为隐切点理想状态的仿真模拟截面。参照隐切机设置的打点速率与图3(a),定义隐切点为圆锥型,直径为3 μm,点与点之间的距离为3 μm,深度为1.5 μm。

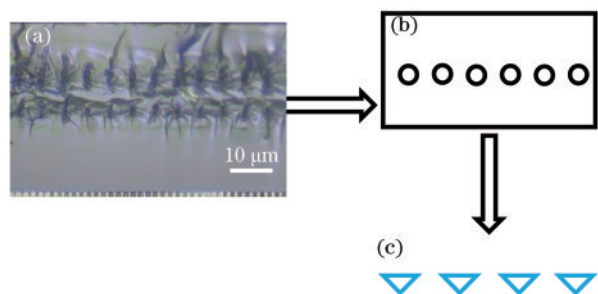


图3 激光隐切打点的流程示意图。(a)激光隐切后的蓝宝石侧壁;(b)隐切点模型;(c)隐切点的截面模型  
Fig. 3 Process diagram of laser hidden cutting dot.  
(a) Sapphire side wall after laser hidden cutting;  
(b) hidden tangent point model; (c) cross-section model of hidden tangent points

### 3 分析与讨论

#### 3.1 衬底侧壁隐切层数对 LEE 的影响

模拟隐切层数(隐切层平均分布在蓝宝石的侧

壁)对LED倒装芯片LEE的影响,结果如图4所示,其中total指总的LEE,top指顶部出光面的LEE,side指侧壁出光面的LEE,隐切层数为0表示衬底侧壁未经过激光打点粗化的芯片结构(在后续数据对比中以该样品作为参考样品),隐切层数为1表示衬底侧壁有一层经过激光打点粗化的芯片结构。从图4可以看到,随着隐切点层数的增多,侧壁的等效粗糙度逐渐增加,顶部出光面的LEE缓慢减少,而侧壁以及总的LEE逐渐增加;当隐切层数为0时,总的LEE为35.63%,侧壁的LEE为14.71%;当隐切层数为7时,LEE出现突增,总的LEE明显提升,值为41.65%,侧壁的LEE为24.23%;相比于隐切层数为0的芯片结构,隐切层数为7的总LEE增加6.02个百分点,侧壁的LEE增加9.52个百分点。这是因为由侧壁粗化导致部分光线从衬底侧壁出射,所以蓝宝石正面的出射光线数会减少,但侧壁共有4个出射面,总体而言整个芯片的LEE是增加的。从图4的曲线整体趋势可以看到,当隐切层数为12和13时,总的LEE达到最大,分别为42.05%和42.15%,但生产过程中考虑到工艺与成本,建议采用7层隐切层。

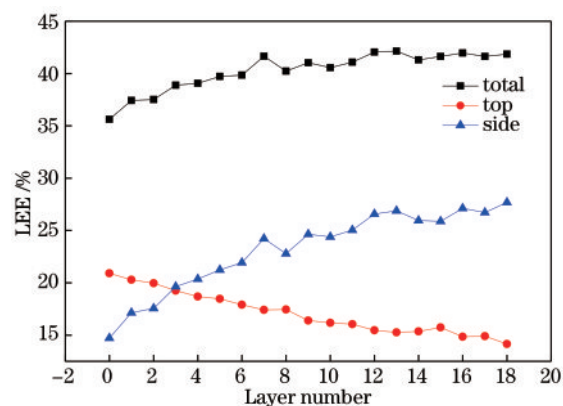


图4 LEE随隐切层数的变化曲线  
Fig. 4 Variation curves of LEE with number of hidden cutting layers

#### 3.2 距离外延层发光面处隐切层位置对 LEE 的影响

根据图4得到的结论,以7层隐切层为基准,研究距离外延层发光面处单排隐切层位置对芯片LEE的影响。设置对比样品0(侧壁无隐切层,即未经过侧壁粗化);模拟样品F1、F2、F3和F4,隐切层距离外延层发光面的距离分别为14, 21, 28, 35 μm。通过光线追迹法来模拟LEE数据,结果如图5所示。从图5可以看到,样品F1~F4总的

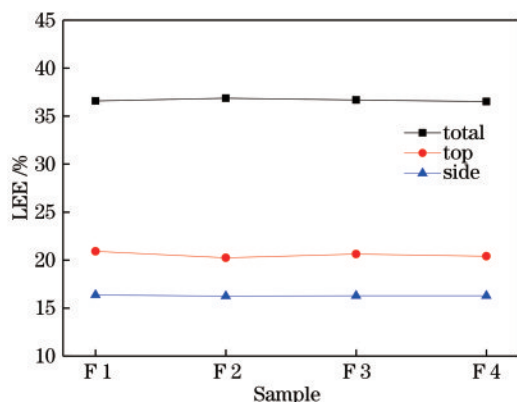


图5 F 1~F 4样品 LEE 的变化曲线

Fig. 5 LEE curves of F 1-F 4 samples

LEE 变化较小,均约为 36.70%;相比于对比样品 0,样品 F 1~F 4 总的 LEE 提升约为 1 个百分点,效果不明显,说明单排隐切层的位置对芯片 LEE 的影响较小。随后采用光线追迹法来模拟样品 F 5 (具有三层隐切点,分别设置在距离外延层发光面 21, 28, 35  $\mu\text{m}$  处),观察三层隐切点对倒装芯片 LEE 的影响。模拟结果得到样品 F 5 总的 LEE 达 38.09%,侧壁的 LEE 为 18.67%。相比于对比样品 0,样品 F 5 总的 LEE 高出 2.46 个百分点,侧壁的 LEE 提升 3.96 个百分点。考虑到无隐切层的样品 0 在距离外延层发光面 0~25  $\mu\text{m}$  处均有光子逸出,故未将距离外延层发光面 14  $\mu\text{m}$  处的隐切层加入 F 5 样品中。

### 3.3 距离顶部出光面处隐切层位置对 LEE 的影响

从图 2 可以看到,距离顶部出光面的衬底部分基本无光子逸出。现对靠近顶部出光面的侧壁进行激光打点,观察不同的隐切层位置对倒装芯片 LEE 的影响,结果如图 6 所示。设置对比样品 0 (侧壁无隐切层,即未经过侧壁粗化),模拟样品

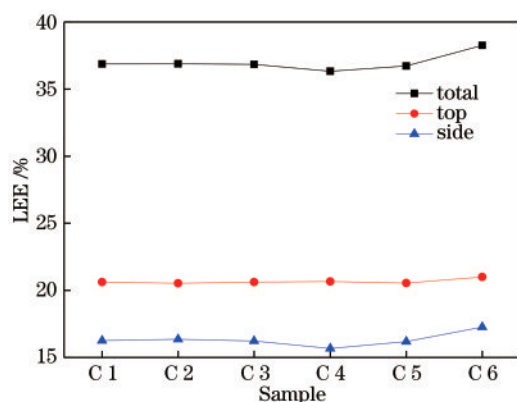


图6 C 1~C 6样品 LEE 的变化曲线

Fig. 6 LEE curves of C 1-C 6 samples

C 1~C 6。隐切层距离顶部出光面的位置如表 2 所示。从图 6 可以看到,样品 C 1~C 5 总的 LEE 变化较小,均约为 36.80%;相比于无隐切层的对比样品 0,样品 C 1~C 5 总的 LEE 只增加 1 个百分点,效果不明显;样品 C 6 总的 LEE 为 38.26%,侧壁的 LEE 为 17.26%;相比于无隐切层的对比样品 0,样品 C 6 总的 LEE 提升 2.63 个百分点,说明在衬底顶部位置由激光打点形成的等效粗化效果更佳。结合图 4 得到的结论,模拟样品 C 7 (具有两层隐切点,分别设置在距离出光面 7  $\mu\text{m}$  和 0  $\mu\text{m}$  处),模拟得到样品 C 7 总的 LEE 为 38.57%,相比于无隐切层的对比样品 0 高出 2.94 个百分点。

表 2 样品对应的位置

Table 2 Position of samples

Sample	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
Distance( $d$ ) / $\mu\text{m}$	10.0	7.0	4.0	2.0	1.5	0

### 3.4 均匀打点和组合打点对 LEE 的影响

组合样品 F 5 和 C 7 的打点情况如图 7(a) 所示。从图 7(a) 可以看到,组合样品的中间部分有一块空白区域,在空白区域内进行均匀激光打点可以形成组合样品,并观察隐切点层数对芯片 LEE 的影响。图 7(b) 为组合样品 F 5 和 C 7 的均匀打点情况。对组合打点样品进行模拟,结果如图 8 所示。从图 8 可以看到,随着空白区域隐切点层数的增多,侧壁光子数增加,相应的顶部光子减少,故其总的 LEE 呈现增长的趋势。与图 4 相比,在相同的隐切点层数,均匀激光打点的总的 LEE 与侧壁的 LEE 均高于组合打点。综上所述,激光打点可以等效粗化蓝宝石侧壁,使顶部光子的逸出数减少,侧壁光子的逸出数增加,总体而言增加了侧壁的光子逸出数和倒装芯片总的光子逸出数,所以 LEE 会相应提升。

## 4 结 论

由激光隐形切割技术会导致蓝宝石衬底侧壁粗化,其会对 GaN 基 LED 倒装芯片 LEE 造成影响,为此提出一种蒙特卡罗光线追踪的方法。研究结果表明,随着隐切点层数的增多,以及侧壁等效粗糙度的增加,使顶部出光面的 LEE 缓慢减少,侧壁的 LEE 以及总的 LEE 逐渐增加。但生产过程中需要综合考虑工艺与成本,故建议采用隐切点层数为 7 的工艺,则总的 LEE 为 41.65%,侧壁的 LEE 为 24.23%。相比于无侧壁粗化的芯片结构,7 层隐切点总的 LEE

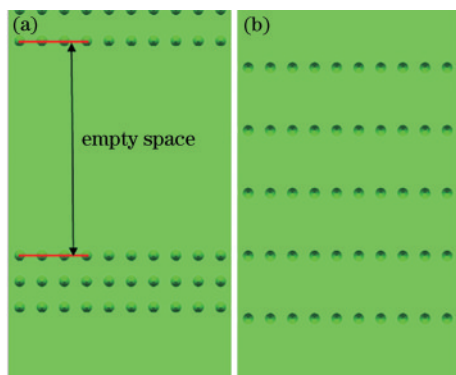


图 7 样品示意图。(a)组合样品;(b)均匀样品

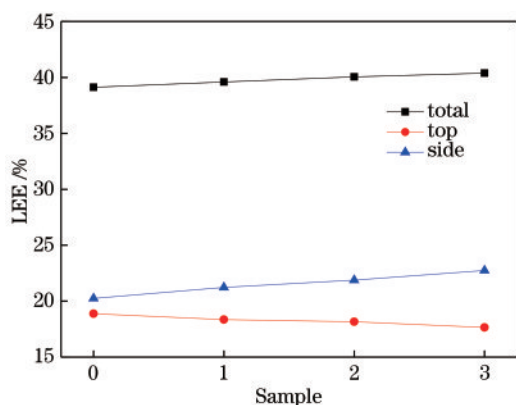
Fig. 7 Schematic of sample. (a) Combination sample;  
(b) uniform sample

图 8 LEE 随空白区域中隐切层数的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of LEE with number of hidden  
cutting layers in empty space

增加 6.02 个百分点,侧壁的 LEE 增加 9.52 个百分点。同时研究隐切层位置对 LEE 的影响,当隐切层数相同时,均匀激光打点的样品总的 LEE 和侧壁的 LEE 均高于组合打点样品。综上所述,激光打点等效粗化蓝宝石侧壁会导致顶部光子的逸出数减少,侧壁光子的逸出数增加,总体而言增加了侧壁的光子逸出数和倒装芯片的总体光子逸出数,LEE 相应提升。使用仿真模型模拟芯片的出光情况对提高 LED 芯片性能和开发新产品有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] Hu T T, Wu J P, Yin H J, et al. Biological effects of light-emitting diode light sources and their progress in clinical research[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 120003.  
胡甜甜, 吴金鹏, 阴慧娟, 等. 发光二极管光源的生物学效应及临床研究新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 120003.
- [2] Akpınar O, Bilgili A K, Öztürk M K, et al. On the elastic properties of INGAN/GAN LED structures [J]. Applied Physics A, 2019, 125(2): 112.
- [3] Kashima Y, Maeda N, Matsuura E, et al. High external quantum efficiency (10%) AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes achieved by using highly reflective photonic crystal on p-AlGaIn contact layer [J]. Applied Physics Express, 2018, 11(1): 012101.
- [4] Tian K K, Chu C S, Bi W G, et al. Hole injection efficiency improvement for AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diodes[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 060001.  
田康凯, 楚春双, 毕文刚, 等. AlGaIn 基深紫外发光二极管空穴注入效率的提高途径[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 060001.
- [5] Zeng Y, Fan X L, Chen J J, et al. Preparation of composite micro/nano structure on the silicon surface by reactive ion etching: enhanced anti-reflective and hydrophobic properties[J]. Superlattices and Microstructures, 2018, 117: 144-154.
- [6] Zhang C, Hu J P, Zhou R Y, et al. Design and analysis of inverse polarization grating devices for deep ultraviolet light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0301005.  
张冲, 胡敬佩, 周如意, 等. 深紫外光栅反常偏振器件的设计与分析[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0301005.
- [7] Chen X L, Li K, Kong F M, et al. Improved the light extraction efficiency of GaN vertical light-emitting diodes using 3D sphere-like arrays [J]. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47(8): 2957-2968.
- [8] Fu Y G, Ouyang M Z, Wu J S. Anti-reflective micro-nano surface technology based on "moth-eye" inspiration [J]. Flight Control & Detection, 2018, 1(2): 1-10.  
付跃刚, 欧阳名钊, 吴锦双. 基于“蛾眼”灵感的抗反射微纳结构表面技术[J]. 飞控与探测, 2018, 1(2): 1-10.
- [9] Liu S R, Wang L, Sun Y J, et al. Enhancement of light extraction efficiency of LED by bionic moth-eye structure with frustum of a cone [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0122001.  
刘顺瑞, 王丽, 孙艳军, 等. 利用截头圆锥形仿生蛾眼结构提高 LED 光提取效率[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0122001.
- [10] Fang X M, Jiang X W, Zhao J W. Influence of grating

- shape on LED light extraction efficiency [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082302.
- 方晓敏, 江孝伟, 赵建伟. 光栅形状对发光二极管光提取效率的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082302.
- [11] Li X Y, Zhu L H, Deng B, et al. Enhanced light output efficiency of GaN-based light-emitting diodes by sidewall texturing [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2015, 54(3): 384-389.
- 李晓莹, 朱丽虹, 邓彪, 等. 侧壁粗化提高 GaN 基发光二极管出光效率的研究 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2015, 54(3): 384-389.
- [12] Deng B, Liu B L. Enhancement of photon extraction efficiency of GaN-based LED by lateral surface roughening [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, 32(3): 352-355.
- 邓彪, 刘宝林. 侧面粗化提高 GaN 基 LED 出光效率研究 [J]. *半导体光电*, 2011, 32(3): 352-355.
- [13] Lee K H, Park H J, Kim S H, et al. Light-extraction efficiency control in AlGaIn-based deep-ultraviolet flip-chip light-emitting diodes: a comparison to InGaIn-based visible flip-chip light-emitting diodes [J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20340-20349.
- [14] Che Z, Zhang J, Yu X Y, et al. Optimized double-sided hemispherical pattern design on patterned sapphire substrate for flip-chip GaN-based LED [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 606-611.
- 车振, 张军, 余新宇, 等. GaN 基 LED 倒装芯片蓝宝石衬底半球型图形优化设计 [J]. *应用光学*, 2015, 36(4): 606-611.