

文章编号: 1001-3806(2019)02-0184-05

GaN 基蓝光 LED 单偏振输出及高光提取效率的实现

江达飞¹, 江孝伟^{1,2*}, 张丽娜¹

(1. 衢州职业技术学院 信息工程学院, 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: 为了提高倒装发光二极管(LED)光提取效率的同时实现单偏振光输出,建立了正装、倒装和集成金属亚波长光栅倒装LED 3种模型,采用RSOFT软件进行仿真对比及器件优化,并进行了理论分析和模拟验证。结果表明,倒装LED虽然可以提高光提取效率但对P-GaN层厚非常敏感,无法单偏振光输出;集成了金属亚波长光栅的倒装LED可以不受P-GaN层厚影响,实现单偏振光输出,但要输出稳定偏振光,受光栅参量和介质过渡层厚度影响非常显著;优化后的结构可以实现57.63%的光提取效率,偏振消光比达到25.8dB。该研究对制造高性能蓝光LED具有一定的指导作用。

关键词: 衍射与光栅;光提取效率;RSOFT软件;发光二极管;消光比;单偏振

中图分类号: TN312+.8 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.02.007

Realization of single polarization output and high light extraction efficiency of GaN based blue LED

JIANG Dafei¹, JIANG Xiaowei^{1,2}, ZHANG Lina¹

(1. College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou 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 improve light extraction efficiency of a flip-chip light-emitting diode (LED) and realize single polarization light output, three models of normal, flip-chip and integrated metal sub-wavelength grating flip-chip LED were established. RSOFT software was used to simulate and optimize the device, and theoretical analysis and simulation verification were carried out. The results show that, flip-chip LED can improve the light extraction efficiency, but it is very sensitive to the thickness of P-GaN layer and can not output single polarized light. Flip-chip LED integrated with metal sub-wavelength grating can achieve single polarized light output without the influence of P-GaN layer thickness; this kind of LED can output stable polarized light, but it is heavily affected by grating parameters and thickness of transition layer. The thickness of transition layer and parameters are very significant. By optimizing the structure, the extraction efficiency can reach 57.63% and the polarization extinction ratio can reach 25.8dB. The research has some guidance for manufacturing blue ray LED with high performance.

Key words: diffraction and gratings; light extraction efficiency; RSOFT software; light-emitting diode; extinction ratio; single polarization

引言

发光二极管(light-emitting diode, LED)作为替代白炽灯的下一代光源,由于具有阈值小、寿命长、体积

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61650404);浙江省教育厅一般科研资助项目(Y201738091);衢州市科技计划资助项目(2017G16);新苗人才计划校级资助项目(QZY17X013)

作者简介:江达飞(1986-),男,讲师,硕士研究生,主要研究方向为半导体光电子器件。

* 通讯联系人。E-mail: JosephJiangquzhi@126.com

收稿日期:2018-04-04;收到修改稿日期:2018-04-13

小等特点而被广泛的关注^[1],在实际生活中也被应用在各个领域,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。但是在人们的使用过程中发现,LED仍然存在一些影响其应用的问题,其中就有光提取效率低^[7]和无法单偏振光输出。导致LED光提取效率低的主要原因是LED材料和周围空气交界处的全反射^[8],而无法实现单偏振光输出是因为LED本身没有很强的各向异性。

为了提高LED光提取效率,采用了诸如表面粗化技术^[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。表

面粗化技术虽然可以提高光提取效率,但是该技术容易增加 GaN 层出光面的缺陷,甚至会破坏有源区降低 LED 的内量子效率;LED 倒装技术自 2001 年被提出后已经商业化,但是倒装 LED 的光提取效率对 P-GaN 层厚度非常敏感,P-GaN 层厚度微弱的变化都会导致 LED 光提取效率大幅度的降低或升高;在 LED 出光面制作类蛾眼结构已经被证实对提高 LED 光提取效率确实有很多帮助,但是该技术对工艺要求非常高,不利于产业化;光子晶体技术和亚波长技术分别是用光子禁带效应和光栅衍射效应或表面等离子体激元来提高 LED 的光提取效率,但是相对于亚波长光栅技术,光子晶体技术所需成本要高,因此基于生产成本考虑,在提高 LED 的光提取效率上,使用亚波长光栅技术相对而言是一种更为有效、合理的技术。

实现 LED 单偏振光输出不仅能够降低液晶显示成本,而且还能够缩小液晶显示屏体积,在光互联上也能够提高其数据传输效率。但是由于 LED 本身各向异性很弱,几乎不能实现单偏振光输出,因此需要相关技术帮助 LED 增强其各向异性。现今已被证实可以增强 LED 各向异性的技术有:向有源区掺杂 Mn 元素^[14]、在衬底的非极性或半极性面上制作 LED 器件^[15]、利用光子晶体或亚波长光栅引入各向异性^[16-17]。第 1 种存在的问题是要获得高质量单晶材料非常困难,因为 Mn 和 GaN 材料在配位上会不匹配;第 2 种技术虽然能获得单偏振光但是光提取效率会非常的低;第 3 种技术目前是被大多数学者最为接受的方法。

虽然有很多学者已经就提高 LED 光提取效率和实现单偏振光输出有了很多的研究,但几乎都是就单独一项的研究,在实现单偏振光输出时没有考虑光提取效率,反之亦然。但在 LED 实际应用中除了需要有单偏振光输出的同时还需要高的光提取效率,为此本文中基于亚波长光栅技术将 Al 金属亚波长光栅,二氧化硅 (SiO_2) 介质过渡层与倒装 LED 相集成,设计出既有高光提取效率还能单偏振光输出的 LED。本文中首先比较了倒装 LED 和普通 LED 的光提取效率随 P-GaN 层厚度的关系;随后选取有高提取效率的 P-GaN 层厚度分析光栅参量对倒装 LED 的横电波偏振透射率 (transverse electro transmission, TET) 和横磁波偏振透射率 (transverse magnetic transmission, TMT) 的影响,并选取既能实现高光提取效率又有高消光比 (extinction ratio, ER) 的光栅参量;最后分析过渡层厚度对消光比和光提取效率的影响,从而选择出最优过渡层厚

度。最终设计出高光提取效率单偏振光输出的 LED。

1 器件结构

本文中设计的正装蓝光 LED 中心波长是 470nm,结构主要由蓝宝石衬底、N 掺杂的 GaN 层 (折射率 $n_{\text{N-GaN}} = 2.42$, 厚度 $h_{\text{N-GaN}} = 3000\text{nm}$)、量子阱有源区 (InGaN/GaN)、P 掺杂的 GaN 层 ($n_{\text{P-GaN}} = 2.45$) 和电极构成,如图 1a 所示。LED 的倒装结构是正装结构的倒立,如图 1b 所示。但是图 1b 中并没有蓝宝石衬底,这是因为蓝宝石衬底一般有数十微米,其主要作用仅是为了生长 GaN 层做依托,对光提取效率的影响非常微弱,因此为了增加模拟计算速度和减小 LED 体积故将蓝宝石衬底层去掉 (但是在实际器件中还是存在蓝宝石衬底)^[18]。在倒装 LED 的结构上集成 SiO_2 介质过渡层和 Al 金属亚波长光栅后,通过参量设计可以实现单偏振和高的光提取效率,如图 1c 所示, h 是光栅

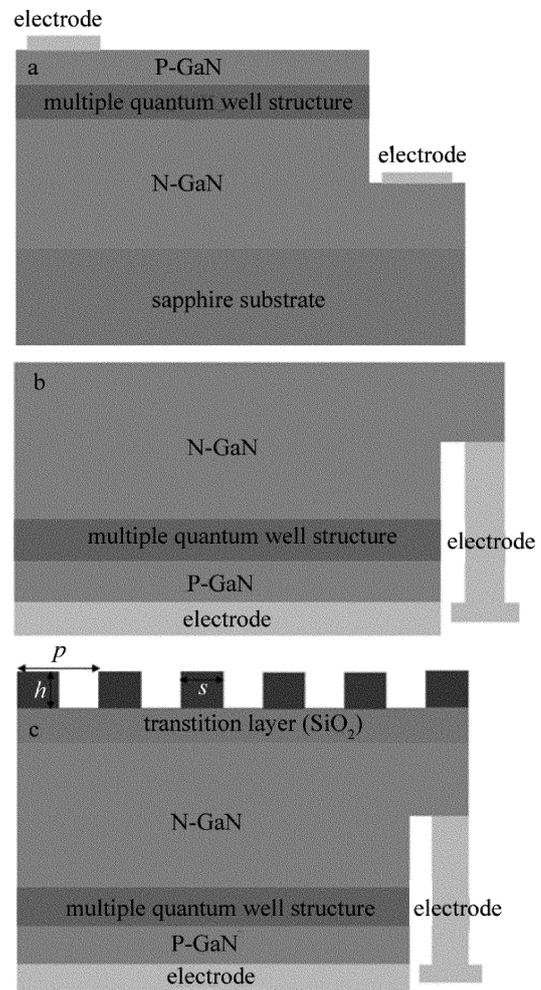


Fig. 1 The structure

a—normal LED b—flip-chip LED c—integrate grating flip-chip LED

厚度, s 是光栅条宽, p 是光栅周期, 光栅占空比 $f = s/p$, SiO_2 介质过渡层厚度为 h_{SiO_2} 。

2 器件结构的优化

2.1 P-GaN 层厚度对倒装和正装 LED 光提取效率的影响

正装 LED 光提取效率对 P-GaN 层厚度的变化不敏感, 光提取效率几乎恒定不变, 但是倒装 LED 光提取效率对 P-GaN 层厚度却非常敏感, P-GaN 层厚度稍微变化就会引起倒装 LED 光提取效率大幅的变化, 如图 2 所示。从图中可以得到正装 LED 光提取效率在 P-GaN 层厚度从 0nm 增加到 500nm 过程中几乎恒定在 11.59%。但是倒装 LED 光提取效率却以正弦波的形式一直在变化, 当 P-GaN 层厚度在 80nm, 180nm, 280nm, 380nm, 480nm 时其光提取效率达到最高的 32.9%, 这相对于正装 LED 确实有显著的提高, 但是当 P-GaN 层厚度在 40nm, 140nm, 240nm, 340nm, 440nm 时其光提取效率达到最低的 10.5%。所以在一些文献中提到利用倒装技术提高 LED 的光提取效率虽然可行, 但是一定要精确控制 P-GaN 层厚度。由于倒装 LED 没有很强的各向异性, TE 和 TM 偏振光透射率均是 0.821, 根据消光比计算公式可得倒装 LED 的消光比为 0dB, 无法实现单偏振光输出。

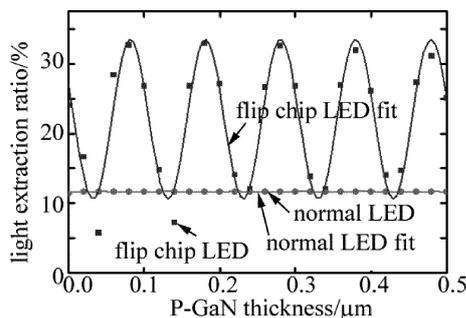


Fig. 2 The influence of P-GaN thickness on light extraction ratio of normal and flip-chip LED

2.2 光栅参量对倒装 LED 偏振光透射率和消光比的影响

倒装 LED 通过选择合适的 P-GaN 层厚度可以提高光提取效率, 但是其无法实现单偏振光的输出, 为了同时实现倒装 LED 单偏振光输出, 作者在倒装 LED 上集成了 SiO_2 介质过渡层和 Al 金属亚波长光栅, 如图 1c 所示。当 P-GaN 层厚度 $h_{\text{P-GaN}} = 280\text{nm}$ 、介质过渡层厚度 $h_t = 100\text{nm}$ 、光栅厚度 $h_g = 90\text{nm}$ 时, 在光栅占空比从 0 变化到 1, 光栅周期 p 从 100nm 变化到 470nm 的范围内, TM(垂直于光栅条方向)偏振透射率

要明显大于 TE(平行于光栅条方向)偏振的透射率, 而且无论是哪种偏振光, 均是在低占空比时才有高透射率, 最高透射率接近于 1, 如图 3a 和图 3b 所示。

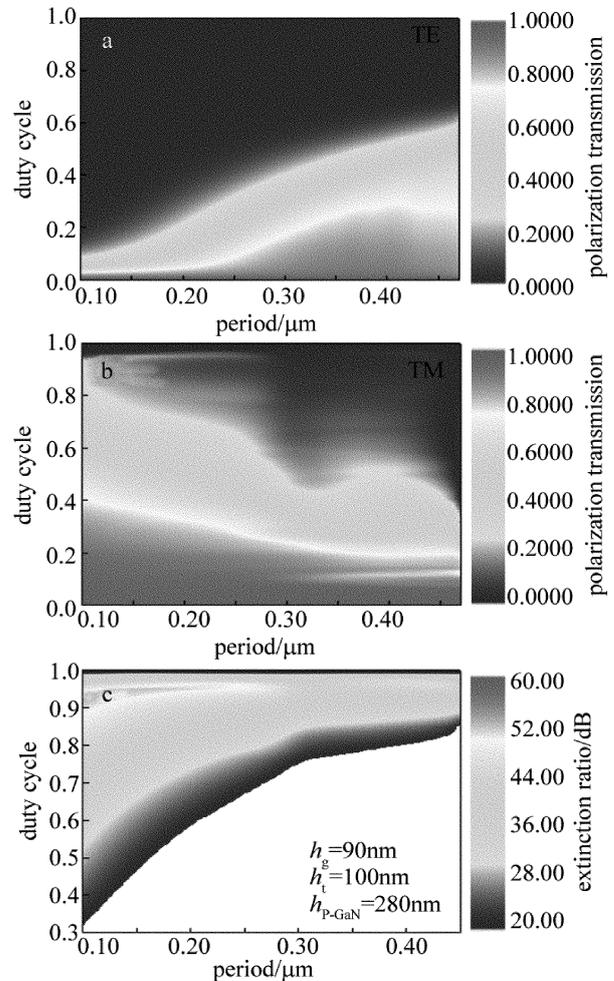


Fig. 3 a—TE polarization transmission b—TM polarization transmission c—extinction ratio of TM polarization

根据图 3a 和图 3b 两偏振光透射率并依据消光比计算公式得出在不同光栅占空比和周期下的 TM 偏振消光比, 如图 3c 所示。从图中可以看到, 消光比最大可以达到 60dB, 可是在偏振消光比大的光栅参量下 TM 的透射率也会比较低。例如在消光比为 50dB 时, 光栅占空比是 0.9, 周期为 150nm, TM 透射率仅为 0.1, 光提取效率在 1% 附近。如果选择该光栅参量虽然可以得到高消光比的偏振光输出, 但是势必是以降低倒装 LED 光提取效率为代价, 故此必须找到既能偏振光输出又能有高光提取效率的光栅参量。通过对比发现, 当光栅占空比为 0.4、光栅周期为 110nm 时, TM 偏振透射率不仅可以达到 0.8, 而且消光比也可以达到 22.3dB。

除了光栅占空比和周期对倒装 LED 偏振光透射

率和消光比有影响外,光栅厚度也对其有影响,如图 4 所示。此处介质过渡层 $h_t = 180\text{nm}$ 。随着光栅厚度的增加 TE 偏振光的透射率会急剧下降最后稳定在 0 附近,消光比是一直线性升高,但是对于 TM 偏振光会先小幅升高后小幅下降。在光栅厚度 $50\text{nm} \sim 100\text{nm}$ 范围内, TM 偏振光的透射率均是在 90% 以上,可是由于消光比是线性增加,因此在光栅厚度为 100nm 时消光比最大,消光比为 25.8dB 。为了有高的透射率能保持高光提取效率,同时实现稳定单偏振光输出,可以将光栅厚度设为 100nm 。

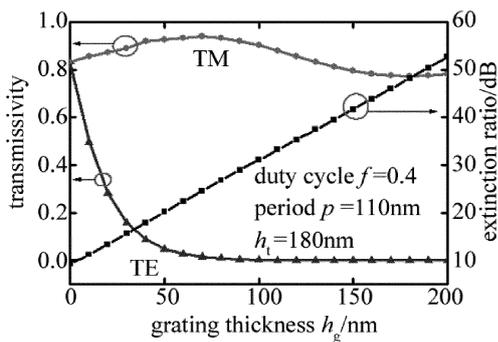


Fig. 4 The influence of grating thickness on transmissivity and extinction ratio

2.3 过渡介质层厚度对倒装 LED 偏振光透射率和消

TM 偏振光透射率和消光比随着过渡介质层厚度 h_t 的变化会有先增加后减小的循环变化趋势,但是 TE 偏振光透射率几乎稳定在 0 附近,如图 5 所示。 h_t 从 0nm 增加到 220nm 过程中, TM 偏振光透射率虽然在波动变化,但其值均在 0.75 以上,其中只有 h_t 在 $160\text{nm} \sim 180\text{nm}$ 范围内, TM 偏振光透射率是在 0.9 以上。因为 TM 偏振光透射率的波动变化也导致消光比在波动变化,但其值均在 23dB 以上。为了能够保持高 TM 透射率实现高光提取效率,同时为了有稳定的偏振光输出,可将 h_t 设置为 180nm ,当 $h_t = 180\text{nm}$ 时, TM 偏振光透射率为 0.902,消光比也达到 25.8dB 。

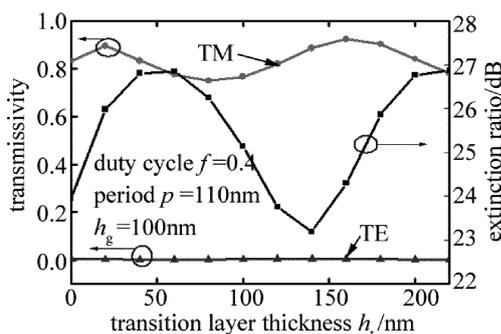


Fig. 5 The influence of dielectric transition layer thickness on transmissivity and extinction ratio

3 优化后器件光提取效率及偏振光消光比

根据第 2 节可知,优化后既可以实现高光提取效率又可以实现稳定单偏振光输出的光栅参量和光栅介质层厚度是: $f = 0.4$, $p = 110\text{nm}$, $h_g = 100\text{nm}$, $h_t = 180\text{nm}$ 。从图 5 可知,在优化后的光栅参量下偏振光的消光比可以达到 25.8dB ,根据一些研究可知,消光比在 20dB 以上时就可以保证稳定的偏振光输出^[19]。

相比于没有集成光栅的倒装 LED,集成了金属光栅后的倒装 LED 其光提取效率明显的提高,并且其光提取效率并不会因为 P-GaN 层厚度 $h_{\text{P-GaN}}$ 微小变化会有剧烈的变化,反而是一直稳定在一个值,如图 6 所示。没有集成亚波长光栅时,随着 $h_{\text{P-GaN}}$ 变化,光提取效率最高为 32.9% ,最低为 10.5% ,变化非常剧烈,但是当集成光栅后,除了在 $h_{\text{P-GaN}} < 80\text{nm}$ 时光提取效率有大幅度变化,当 $h_{\text{P-GaN}} > 80\text{nm}$ 后,光提取效率均稳定在 57.63% 。故此经过结构优化后,集成光栅的倒装 LED 以 25.8dB 的消光比和 57.63% 的光提取效率实现高光提取效率单偏振光输出。

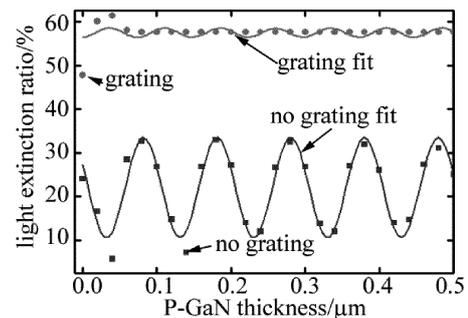


Fig. 6 The influence of P-GaN thickness on light extraction ratio of flip-chip LED and metal grating flip-chip LED

4 结论

利用 RSOFT 软件建立正装、倒装和集成金属光栅倒装 LED 结构,研究了 P-GaN 层厚度 $h_{\text{P-GaN}}$ 对正装和倒装 LED 光提取效率的影响,得出倒装 LED 确实能提高光提取效率,但是光提取效率对 $h_{\text{P-GaN}}$ 极为敏感。为了同时实现单偏振光输出和高光提取效率,优化了集成金属亚波长光栅倒装 LED 结构,得出当 $f = 0.4$, $p = 110\text{nm}$, $h_g = 100\text{nm}$, $h_t = 180\text{nm}$ 时不仅可以实现 57.63% 的高光提取效率,同时还可以使偏振光消光比达到 25.8dB ,而且集成有金属亚波长光栅的倒装 LED 的光提取效率不会因 $h_{\text{P-GaN}}$ 变化会有剧烈的波动,当 $h_{\text{P-GaN}} > 80\text{nm}$ 时,均维持在 57.63% ,这降低了工艺精度要求。

参 考 文 献

- [1] SEOK M S, YOO S J, CHOE J H, *et al.* Light extraction efficiency enhancement using surface-structured light-emitting diodes with a sub-wavelength coating [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2016, 68(3):462-466.
- [2] LIN Q, LIU Q N. Divergence characteristics of light spot of a circular LED array [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(6):858-862 (in Chinese).
- [3] FENG Q, LIANG 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, RUKOVISHNIKOV A I, ROSSUKANYI N M, *et al.* LED magneto-optical ellipsometer with the switching of orthogonal polarization states [J]. *Instruments & Experimental Techniques*, 2016, 59(5):707-711.
- [6] WANG F, RAO J H, XIANG X H. Research of performance of circular array light source in underwater wireless LED optical communication [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(4):527-532 (in Chinese).
- [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 A M O, YONG S, *et al.* Polarized gan-based light-emitting diode with a silver sub wavelength grating and dielectric layer [J]. *Middle East Journal of Scientific Research*, 2014, 22(2):193-198.
- [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*, 2016, D49(44):616-623.
- [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] CHENG B S, CHIU C H, HUANG K J, *et al.* Enhanced light extraction of InGaN-based green LEDs by nano-imprinted 2-D photonic crystal pattern [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2008, 23(5):1-5.
- [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 & Engineering*, 2009, B163(3):170-173.
- [13] ZHANG G, WWANG 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] KHOMITSKY D V. Model of circular polarization dependence on Mn delta-layer position in LED heterostructures with InGaAs/GaAs quantum well [J]. *Physics*, 2009, E3552:3-13.
- [15] WANG M, HU J, WANG C. High linearly polarized light emission from GaN-based LED with patterned dielectric/metal structures [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2015, 9524:952414.
- [16] ZHANG L, TENG J, CHUA S J, *et al.* Design and fabrication of subwavelength nanogratings based light-emitting diodes [J]. *Applied Physics*, 2011, A103(3):827-830.
- [17] 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 (in Chinese).
- [18] LI W, YUE Q Y, KONG F M, *et al.* Influence of surface Zn nanostructures on light emitting efficiency of GaN-based LED [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(4):409-416 (in Chinese).
- [19] XING H, CAO B, ZHANG G J, *et al.* Polarization properties of a nano-particle array grating on GaN-based LED [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 750/752:995-998.