

高光提取效率倒装发光二极管的设计与优化

江孝伟^{1,2*}, 赵建伟¹, 武华^{2,3}

¹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;

³赣南师范大学物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000

摘要 为了提高倒装发光二极管(LED)的光提取效率, 提出在蓝宝石衬底出光面上制备一层 SiO₂ 介质光栅, 形成表面光栅倒装 LED 结构。利用 RSOFT 软件的 CAD 模块建立表面光栅倒装 LED 模型, 随后使用 RSOFT 软件的 LED 模块模拟并优化该表面光栅倒装 LED。通过模拟优化和理论分析可得, 当 p-GaN 层厚度 $h_p = 220$ nm, n-GaN 层厚度 $h_n = 100$ nm, 蓝宝石衬底厚度 $h_s = 130$ nm, 光栅周期 $p = 260$ nm, 光栅厚度 $h_g = 20$ nm, 光栅占空比 $f = 0.02$ 时, 表面光栅倒装 LED 的光提取效率可以达到 49.12%, 相比于普通最优倒装 LED 的光提取效率 (30.56%) 提高了 63%。本研究可为后续设计高光提取效率的 LED 提供参考, 同时亦可为制备器件提供理论指导。

关键词 光学器件; 发光二极管; 光提取效率; 倒装; 光栅

中图分类号 TN312

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.092302

Design and Optimization of Flip-Chip Light-Emitting Diode with High Light Extraction Efficiency

Jiang Xiaowei^{1,2*}, Zhao Jianwei¹, Wu Hua^{2,3}

¹ 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;

³ College of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

Abstract In order to improve the light extraction efficiency of flip-chip light-emitting diode (LED), we propose to prepare a SiO₂ dielectric grating on the sapphire substrate surface and form a surface grating flip-chip LED structure. The surface grating flip-chip LED model is established by the CAD module of RSOFT software. Then, the LED module of RSOFT software is used to simulate and optimize the surface grating flip-chip LED. Simulation optimization and theoretical analysis show that, when p-GaN layer thickness $h_p = 220$ nm, n-GaN layer thickness $h_n = 100$ nm, sapphire substrate thickness $h_s = 130$ nm, grating period $p = 260$ nm, grating thickness $h_g = 20$ nm, grating duty cycle $f = 0.02$, the light extraction efficiency of the surface grating flip-chip LED can reach to 49.12%, compared to the best normal flip-chip LED light extraction efficiency (30.56%), the efficiency raises by 63%. The research can provide theoretical research methods for the future design of LED with high light extraction efficiency, and provide theoretical guidance for the preparation of devices.

Key words optical devices; light-emitting diode (LED); light extraction efficiency; flip-chip; grating

OCIS codes 230.3670; 050.6624; 240.6680

收稿日期: 2018-03-23; 修回日期: 2018-04-09; 录用日期: 2018-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61650404)、浙江省教育厅一般科研项目(Y201738091)、衢州市科技计划(2014Y017, 2017G16)、赣南师范大学招标课题(16zb04)

* E-mail: JosephJiangquzhi@126.com

1 引言

发光二极管(LED)因具有阈值小、寿命长、体积小等特点而受到广泛关注^[1],被应用于各个领域,如交通信号灯^[2]、液晶显示^[3]、光互连^[4]、磁光存储^[5]、可见光通信^[6]等。但是,人们在使用过程中发现,LED仍然存在一些影响其应用的问题,其中最主要的就是光提取效率低^[7]的问题。导致LED光提取效率低的主要原因是LED中GaN材料和周围空气的折射率相差过大,当光线由GaN(光密介质材料)入射到空气时会发生全反射^[8],根据理论计算可知该全反射的临界角仅为 23.6° ,这使得大部分的光子被困在LED内,被困的能量就成为内损耗,从而降低了LED的使用寿命。为了提高GaN层与空气全反射的临界角,很多研究人员提出了不同的方法,如:表面粗化技术^[9]、LED倒装技术^[10]、光子晶体技术^[11]、仿生技术(制作蛾眼形结构)^[12]、亚波长光栅技术^[13]等。

LED倒装技术是将蓝宝石衬底改为出光面,这就避免了P-GaN层上电极层对光子的吸收,并且该电极层由于不再是出光面,因此可以将该电极层加厚、加粗作为反射镜使用,以此来提高LED的光提取效率^[14]。另外,由于蓝宝石衬底的导热性能比较差,而LED倒装技术将其作为出光面,就会导致LED内部产生的热量由背面电极向导热系数高的硅直接传导,从而极大地改善LED芯片的散热问题。但是,由于蓝宝石衬底的折射率为1.77,当光由蓝宝石衬底入射到空气层时,其临界角(约 34°)虽然相比于正装的LED有所提高,但还是比较低,不能大幅提高LED的光提取效率。鉴于此,本文提出

在倒装LED的蓝宝石衬底上制备一层 SiO_2 亚波长光栅,通过优化设计可以使LED内部更多的导模与光栅耦合,从而使这些导模变成辐射模进入空气中,这样就避免了倒装LED产生的光子在蓝宝石和空气层界面的全反射,从而可以显著提高光提取效率。根据本文的计算结果,优化后的表面亚波长光栅倒装LED的光提取效率相比于普通优化后的倒装LED提高了63%。

本文的组织框架如下:首先提出普通倒装LED和表面光栅倒装LED的结构,然后对比两种结构的光提取效率,将具有高光提取效率的表面光栅倒装LED进行优化,最后对文章进行总结。经过模拟计算可知,优化后的表面光栅倒装LED的光提取效率接近50%,相比于普通倒装LED有了大幅提高,这可为以后制作高光提取效率LED提供理论指导,并可为将来进一步设计高光提取效率的LED提供参考。

2 器件结构

本课题组设计的倒装蓝光LED的中心波长为450 nm,结构从上到下分别为蓝宝石衬底($n_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1.77$)、n掺杂的GaN层($n_{\text{n-GaN}} = 2.5$)、量子阱有源区(InGaN/GaN)、p掺杂的GaN层($n_{\text{p-GaN}} = 2.5$)、电极(Ag)、硅、热沉,如图1(a)所示。在图中, h_s 、 h_p 、 h_n 分别为蓝宝石衬底、p掺杂GaN层、n掺杂GaN层的厚度。图1(b)是表面光栅倒装LED结构,它是在图1(a)倒装LED蓝宝石表面上刻蚀一层 SiO_2 光栅, h_g 为光栅厚度, s 为光栅条宽, p 为光栅周期,光栅占空比 $f = s/p$ 。

根据图1(a)和图1(b)所示的结构,首先利用RSOFT软件的CAD模块建立两种结构的LED模

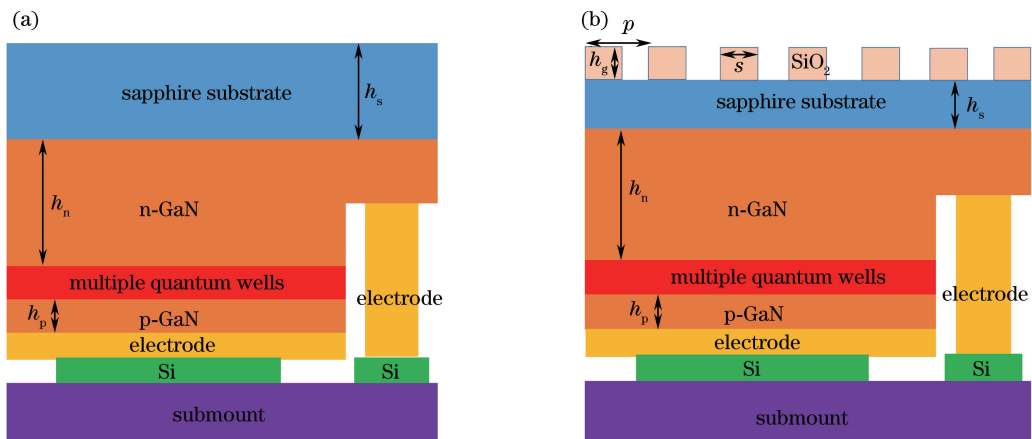


图1 (a)倒装LED和(b)表面光栅倒装LED的结构

Fig. 1 Structures of (a) flip-chip LED and (b) surface grating flip-chip LED

型,使用一个发光中心波长为 450 nm 的偶极子源来模拟有源区的电子与空穴的复合发光;然后采用完全匹配层(PML)包围在仿真区域的左、右、上三个区域,以避免仿真边界上的非物理反射,而在仿真区域的下部使用理想导体(PEC)来代表 LED 底面金属电极反射镜对光波的反射;最后选择 RSOFT 软件的 LED 模块对两种结构进行模拟计算并优化。

3 器件结构的优化

3.1 p-GaN 层厚度对倒装和表面光栅倒装 LED 光提取效率的影响

当 p-GaN 层厚度 h_p 在 50~300 nm 之间以 10 nm 为间隔均匀变化时,倒装 LED 和表面光栅倒装 LED 光提取效率均呈周期性变化,如图 2 所示。从图 2 可以看出:当 h_p 为 130 nm 和 220 nm 时,倒装 LED 和表面光栅 LED 的光提取效率均达到最大;当 h_p 为 90,180,270 nm 时,两种 LED 结构光提取效率达到波谷,不到 1%。之所以会出现这种周期性振荡,是因为处于底层的金属电极反射镜和 LED 形成了一个 Fabry-Perot 干涉腔(F-P 腔^[15])。F-P 腔的振荡条件如(1)式所示:

$$|\mathbf{k}_\perp| \cdot (h_s + h_p + h_n) + \varphi_{\text{air}}(\theta_m) + \varphi_{\text{Ag}}(\theta_m) = 2\pi m, \quad (1)$$

式中: \mathbf{k}_\perp 为垂直方向传播的波矢; $\varphi_{\text{air}}(\theta_m)$ 为光在蓝宝石衬底与空气界面的反射相位,p-GaN 层与电极 Ag 界面的反射相位均是影响 F-P 腔长的因素; $\varphi_{\text{Ag}}(\theta_m)$ 为光在 GaN 层与金属界面处的反射相位; m 为模式数($m=0,1,2,\dots$)。所以 h_p 变化势必会影响 F-P 腔的腔长,从而影响 F-P 腔内的干涉。当 h_p 恰好使 LED 的光锥内发生相长干涉,光锥外发

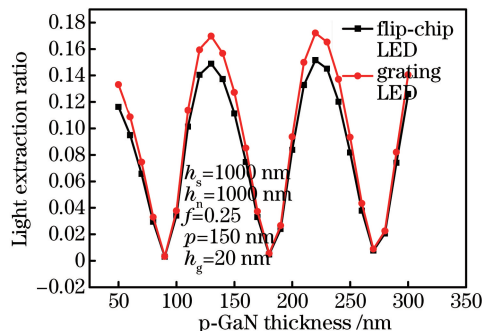


图 2 p-GaN 层厚度对倒装和表面光栅倒装 LED 光提取效率的影响

Fig. 2 Influence of p-GaN thickness on light extraction efficiency of flip-chip LED and surface grating flip-chip LED

但是从图 2 中可以明显发现,表面光栅倒装 LED 的光提取效率明显要高于一般的倒装 LED,这是因为首先根据等效介质理论,表面光栅可以等效为一层低折射率的介质层(折射率小于 1.45),它可以当作蓝宝石和空气折射率的缓冲层,从而使更多的光子从 LED 内逸出。其次,因为光栅本身具有衍射特性,当光栅占空比 $f=0.25$,周期 $p=150$ nm,厚度 $h_g=20$ nm 时,波长为 450 nm 的光通过此光栅的透射率要高于仅仅通过蓝宝石平板层的透射率。虽然表面光栅倒装 LED 光提取效率相比于倒装 LED 有所提高,但与实际需求相比还是太低。由图 2 可以得到,表面光栅倒装 LED 光提取效率最高为 17.2%,因此有必要对该结构的 LED 进行优化,以提高表面光栅倒装 LED 的光提取效率。

3.2 n-GaN 层厚度对表面光栅倒装 LED 光提取效率的影响

为了研究 n-GaN 层厚度 h_n 对表面光栅倒装 LED 光提取效率的影响,将 h_p 和 h_s 分别固定为 220 nm 和 1000 nm,光栅参数仍然保持 $f=0.25$, $p=150$ nm, $h_g=20$ nm。当 h_n 在 10~700 nm 之间以 10 nm 为间隔均匀变化时,表面光栅倒装 LED 光提取效率出现周期性振荡,但是振荡峰却随着 h_n 的增加而减小,光提取效率从 $h_n=100$ nm 时的 31.64% 下降到 $h_n=630$ nm 时的 24.96%。

光提取效率之所以随着 h_n 的变化而出现周期性振荡,是因为蓝宝石层、n-GaN 层、有源区、p-GaN 层、背面反射电极形成了 F-P 腔,当 h_n 变化时,F-P 腔的腔长就会发生改变,腔内的驻波就会从相长干涉向相消干涉转变,或者从相消干涉向相长干涉转变,这就会导致表面光栅倒装 LED 的光提取效率此消彼长,出现如图 3 所示的振荡现象。但是随着 h_n 的增加,表面光栅倒装 LED 光提取效率的振荡峰幅

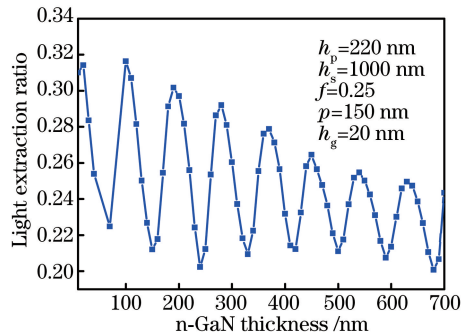


图 3 n-GaN 层厚度对表面光栅倒装 LED 光提取效率的影响

Fig. 3 Influence of n-GaN thickness on light extraction efficiency of surface grating flip-chip LED

值逐渐减小。这是因为,当 h_n 较小时,亚波长光栅与 LED 内导模的耦合强度较大,能够将更多的导模转变为辐射模而辐射到空气中,从而提高表面光栅的光提取效率。但并不是 h_n 越小,光栅与导模的耦合就越强,而是存在一个最佳的 h_n 值。在所提结构中,只有 h_n 为 100 nm 时,光栅与 LED 内导模的耦合强度最大^[16]。

3.3 蓝宝石衬底厚度对表面光栅倒装 LED 光提取效率的影响

为了探究蓝宝石衬底厚度 h_s 对表面光栅倒装 LED 光提取效率的影响,将 h_p 、 h_n 分别设定为 220 nm 和 100 nm,同时光栅参数仍然为 $f=0.25$ 、 $p=150$ nm, $h_g=20$ nm。由图 4 可知,当 h_s 在 10~550 nm 之间以 10 nm 为间隔均匀变化时,表面光栅倒装 LED 光提取效率出现周期性振荡,但振荡峰的幅值却随着 h_s 的增加而减小,光提取效率从 $h_s=130$ nm 时的 43.54% 下降到 $h_s=510$ nm 时的 37.93%。 h_s 对表面光栅倒装 LED 光提取效率的影响与 n-GaN 层厚度 h_n 对表面光栅光提取效率的影响是类似的,都是因为 h_s 对 F-P 腔驻波、光栅与导模的耦合强度有影响。

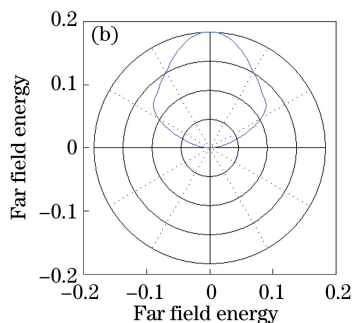
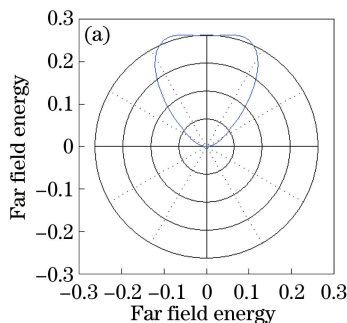


图 5 h_s 为 130 nm 和 200 nm 时 LED 的远场能量分布。(a) $h_s=130$ nm; (b) $h_s=200$ nm

Fig. 5 Far field energy distributions of LED when h_s is 130 nm and 200 nm. (a) $h_s=130$ nm; (b) $h_s=200$ nm

3.4 光栅参数对表面光栅倒装 LED 光提取效率的影响

正如前面所述,在倒装 LED 表面集成光栅之所以能提高光提取效率,是因为光栅能够将 LED 内的导模耦合成辐射模,但并不是在所有条件下光栅都能够将导模转换成辐射模,而是要使光子在光栅中传播的波矢 \mathbf{K}_b 满足 $\mathbf{K}_b < \mathbf{K}_0$ (\mathbf{K}_0 为光在空气中传播的波矢)。 \mathbf{K}_b 的表达式为

$$\mathbf{K}_b = \mathbf{K}_{\parallel,c} + \mathbf{G}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{K}_{\parallel,c}$ 为 LED 中传播波矢的水平分量; \mathbf{G} 为倒格矢,耦合光栅中的谐波; c 为整数。因此,有必要对表面光栅进行优化,使在光栅中传播的光子的波矢满足 $\mathbf{K}_b < \mathbf{K}_0$ 的关系。将 h_p 、 h_n 、 h_s 分别固定为

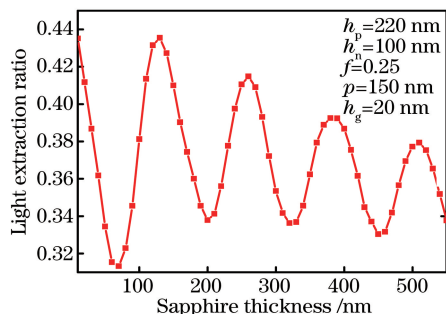


图 4 蓝宝石衬底厚度对表面光栅倒装 LED 光提取效率的影响

Fig. 4 Influence of sapphire substrate thickness on light extraction efficiency of surface grating flip-chip LED

图 5(a) 是当 h_s 为 130 nm 时表面光栅倒装 LED 的远场能量分布图,图 5(b) 是当 h_s 为 200 nm 时表面光栅的远场分布图。将两幅远场能量分布图进行对比可以发现:当 h_s 为 130 nm 时,由于光栅与 LED 中导模的耦合作用强,所以更多的导模被引导到 LED 的光提取角中,使得更多的能量被提取出来,因此其相较于 h_s 为 200 nm 的表面光栅 LED 会有更高的光提取效率和远场能量。

220, 100, 130 nm, 当光栅占空比 $f=0.25$, 周期 $p=0.15$ 时,表面光栅倒装 LED 光提取效率随着光栅厚度 h_g 的增加而下降,如图 6(a) 所示,在 h_g 为 20 nm 时,光提取效率可以达到 43.54%,而在 h_g 增加到 500 nm 时,光提取效率仅为 37%,但仍然比普通倒装 LED 的光提取效率高。因为从图 6(a) 中可以看到,当 h_g 为 0 nm 时,光提取效率仅为 30.56%,从而可以说明即使将普通倒装 LED 进行参数优化,其光提取效率也很难达到集成有表面光栅倒装 LED 的光提取效率。

图 6(b) 是当光栅厚度 h_g 固定为 20 nm 时,表面光栅倒装 LED 光提取效率随光栅周期 p 的变化趋势。光栅周期在 100~450 nm 之间以 10 nm 为

间隔均匀变化,表面光栅倒装 LED 光提取效率出现了振荡,通过图 6(b)的变化趋势可以判断,光栅周期过小或过大都不利于表面光栅倒装 LED 光提取效率的提高。在本课题组设计的倒装 LED 结构中,唯有当光栅周期为 260 nm 时,最有利于光栅与 LED 的导模耦合,也最有利于光子的出射。因为在该周期下,表面光栅倒装 LED 的光提取效率最高,可以达到 47.53%。

由文献[17]可知,光栅的占空比决定着光栅与

LED 内模式耦合的强弱,并且存在一个较优的占空比,在该占空比下,光栅能够与 LED 更多的模式耦合,将它们转化为更多的辐射模,从而使 LED 光提取效率最大。图 6(c)是将光栅周期固定为 260 nm 时,表面光栅倒装 LED 光提取效率随占空比的变化趋势。可以看出,随着占空比增大,光提取效率先增加后下降。在本课题组设计的表面光栅倒装 LED 的结构中,最优占空比为 0.02,此时光提取效率为 49.12%,接近 50%。

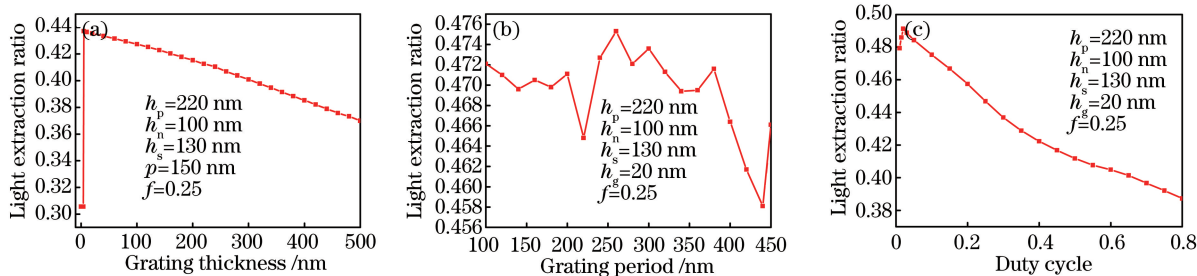


图 6 光栅参数对表面光栅光提取效率的影响。(a)光栅厚度;(b)光栅周期;(c)光栅占空比

Fig. 6 Impacts of grating parameters on light extraction efficiency of surface grating. (a) Grating thickness; (b) grating period; (c) grating duty cycle

4 结 论

利用 RSOFT 软件设计并优化了表面光栅倒装 LED,并最终得到了最优的表面光栅倒装 LED 结构。 p -Ga N 层会影响表面光栅倒装 LED 的光提取效率,主要是因为该层厚度的变化会影响 LED 内部形成的谐振腔的驻波。 n -Ga N 层和蓝宝石层对表面光栅倒装 LED 光提取效率的影响机理是相同的,都是因为它们的厚度会影响表面光栅与 LED 内部导模的耦合强度以及 LED 内部谐振腔的驻波。表面光栅参数会影响 LED 的光提取效率主要是因为它们会极大地影响光栅与 LED 内部所有模式耦合的强度,并且光栅参数都存在一个最优值,能够保证光栅与 LED 内部模式的耦合强度最大。最终通过模拟优化可以得到:当 $h_p = 220$ nm, $h_n = 100$ nm, $h_s = 130$ nm, $h_g = 20$ nm, $f = 0.02$, $p = 260$ nm 时,表面光栅倒装 LED 的光提取 LED 可以达到 49.12%,比最优的普通倒装 LED 的光提取效率高 63%。

参 考 文 献

[1] Seok M S, Yoo S, 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.

- [2] Wada M, Yendo T, Fujii T, *et al.* Road-to-vehicle communication using LED traffic light [C] // Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2005: 8643014.
- [3] Feng Q, Li Q, Wang Y, *et al.* The design and optimization of lens array for LED backlight in LCD imaging engine of helmet-mounted display [J]. Journal of the Society for Information Display, 2017, 25(5): 312-319.
- [4] Nguyen M H, Nguyen H B, Nguyen T H, *et al.* SU-8 lenses: simple methods of fabrication and application in optical interconnection between fiber/LED and microstructures [J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45(5): 2529-2535.
- [5] Kovalev V I, Rukovichnikov A I, Rossukanyi N M, *et al.* LED magneto-optical ellipsometer with the switching of orthogonal polarization states [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2016, 59(5): 707-711.
- [6] Zhang Y F, Zhang H M, Wang P, *et al.* Long-distance wireless optical communication using LED source [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050602.

张宇飞, 张洪明, 王鹏, 等. 应用 LED 光源的远距离可见光通信 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050602.

- [7] Ghosh R, Haldar A, Ghosh K K, *et al.* Further enhancement of light extraction efficiency from light emitting diode using triangular surface grating and thin interface layer [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): 919-926.
- [8] Babiker S G, Sid-Ahmed M O, Yong S, *et al.* Polarized GaN-based light-emitting diode with a silver sub wavelength grating and dielectric layer [J]. *Thin Solid Films*, 2011, 520: 419-423.
- [9] Hu X L, Zhang J, Wang H, *et al.* High-luminous efficacy white light-emitting diodes with thin-film flip-chip technology and surface roughening scheme [J]. *Journal of Physics D*, 2016, 49(44): 445102.
- [10] 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.
- [11] Wiesmann C, Linder N, Schwarz U T. Analysis of the emission characteristics of photonic crystal LEDs [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6989: 69890L.
- [12] Hong E J, Byeon K J, Park H, *et al.* Fabrication of moth-eye structure on p-GaN layer of GaN-based LEDs for improvement of light extraction [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2009, 163(3): 170-173.
- [13] Zhang G J, Wang C, Cao B, *et al.* Polarized GaN-based LED with an integrated multi-layer subwavelength structure [J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 7019-7030.
- [14] Liu H. Study on enhancing the light extraction efficiency of GaN based light-emitting diodes by photonics crystal and one-dimensional grating structure [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014: 57-104.
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: 57-104.
- [15] 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.
- [16] Chen X L. Study of enhancing light emitting efficiency of blue LED by micro- or nano- structures [D]. Jinan: Shandong University, 2013: 62-65.
陈新莲. 微纳米结构增强蓝光 LED 发光效率的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013: 62-65.
- [17] Bergenek K, Wiesmann C, Zull H, *et al.* Strong high order diffraction of guided modes in micro-cavity light-emitting diodes with hexagonal photonic crystals [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(12): 1517-1523.