

光栅形状对发光二极管光提取效率的影响

方晓敏^{1**}, 江孝伟^{1,2*}, 赵建伟¹¹衢州职业技术学院信息工程学院, 浙江 衢州 324000;²北京工业大学电子信息与控制工程学院光电子技术实验室, 北京 100124

摘要 为提高发光二极管(LED)的光提取效率,分析了光栅形状(矩形、等腰梯形、等腰三角形)对提取效率的影响;基于等效介质理论和严格耦合波法,优化了集成不同形状光栅的LED。利用有限时域差分法,模拟计算了三种不同最优结构LED的光提取效率。研究表明,在 $0.4\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 波长范围内,等腰三角形光栅倒装LED的光提取效率均在70%以上,最高可达77.75%,而梯形光栅倒装LED的光提取效率最低,最高仅能达到58%。

关键词 光学器件; 发光二极管; 光提取效率; 透射率; 倒装

中图分类号 TN383

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082302

Influence of Grating Shape on LED Light Extraction Efficiency

Fang Xiaomin^{1**}, Jiang Xiaowei^{1,2*}, Zhao Jianwei¹¹ College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000, China;² Laboratory of Opto-electronics Technology, College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract In order to enhance the light-emitting diode (LED) light extraction efficiency, the influences of grating shapes (rectangle, isosceles trapezoid and isosceles triangle) on the extraction efficiency are analyzed. The LED integrated with different shaped gratings is optimized based on the equivalent medium theory and the rigorous coupled-wave analysis method. The light extraction efficiencies for three LEDs with different optimal structures are simulated by the finite difference time domain method. The research results show that, when the wavelength is within the range of $0.4\sim 0.5\ \mu\text{m}$, the light extraction efficiency of a flip-chip LED with an isosceles triangle shaped grating is larger than 70%, and the maximum is up to 77.75%, while that of a flip-chip LED with a trapezoid shaped grating is the lowest and its maximum is only 58%.

Key words optical devices; light-emitting diode; light extraction efficiency; transmissivity; flip chip

OCIS codes 230.3670; 260.1960; 050.1950

1 引言

发光二极管(LED)作为替代荧光灯和白炽灯的新一代光源^[1],具有体积小、能耗低等优点^[2-3],被广泛应用于光纤系统、照明、显示、机器视觉等诸多领域^[4-7]。但是,LED的光提取效率过低,大部分光子被限制在LED器件内引起器件过热,从而降低了LED的使用寿命。

LED光提取效率低的主要原因在于出光层材

料的折射率与空气折射率相差过大。当光子由光密介质入射到光疏介质时,会发生全反射现象,且全反射的临界角非常小,故由有源区产生的光子大部分被全反射回芯片内部,最终形成积热。为了解决该问题,学者们提出了不同的方法,如光子晶体技术^[8]、光栅技术^[9]、表面粗化技术^[10]、仿生技术^[11]、倒装技术^[12]等。其中光栅技术是成本最低、制备最简单且效果较好的技术,其只需在出光表面刻蚀一层简单的光栅形状即可。

收稿日期: 2018-02-05; 修回日期: 2018-03-05; 录用日期: 2018-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(61650404)、浙江省教育厅科研项目(Y201738091)、衢州市科技计划项目(2014Y017, 2015Y018, 2017G16)、新苗人才计划校级项目(QZY17X013)

* E-mail: JosephJiangquzhi@126.com; ** E-mail: zhjfangxiaomin@163.com

不同的光栅形状对 LED 光提取效率的影响大为不同。李伟等^[13]将等腰三角形光栅与正装 LED 集成,优化器件后实现了 25% 的光提取效率。Seok 等^[2]将等腰三角形光栅与倒装 LED 集成,当中心波长为 450 nm 时,实现了 66% 的光提取效率。刘顺瑞等^[14]使用梯形光栅与正装 LED 集成,优化器件后实现的光提取效率是无光栅结构 LED 的 4.8 倍;他们使用半圆形光栅与正装 LED 集成得到的光提取效率是无光栅结构的 6 倍^[15]。然而,关于何种光栅形状提高光提取效率的效果最优的研究鲜有报道。本文利用严格耦合波法、等效介质理论和有限时域差分法,在理论上分析了等腰梯形光栅(ITAG)、等腰三角形光栅(ITIG)和矩形光栅(RG)对倒装 LED 光提取效率的影响。通过优化对比可知,ITIG 提高 LED 光提取效率的效果最为明显,光提取效率最高可达 77.75%,是无光栅结构正装 LED 的 7 倍;ITAG 提高光提取效率的效果最弱,最高仅能实现 58% 的光提取效率。

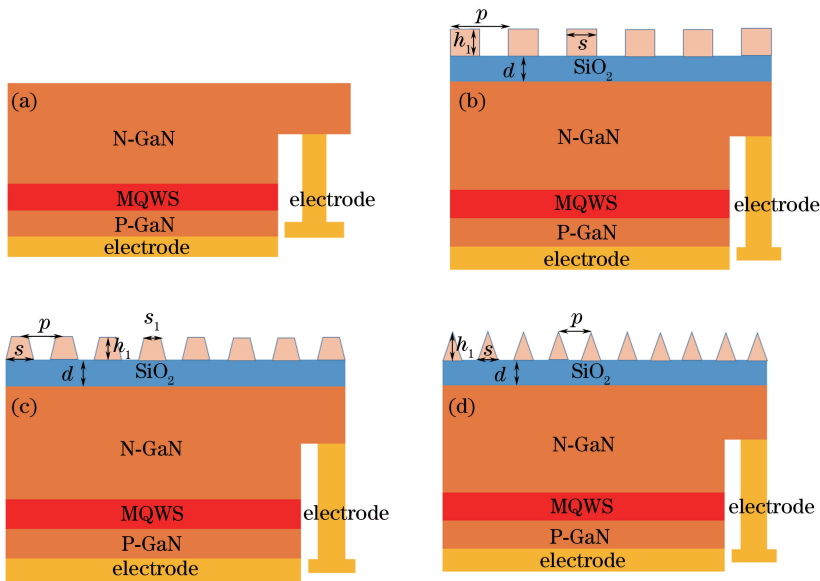


图 1 倒装 LED 器件结构模型。(a) 普通;(b) RG;(c) ITAG;(d) ITIG

Fig. 1 Device structure models of flip-chip LED. (a) Normal; (b) RG; (c) ITAG; (d) ITIG

3 器件优化

光提取效率的计算公式^[17]为

$$\eta_{\text{extra}} = \frac{P/h\nu}{P_{\text{in}}/h\nu}, \quad (1)$$

式中 P 为单位时间内由有源区产生的光子进入到自由空间的光子功率, P_{in} 为单位时间内由有源区产生的光子功率, h 为普朗克常数, ν 为光子频率。由(1)式可知,若要提高 LED 的光提取效率,需增加

2 器件结构

正装 LED 的正面电极会吸收部分出射光,降低了 LED 的发光效率。而倒装 LED 没有正面电极吸收出射光,且以加厚背面电极作为背面反射镜,LED 的光提取效率显著提高。另外,更多光子从 LED 器件中逸出,可以延长 LED 的使用寿命^[16]。

图 1(a)所示为普通倒装蓝光 LED,器件的中心波长为 470 nm,由电极层、280 nm 厚的 P 型 GaN 层(折射率 $n_{\text{P-GaN}} = 2.45$)、3 nm 厚的有源层和 3000 nm 厚的 N-GaN 层(折射率 $n_{\text{N-GaN}} = 2.42$)组成,其中 MQWS 表示多量子阱。图 1(b)~(d)所示 LED 均为在图 1(a)所示 LED 的基础上集成了不同形状光栅的 LED,光栅由金属铝刻蚀而成,其中 h_1 为光栅厚度, p 为光栅周期, s 为光栅条宽度,光栅占空比 $f = s/p$, d 为过渡层二氧化硅(折射率 $n_{\text{SiO}_2} = 1.45$)的厚度。图 1(c)所示梯形的上边宽度 s_1 是底边宽度 s 的一半,图 1(d)所示光栅为等腰三角形。

进入自由空间的光子数,故要提高 LED 出光面的光透射率。

为使集成了光栅的倒装 LED 的光提取效率最大,利用严格耦合波法优化三种不同的倒装 LED 结构,以使其光透射率达到最优。优化时,基于等效介质理论,将亚波长光栅等效成薄膜。对于 RG,可直接将其等效成一层薄膜。对于 ITAG 和 ITIC,需要先将其等分成多层 RG,再将其等效成多层薄膜,等效示意图如图 2 所示^[18]。

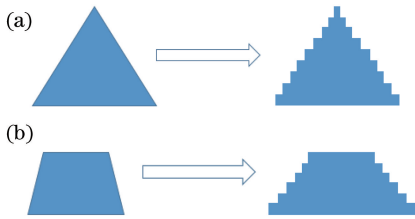


图2 等效示意图。(a) ITIG;(b) ITAG

Fig. 2 Equivalent diagrams.

(a) ITIG; (b) ITAG

将光栅等效成薄膜后,对于规则光栅 RG,只有一个薄膜层的折射率;而 ITAG 和 ITIG 有多个薄膜层等效折射率。三种光栅的等效折射率计算公式^[19]为

$$n_{TE} = [(1-f)n_{air}^2 + fn_{Al}^2]^{1/2}, \quad (2)$$

$$n_{TM} = \left(\frac{1-f}{n_{air}^2} + \frac{f}{n_{Al}^2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式中 n_{air} 和 n_{Al} 分别为空气折射率和金属铝折射率, n_{TE} 和 n_{TM} 分别为平行于光栅条方向和垂直于光栅条方向的等效折射率。

借助严格耦合波法和等效介质理论,对三种倒装 LED 结构进行优化,得到其最优的光栅参数和过渡层厚度,如图 3 所示。RG 倒装 LED 的最优结构参数是: $p = 150 \text{ nm}$, $f = 0.35$, $h_1 = 80 \text{ nm}$, $d = 190 \text{ nm}$ 。ITIG 倒装 LED 的最优结构参数是: $p = 150 \text{ nm}$, $f = 0.70$, $h_1 = 80 \text{ nm}$, $d = 190 \text{ nm}$ 。ITAG 倒装 LED 的最优结构参数是: $p = 175 \text{ nm}$, $f = 0.45$, $h_1 = 80 \text{ nm}$, $d = 190 \text{ nm}$ 。

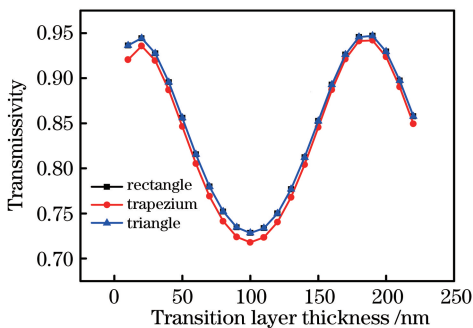


图3 过渡层厚度对透射率的影响

Fig. 3 Influence of transition layer thickness on transmissivity

在最优结构参数下,三种不同结构 LED 的透射率在波长为 470 nm 时均能达到最优。通过图 3 可以发现,在最优结构下, RG 倒装 LED 和 ITIG 倒装 LED 的透射率相同,均可达到 0.95,但 ITAG 倒装 LED 的透射率为 0.93,低于前两种 LED 结构。

4 最优 LED 光提取效率

图 4 所示为三种最优 LED 结构在 $400 \sim 500 \text{ nm}$ 波长范围内通过 RSOFT 软件模拟计算得到的光透射率变化曲线。通过图 4 可以发现,随着波长的增大,透射率增大,且 RG 倒装 LED 和 ITIG 倒装 LED 的透射率曲线完全重合。同时还发现,除了波长在 $0.4 \mu\text{m}$ 附近时透射率低于 80% 外,其他波长条件下透射率均在 80% 以上。

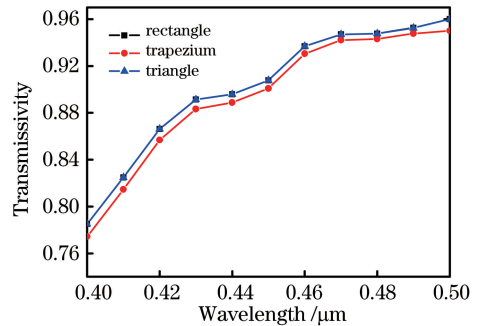


图4 优化后三种 LED 的透射率

Fig. 4 Transmissivity of three kinds of LEDs after optimization

在三种 LED 的最优结构参数下,利用有限时域差分法分别计算它们在不同波段的光提取效率,结果如图 5 所示。有限时域差分法的核心思想是把含有时间变量的 Maxwell 旋度方程转化为差分形式,从而模拟出电子脉冲和理想导体作用的时域响应。由图 5 可以发现,随着波长的增大,三种不同结构倒装 LED 的光提取效率增大;由图 4 可知,其光透率也逐渐增大。

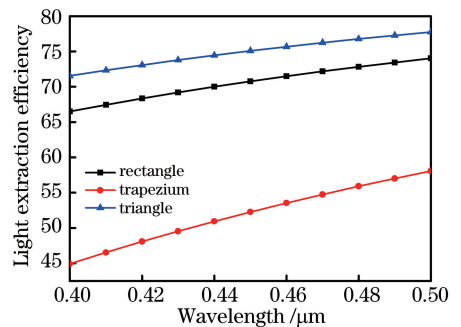


图5 不同波长下的光提取效率

Fig. 5 Light extraction efficiencies under different wavelengths

由于 ITAG 倒装 LED 的出光面透射率比另外两种低,因此其光提取效率也低于另外两种结构的 LED。从图 5 可以看出,ITAG 倒装 LED 的光提取效率在波长为 $0.5 \mu\text{m}$ 时仅为 58%。由上文分析可

知, RG 倒装 LED 与 ITIG 倒装 LED 的出光面透射率几乎相等, 但是从图 5 中发现, 在相同波段下, RG 倒装 LED 的光提取效率却低于 ITIG 倒装 LED, 这是由光栅形状所决定的。图 6 和图 7 所示分别为 RG 和 ITIG 的光提取机制示意图, 其中 a_1 为入射角, a_c 为临界入射角, Θ 为等腰三角形的顶角。由图 6、7 可知, 在 $0 \sim 90^\circ$ 入射角范围内, 无论光子以何种角度进入, 均能从 ITIG 倒装 LED 中逃逸, 但不一定能从 RG 倒装 LED 中逃逸。当光子超过临界角 a_c 进入光栅后, 最终还是回到 LED 器件内成为内损耗^[17]。因此, 当波长从 $0.4 \mu\text{m}$ 变化到 $0.5 \mu\text{m}$ 时, ITIG 倒装 LED 的光透射率最低可以达到 71.54%, 最高接近 80%, 远大于文献[2]的 66%。

这是因为这里使用的是亚波长金属光栅, 该光栅的零级衍射及表面等离子激元效应均能提高 LED 的横磁偏振透光率。但是, 对于文献[2]的

ITIG 倒装 LED, 它所使用的介质是非亚波长光栅, 光栅周期最小是 2000 nm , 远大于 450 nm 的中心波长, 由光栅衍射原理可知, 该种光栅有高级衍射, 因此其整体透光率较小。

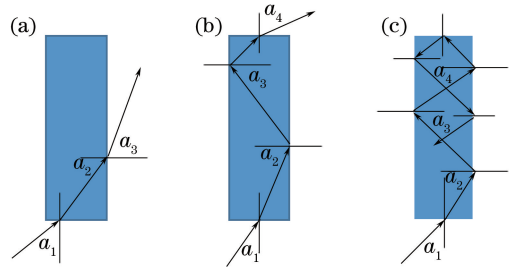


图 6 RG-LED 的光提取机制。(a) $\pi/2 - a_c < a_1 < \pi/2$;

(b) $0 < a_1 < a_c$; (c) $a_c < a_1 < \pi/2 - a_c$

Fig. 6 Light extraction mechanism of RG-LED.

(a) $\pi/2 - a_c < a_1 < \pi/2$; (b) $0 < a_1 < a_c$;

(c) $a_c < a_1 < \pi/2 - a_c$

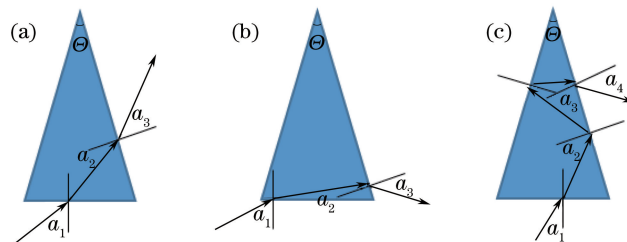


图 7 ITIG-LED 的光提取机制。(a) $\pi/2 - a_c - \Theta/2 < a_1 < \pi/2 - \Theta/2$; (b) $\pi/2 - \Theta/2 < a_1 < \pi/2$; (c) $-\Theta/2 < a_1 < \pi/2 - \Theta/2$

Fig. 7 Light extraction mechanism of ITIG-LED.

(a) $\pi/2 - a_c - \Theta/2 < a_1 < \pi/2 - \Theta/2$; (b) $\pi/2 - \Theta/2 < a_1 < \pi/2$; (c) $-\Theta/2 < a_1 < \pi/2 - \Theta/2$

5 结 论

利用严格耦合波法和等效介质理论, 对三种不同结构 LED (RG 倒装 LED、ITIG 倒装 LED 和 ITAG 倒装 LED) 进行了优化, 得到了三种不同结构 LED 的最优光栅参数和过渡层厚度。优化后的三种结构 LED 的透射率均能在波长 470 nm 时达到 90% 以上。利用有限时域差分法, 模拟计算了三种最优结构 LED 的光提取效率, ITIG 倒装 LED 的光提取效率最高可达 77.75%, 比另外两种结构高, 相比于其他文献有了显著提升。而 RG 倒装 LED 虽然与 ITIG 倒装 LED 具有相同的光透射率, 但由于其结构原因, 其光提取效率略低于 ITIG 倒装 LED, 但比 ITAG 倒装 LED 大。ITAG 倒装 LED 的光提取效率在 $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 波长范围内最高仅为 58%。

参 考 文 献

- [1] Jeon K S, Yuh H K, Choi Y H, *et al.* Comparison of the optimum number of quantum wells in GaN-based blue light-emitting diodes grown on sapphire and Si(111) substrates [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2017, 17(6): 4235-4238.
- [2] Seok M S, Yoo S J, Choe J H, *et al.* Light extraction efficiency enhancement using surface-structured light-emitting diodes with a subwavelength coating [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2016, 68(3): 462-466.
- [3] Lu L F, Ye Z C. Extraction efficiency and polarization induced by photonic crystal structure on GaN-based blue LED [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(11): 1113001.
陆李峰, 叶志成. GaN 基蓝光 LED 中光子晶体对提取效率及发光偏振态的影响 [J]. *光子学报*, 2016, 45(11): 1113001.

- [4] Chen E G, Zhou X Y, Guo T L. LED intelligent lighting system based on multi-channel real-time dynamic feedback [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 012301.
陈恩果, 周心禹, 郭太良. 基于多通道实时动态反馈的LED智能照明系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 012301.
- [5] Xiong Y, Tan J, Fang S W, *et al.* A LED-based fiber-optic sensor integrated with lab-on-valve manifold for colorimetric determination of free chlorine in water[J]. *Talanta*, 2017, 167: 103-110.
- [6] Zhang S, Zhang Y H, Yang T T, *et al.* Research on LED filament spot welding robot based on machine vision [C]. *IEEE International Conference on Information and Automation*, 2017: 1510-1514.
- [7] Hong Y, Lee B, Byun J, *et al.* Key enabling technology for stretchable LED display and electronic system [J]. *Sid Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 253-256.
- [8] Matioli E, Rangle E, Iza M, *et al.* High extraction efficiency light-emitting diodes based on embedded air-gap photonic-crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(3): 031108.
- [9] Yeh W L, Fang C M, Chiou Y P. Enhancing LED light extraction by optimizing cavity and waveguide modes in grating structures[J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(5): 359-364.
- [10] Huang H W, Kao C C, Chu J T, *et al.* Improvement of InGaN-GaN light-emitting diode performance with a nano-roughened p-GaN surface [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(5): 983-985.
- [11] Song Y M, Park G C, Jang S J, *et al.* Multifunctional light escaping architecture inspired by compound eye surface structures: From understanding to experimental demonstration [J]. *Optics Express*, 2011, 19(S2): A157.
- [12] Wierer J J, Steigerwald D A, Krames M R, *et al.* High-power AlGaInN flip-chip light-emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(22): 3379-3381.
- [13] Li W, Yue Q Y, Kong F M, *et al.* Influence of surface ZnO nano-structures on the light emitting efficiency of GaN-based LED [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(4): 409-416.
李伟, 岳庆扬, 孔繁敏, 等. 顶端 ZnO 纳米结构对 GaN 基 LED 光提取效率的影响 [J]. *光子学报*, 2013, 42(4): 409-416.
- [14] Liu S R, Wang L, Sun Y J, *et al.* Enhancement of light extraction efficiency for 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.
- [15] Liu S R, Wang L, Zhang M L, *et al.* Study of light extraction efficiency for LED with square aperture nano-hemisphere array [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(12): 1668-1674.
刘顺瑞, 王丽, 张明磊, 等. 正方形孔径纳米半球阵列提高 LED 光提取效率研究 [J]. *发光学报*, 2017, 38(12): 1668-1674.
- [16] Liu H. Study on enhancing the light extraction efficiency of GaN-based light emitting diodes by photonic crystal and one-dimensional grating structure [D]. *Wuhan: Huazhong University of Science and Technology*, 2014.
刘会. 利用光子晶体与一维光栅结构提高 GaN 基 LED 光取出效率的研究 [D]. *武汉: 华中科技大学*, 2014.
- [17] Yin Z M. Improving light extraction efficiency of GaN-based LEDs by oxide micro&nano structures [D]. *Jinan: Shandong University*, 2014.
尹正茂. 氧化物微纳米结构提高 GaN 基 LED 光提取效率的研究 [D]. *济南: 山东大学*, 2014.
- [18] Liu Y. Study of diffraction characteristics of triangular surface-relief subwavelength grating [D]. *Chengdu: Sichuan University*, 2004.
刘洋. 三角形面形亚波长光栅的衍射特性研究 [D]. *成都: 四川大学*, 2014.
- [19] Jiang X W, Guan B L, Liu X, *et al.* The influence of sub-wavelength grating on wavelength tuning range in VCSEL [C]. *IEEE International Conference on Optoelectronics and Microelectronics*, 2016: 43-46.