

激光与光电子学进展

基于三角光栅的表面等离子激元增强型 发光二极管

徐云川¹, 江孝伟^{1,3*}, 朱郑乔若², 郑盛梅¹

¹衢州职业技术学院信息工程学院, 浙江 衢州 324100;

²衢州职业技术学院机电工程学院, 浙江 衢州 324100;

³北京工业大学光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 为了能够同时提高 GaN 发光二极管(light emitting diode, LED)的光提取效率和内量子效率,将 GaN LED与准对称光波导(包含光栅、Ag 薄层和 SiO₂层)集成,并基于时域有限差分法对该结构的 GaN LED进行了优化与分析。经模拟计算发现,有源区发出的光在 Ag 薄层激发了表面等离子激元,且表面等离子激元与有源区产生了珀塞尔效应,因此显著提高了内量子效率。另外,高透射光栅使得 LED 的光提取效率得到显著提高,且光栅层使得 Ag 薄层两侧处形成了折射率准对称的波导结构,这进一步提高了表面等离子激元的光提取效率,且 Ag 薄层两侧的电场呈均匀分布。

关键词 表面光学; 发光二极管; 表面等离子激元; 内量子效率; 三角光栅

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1124001

Surface Plasmon Enhanced Light Emitting Diodes Based on Triangular Grating

Xu Yunchuan¹, Jiang Xiaowei^{1,3*}, Zhu Zhengqiaoruo², Zheng Shengmei¹

¹College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324100, China;

²College of Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou College of Technology,
Quzhou, Zhejiang 324100, China;

³Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract In order to simultaneously improve the light extraction efficiency and internal quantum efficiency of GaN light emitting diodes(LEDs), GaN LEDs are integrated with quasi-symmetric optical waveguide (including grating, Ag thin layer and SiO₂ layer) and the GaN LED structure is optimized and analyzed based on the finite difference time domain (FDTD) method. The simulation results show that the surface plasma polaritons are excited by the light emitted from the active region in the Ag thin layer which produces the Purcell effect with the active region and thus the internal quantum efficiency is significantly improved. In addition, the existence of the high transmission grating makes the light extraction efficiency of LED significantly improved. Moreover, with the grating layer, the refractive index quasi-symmetrical waveguide structure is formed on both sides of the Ag thin layer, which further

收稿日期: 2020-10-24; 修回日期: 2020-11-26; 录用日期: 2020-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(61575008, 61650404)、江西省自然科学基金(20171BAB202037)、浙江省教育厅一般科研项目(Y201941404)、衢州市科技计划项目(2019K20)

*E-mail: JosephJiangquzhi@126.com

improves the light extraction efficiency of surface plasma polaritons and makes the uniform electric field distribution on both sides of the Ag thin layer.

Key words optics at surfaces; light emitting diode; surface plasma polaritons; internal quantum efficiency; triangular grating

OCIS codes 240.6680; 230.3670; 240.6695

1 引言

氮化镓 (gallium nitride, GaN) 基发光二极管 (light emitting diode, LED) 相比于其他光源具有能耗低、寿命长、稳定性高等特点^[1-2]。近几年 GaN LED 已经吸引了许多关注, 并已逐渐被应用在全彩显示、打印、固态照明等领域中^[3-4]。

目前, 限制 GaN LED 发光效率的原因主要有两个, 分别是较低的光提取效率和较低的内量子效率。因为 GaN 材料的折射率与空气折射率相差较大, 光在 LED 与空气界面处非常容易形成全反射 (全反射临界角仅为 23.5°), 所以 GaN LED 有源区产生的光子大部分被限制在器件内部而无法被提取^[5-6]。为了解决 GaN LED 全反射问题, 许多课题组提出了光子晶体、纳米光栅、表面粗化等技术, 显著提高了 GaN LED 的光提取效率^[7-8]。GaN LED 较低的内量子效率是晶格失配、高密度的位错缺陷以及量子局限斯塔克效应等因素造成的^[9-10]。主要通过提高量子阱的生长质量来解决 GaN LED 内量子效率低的问题, 但该方法存在成本高且技术难度大的问题。

研究者提出在 GaN LED 的 p-GaN 层上生长一层 Ag 薄膜, 利用 Ag 薄膜与 p-GaN 产生的表面等离子激元 (surface plasma polaritons, SPP) 来提高 GaN LED 的内量子效率。主要机理是当金属表面 SPP 的谐振频率与 LED 有源区的发光频率重叠时, SPP 模式中所耦合的能量显著增加, 导致 LED 内量子效率提高。这种机理也被称为珀塞尔效应^[11-12]。在这之后就涌现了许多利用 SPP 提高内量子效率的研究^[13], 该方法具有成本低、技术难度小的优势。

为了能够同时提高 GaN LED 的内量子效率和光提取效率, Zhang 等^[14]提出在 p-GaN 层上制备多层 M 型纳米光栅, 该 M 型纳米光栅由二氧化硅 (SiO_2)、金属 Ag 和二氧化铪 (HfO_2) 组成。该种结构的 GaN LED 既可以利用 Ag 激发的 SPP 来提高 LED 的内量子效率, 还可以利用纳米光栅提高 LED 的光提取效率, 经实验测试可知, 该 LED 的光致发光强度是无 M 型光栅 LED 的 10 倍。在 Ag 层两侧分别添加一层高/低折射率的 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$, 可形成准

对称的光波导结构, 进而提高 SPP 的光提取效率。文献 [15-16] 通过类似的方法, 显著提高了 GaN LED 的光提取效率和内量子效率。

本文提出了一种基于三角光栅的透射式表面等离子激元增强型 LED。该种结构的 LED 由准对称光波导 (由三角光栅、金属 Ag 薄层、低折射率 SiO_2 层构成) 和 GaN LED 芯片构成, 它相比于文献 [14-16] 中的结构, 具有结构简单、工艺简单且能提高 LED 发光效率的优势。本文首先给出了基于 SPP 和透射光栅提高 LED 内量子效率和发光效率的基本原理, 然后提出了三角光栅 GaN LED 结构, 最后优化了三角光栅, 并且分析了三角光栅的 SPP 模式以及三角光栅 GaN LED 的珀塞尔效应。经过模拟计算可知, 三角光栅 GaN LED 结构可以显著提高光提取效率和内量子效率。

2 基本原理及器件结构

2.1 基本原理

本文提出的 GaN LED 结构能够激发 SPP, 这是因为当有源区发出的光发生全反射时, 反射界面的一部分消逝波将会传到 Ag 薄层下表面, 当消逝波的水平波向量与 SPP 的波向量耦合时, Ag 薄层下方的表面等离子激元共振就会被激发^[17]。

当 SPP 被激发后, GaN LED 的内量子效率 η_{int^*} 为

$$\eta_{\text{int}^*} = \frac{k_{\text{rad}} + k_{\text{spc}}}{k_{\text{non}} + k_{\text{rad}} + k_{\text{spc}}}, \quad (1)$$

式中: k_{rad} 为电子空穴对的自发辐射复合速率; k_{non} 为电子空穴对的非辐射复合速率; k_{spc} 为有源区与 SPP 的耦合速率。

当 SPP 与有源区发生耦合时, 外量子效率 η_{ext^*} 为

$$\eta_{\text{ext}^*} = \frac{C_{\text{ext}} k_{\text{rad}} + C_{\text{spp}} k_{\text{spc}}}{k_{\text{non}} + k_{\text{rad}} + k_{\text{spc}}}, \quad (2)$$

式中: C_{ext} 和 C_{spp} 分别为 LED 的光提取效率和 SPP 的光提取效率^[12-13]。

在 SPP 被激发后, 金属与介质的界面处会形成很强的局域场, 使得有源区与 SPP 之间的耦合速率

$k_{spp} > k_{rad} + k_{non}$, 根据(1)式可得, 此时 LED 的内量子效率得到显著提高。另外, 结合(1)、(2)式可知, 当 η_{int^*} 、 C_{ext} 和 C_{spp} 同时增大时, LED 的发光效率会显著提高。

2.2 器件结构

本文提出的三角光栅表面等离子激元增强型 LED 的具体结构如图 1 所示, 其中周期三角光栅 (Triangular grating, TG) 自下而上分别为蓝宝石衬底、n 掺杂 GaN 层 (厚度为 800 nm)、有源区量子阱 (InGaN/GaN, 发射光为蓝光)、p 掺杂 GaN 层 (厚度为 20 nm)、二氧化硅 (厚度为 20 nm)、Ag 薄层 (厚度为 15 nm) 和二氧化铪。图 1 中的 p 、 h 、 s 分别是光栅的周期、厚度和底边宽度。在模拟计算时, Ag、GaN、HfO₂ 和蓝宝石衬底对不同波长的折射率和消光系数是由实验数据获得的^[18-21], SiO₂ 的折射率设为 1.45。本文提出的 GaN LED 制备工艺相对较为简单: 首先通过磁控溅射生长一层 HfO₂ 薄层, 紧接着在 HfO₂ 薄层上旋涂一层电子束抗蚀胶, 经电子束曝光和显影后在抗蚀胶上形成了三角光栅图形, 去胶后, 利用感应耦合等离子体刻蚀技术, 将图形转移到 HfO₂ 薄层上, 最终制备出二氧化铪三角光栅。

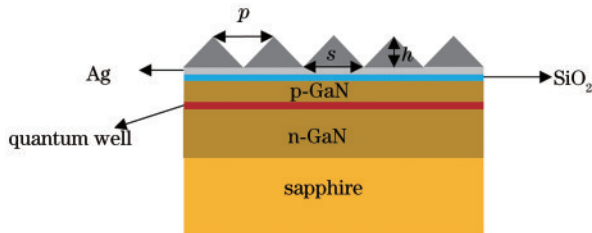


图 1 TG 表面等离子激元增强型 LED 结构图

Fig. 1 Structural diagram of TG surface plasmon enhanced LED

因为 SPP 是消逝波, 所以它会随着传播距离的增加呈指数衰减, 只有当有源区位于 SPP 波的传播范围内, 它们才能耦合到 SPP 中^[22]。SPP 波在 LED 中传播的距离为

$$Z = \lambda / \left\{ 2\pi \left[(\epsilon_{GaN} - \epsilon_{SiO_2}) / \epsilon_{SiO_2}^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (3)$$

式中: $\lambda = 0.48 \mu\text{m}$ 是入射波长; ϵ_{GaN} 和 ϵ_{SiO_2} 分别是 GaN 和 SiO₂ 的介电常数^[12]。通过计算可知, Ag 薄层激发的 SPP 在 LED 中能够最远传播 70 nm 左右, 而本文中 p-GaN 层和 SiO₂ 层的总厚度为 40 nm, 因此有源区在 SPP 波的传播范围内。

在图 1 所示的 GaN LED 结构中, Ag 薄层主要用于激发 SPP 以提高 η_{int^*} ; TG 的主要作用是形成准对称光波导结构, 实现透射光的高透射率, 以提高

C_{ext} 和 C_{spp} ; SiO₂ 层主要是抑制器件对 SPP 的吸收, 有助于 C_{spp} 的进一步提高。

3 结果与讨论

3.1 三角光栅的优化

为了使基于 TG 形成的准对称光波导 (Quasi symmetric optical waveguide, QSOW) 能最大程度地提高 C_{ext} 和 C_{spp} , 需对其参数进行优化, 使 TG 的透射率达到最优值。利用时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 法, 对 QSOW 的二维结构进行模拟计算。首先基于 FDTD 建立一个 QSOW 模型, 具体结构如图 2 所示, 其中 p-GaN 层厚度、Ag 厚度、SiO₂ 层厚度分别与图 1 相同。然后将 x 方向设为周期性边界 (periodic), 将 y 方向设为完美匹配层边界 (perfectly matched layer, PML); 光源使用平面光 (plane source), 放置在 p-GaN 层下方, 入射角为 0°, 横磁 (TM) 偏振。

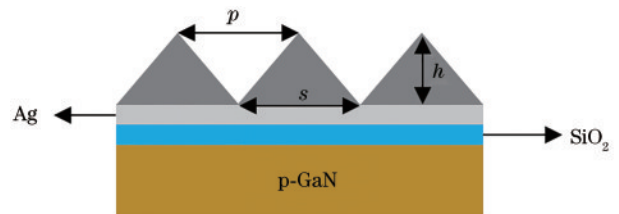


图 2 QSOW 结构图

Fig. 2 Structural diagram of QSOW

图 3 所示是 TG 光栅参数对 QSOW 透射率的影响。图 3(a) 是 TG 占空比 $f (f = s/p)$ 对 TG 的影响, 可以看出, 在入射波长从 0.45 μm 增加到 0.55 μm 过程中, 只有光栅占空比为 1 时透射率才能达到最优值, 此时 $p = 0.35 \mu\text{m}$, $h = 0.05 \mu\text{m}$ 。从图 3(b) 中可以发现, 只有 p 为 0.33~0.38 μm 时 TG 才能在 0.45~0.55 μm 波段间一直保持高透射率, 此时 $f = 1$, $h = 0.05 \mu\text{m}$, 但因为器件制备时存在一定误差, 本文选择 $p = 0.35 \mu\text{m}$ 。光栅高度 h 对 TG 透射率的影响如图 3(c) 所示, 可以发现, 虽然当 $h = 0.06 \mu\text{m}$ 时, 光栅在 0.455~0.55 μm 波段间的透射率大于 $h = 0.05 \mu\text{m}$ 时的透射率, 但是 0.45~0.455 μm 波段间的透射率较低, 因此综合考虑, 本文 h 选择 0.05 μm , 此时 $f = 1$, $p = 0.35 \mu\text{m}$ 。TG 在 $h = 0.55 \mu\text{m}$, $p = 0.35 \mu\text{m}$, $f = 1$ 条件下对蓝光波段具有高透射率, 这是因为平面光能够激发 QSOW 支持的 SPP 模式以及波导模式, 这些模式能够被有效地耦合到远场辐射模式中^[23]。

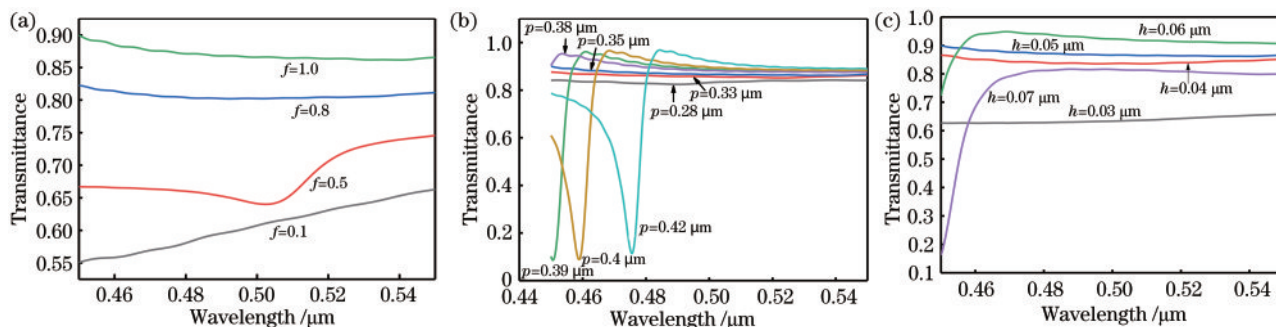


图 3 TG 参数对透射率的影响。(a) 占空比; (b) 周期; (c) 厚度

Fig. 3 Influence of TG parameters on transmittance. (a) Duty cycle; (b) period; (c) thickness

3.2 SPP 模式的分析

利用 FDTD 分别建立图 2 所示 QSOW 和图 4 所示非对称光波导 (Asymmetric optical waveguide, AOW) 的二维模型, TG 参数由 3.1 节优化得到, 采用平面光为激发光源。基于模型计算了 QSOW 和 AOW 在 TM 偏振态下的吸收率, 图 5(a)、(b) 分别



图 4 AOW 结构图

Fig. 4 Structure diagram of AOW

是 QSOW 和 AOW 在不同入射角度下的吸收率。

可以发现, 在不同入射角下, 两种不同结构都有吸收峰, 这说明两种结构都被有源区发出的光激发了 SPP 模式, 并在 Ag 薄层、SiO₂ 层和光栅中传播^[13]。图 5(a) 是 QSOW 在不同入射角度下的吸收率, 可以看出, 该结构的共振角度在 37° 附近, 这说明当有源区激发的光波在 0.48 μm 附近时, 只有 37° 附近的入射角度才能在 Ag 薄层中激发出 SPP 模式。从图 5(b) 可知, 当有源区发出的光波在 0.48 μm 附近时, 只有 58° 附近的入射角才能在 Ag 薄膜中激发 AOW 的 SPP 模式。

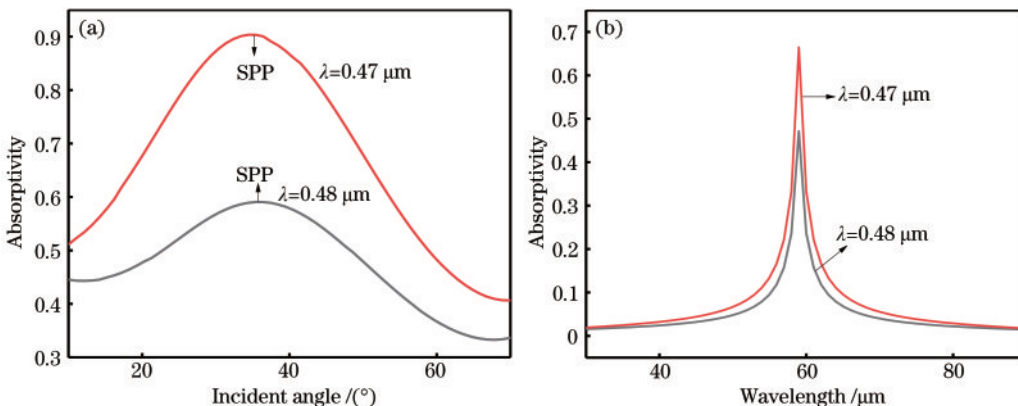


图 5 不同入射角度下的吸收率。(a) QSOW; (b) AOW

Fig. 5 Absorptivities under different incident angles. (a) QSOW; (b) AOW

图 6 所示是 QSOW 和 AOW 在波长为 0.5 μm 时的电场分布。可以发现, SiO₂ 层中的电场能量比 Ag 层中的高, 这说明被激发的 SPP 模式的损耗较低, 这有助于 SPP 光提取效率 C_{spp} 的提高^[24]。另外, 从图 6(a) 中可以发现, Ag 层上下两侧的电场分布比较对称, 这主要是因为 Ag 层上方添加了光栅, 形成了折射率准对称波导结构^[13, 15]。还可以发现, 在 QSOW 上方空气中有很强的电场分布, 这说明高透射 TG 可以提高 GaN LED 的光提取效率 C_{ext} 。

因为无高透射率的光栅, 所以图 4 所示结构 AOW 上方的空气中就没有很强的电场分布, 这是其低透射率导致的, 进而 GaN LED 的 C_{ext} 较低。另外, 因为没有光栅形成折射率对称的波导结构, 所以从图 6(b) 中可以发现, Ag 层上下两侧的电场分布并不是均匀的; 而且 SiO₂ 层中的电场强度明显弱于 QSOW, 这也表明其 SPP 光提取效率 C_{spp} 明显低于 QSOW。

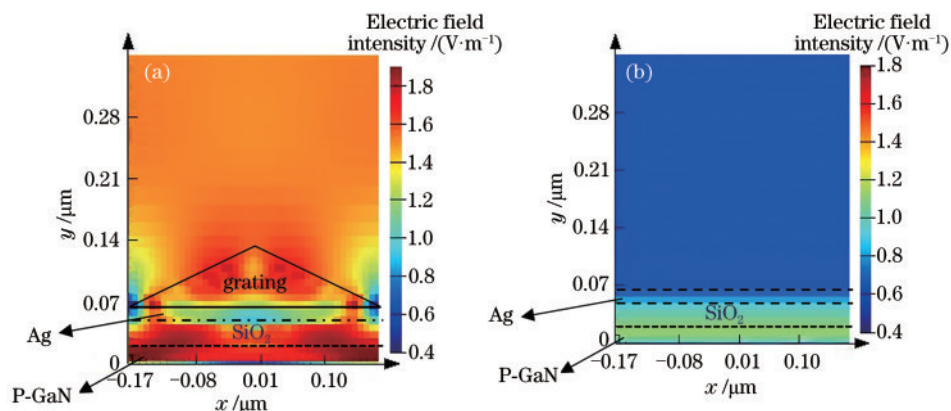


图 6 不同结构的电场分布。(a) QSOW; (b) AOW

Fig. 6 Electric field distributions of different structures. (a) QSOW; (b) AOW

3.3 珀塞尔效应分析

为了验证通过激发等离子激元可以提高 GaN LED 的内量子效率且通过光栅可以提高光提取效率,利用 FDTD 模拟计算了不同 GaN LED 结构的电场分布,模拟计算时采用偶极子光源(dipole source)模拟有源区电子空穴对的复合。图 7 所示是不同 GaN LED 结构的电场分布,波长为 $0.5 \mu\text{m}$ 。图 7(a)是含有 QSOW 的 GaN LED 的电场分布。图 7(b)是含有 AOW 的 GaN LED 的电场分布,其中 AOW GaN LED 的结构图如图 8(a)所示。图 7(c)是普通 GaN LED 的电场分布,其具体结构如

图 8(b)所示。图 8(a)、(b)中 GaN LED 有源区结构和 p-GaN、n-GaN 厚度与图 1 中的相同。

可以发现,相比于图 7(b)和图 7(c),图 7(a)上方空气中的电场强度相对较强,主要表现是比较亮,这是因为含有 QSOW 的 GaN LED 具有高透射率光栅,所以其光提取效率 C_{ext} 比图 8 中的高,这证明了在 LED 表面添加纳米光栅可提高 LED 光提取效率。另外,从图 7 中还可以发现,相比于图 7(c),图 7(a)和图 7(b)的偶极子发光效率(亮度更高)明显较高,这证明了这两种结构的 GaN LED 内量子效率更高。这主要归功于有源区发出的光通过 Ag

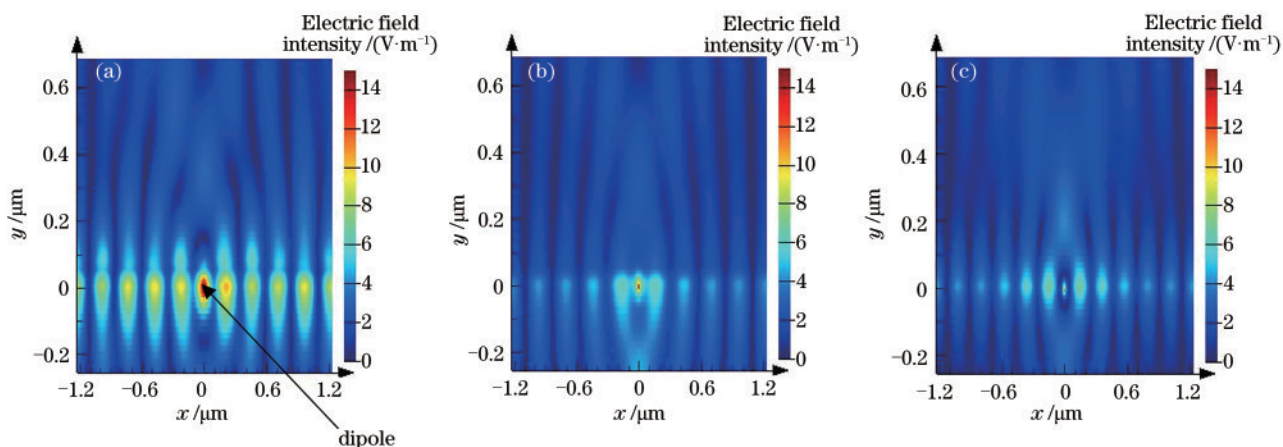


图 7 GaN LED 的电场分布。(a)含有 QSOW 的 GaN LED; (b)含有 AOW 的 GaN LED; (c)普通 GaN LED

Fig. 7 Electric field distribution of GaN LED. (a) GaN LED with QSOW; (b) GaN LED with AOW; (c) normal GaN LED

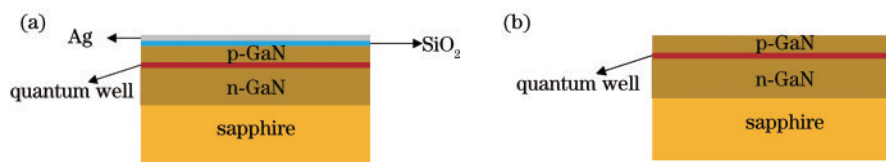


图 8 不同结构的 GaN LED。(a)含有 AOW 的 GaN LED; (b)普通 GaN LED

Fig. 8 GaN LEDs with different structures. (a) GaN LED with AOW; (b) normal GaN LED

层激发了 SPP 模式,并且所激发的 SPP 模式与有源区发生耦合,从而提高了 LED 的内量子效率。但是与图 7(a)相比,图 7(b)所示的偶极子光源(有源区)附近的亮度较暗,这主要是因为含有 QSOW 的 GaN LED 含有透射光栅,所以其 SPP 模式的光提取效率 C_{spp} 更高,能通过 SPP 将更多的光子提取出来,进而图 7(a)中有源区附近的亮度更高。通过计算发现, QSOW GaN LED 的偶极子光源的最高电场强度是 AOW GaN LED 的 2.2 倍,是普通 GaN LED 的 4 倍。

4 结 论

为了提高 GaN LED 的发光效率,提出将高透射三角光栅与能够激发 SPP 的 Ag 薄层、GaN LED 集成的方法。经过优化发现,当三角光栅 $p=0.35 \mu\text{m}$, $h=0.05 \mu\text{m}$, $f=1$ 时,三角光栅对蓝色波段的透射率最优。通过对 SPP 模式的分析发现,15 nm 厚的 Ag 能够被有源区发出的光激发出 SPP,且低折射率层 SiO_2 使得 SPP 的损耗程度不高。另外, QSOW 结构具有对称波,所以 Ag 薄层上下两侧的电场分布均匀。最后通过珀塞尔效应分析,证实了 SPP 能够提高 LED 的内量子效率,且 QSOW GaN LED 含有高透射光栅,所以其上方和有源区附近具有更强的电场。研究结果为制备高性能、工艺简单的 GaN LED 提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Jiang X W, Zhao J W, Wu H, et al. Design and optimization of flip-chip light-emitting diode with high light extraction efficiency [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 092302.
江孝伟, 赵建伟, 武华, 等. 高光提取效率倒装发光二极管的设计与优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 092302.
- [2] 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.
- [3] Zhang H S, Zhu J, Zhu Z D, et al. Surface-plasmon-enhanced GaN-LED based on the quasi-symmetrical planar waveguide structure[J]. *Optics Communications*, 2013, 311: 311-316.
- [4] Feng Q B, Li Y N, Li Q G, et al. Lens array with double freeform surface for LED backlight in LCD imaging engine of helmet-mounted display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1123003.
冯奇斌, 李亚妮, 李其功, 等. 用于头盔显示液晶像源 LED 背光的双自由曲面透镜阵列设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1123003.
- [5] Huang H W, Lai F I, Huang J K, et al. Enhancement of light output power of GaN-based light-emitting diodes using a SiO_2 nano-scale structure on a p-GaN surface[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2010, 25(6): 065007.
- [6] 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]. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 2014, 22(2): 193-198.
- [7] Matioli E, Rangel 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.
- [8] 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.
- [9] Huang H M, Hu H Y, Wang H, et al. Enhanced light output of dipole source in GaN-based nanorod light-emitting diodes by silver localized surface plasmon [J]. *Journal of Nanomaterials*, 2014, 2014: 5.
- [10] Nakamura S, Chichibu S F. Introduction to nitride semiconductor blue lasers and light emitting diodes [M]. Abingdon: Taylor & Francis, 2000.
- [11] Li Z Q, Wang C, Li W C, et al. Improving LED luminescence properties by using Ag/P-GaN double grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1185-1191.
李志全, 王聪, 李文超, 等. 利用 Ag/P-GaN 双光栅改善 LED 发光特性[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1185-1191.
- [12] Okamoto K, Niki I, Shvartser A, et al. Surface-plasmon-enhanced light emitters based on InGaN quantum wells[J]. *Nature Materials*, 2004, 3(9): 601-605.
- [13] Kwon M K, Kim J Y, Kim B H, et al. Surface-plasmon-enhanced light-emitting diodes[J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(7): 1253-1257.
- [14] Zhang H S, Zhu J, Zhu Z D, et al. Surface-plasmon-

- enhanced GaN-LED based on a multilayered M-shaped nano-grating[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13492-13501.
- [15] Zhu J, Zhang H S, Zhu Z D, et al. Surface-plasmon-enhanced GaN-LED based on the multilayered rectangular nano-grating[J]. *Optics Communications*, 2014, 322: 66-72.
- [16] Li L Q, Lü Y W. Surface-plasmon-enhanced light transmission intensity with a basic grating in GaN-based LED [J]. *Journal of Semiconductors*, 2014, 35(4): 46-51.
- [17] Li W C, Sha X P, Li Z Q, et al. Emission enhancement of light-emitting diode by localized surface plasmon induced by Ag inserts in p-GaN and TiO₂-Ag grating [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(6): 1855-1860.
- [18] Ciesielski A, Skowronski L, Trzcinski M, et al. Controlling the optical parameters of self-assembled silver films with wetting layers and annealing [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 421: 349-356.
- [19] Lin M E, Sverdlov B N, Strite S, et al. Refractive indices of wurtzite and zincblende GaN [J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(20): 1759-1761.
- [20] Harris D C, Johnson L F, Seaver R, et al. Optical and thermal properties of spinel with revised (increased) absorption at 4 to 5 μm wavelengths and comparison with sapphire [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(8): 087113.
- [21] Al-Kuhaili M F. Optical properties of hafnium oxide thin films and their application in energy-efficient windows [J]. *Optical Materials*, 2004, 27(3): 383-387.
- [22] Li Z Q, Liu T L, Bai L D, et al. Surface-plasmon-enhanced GaN-LED based on nano-grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0920005.
李志全, 刘同磊, 白兰迪, 等. 纳米光栅的表面等离子体增强型 GaN-LED [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0920005.
- [23] Wedge S, Barnes W L. Surface plasmon-polariton mediated light emission through thin metal films [J]. *Optics Express*, 2004, 12(16): 3673-3685.
- [24] Lu Y C, Chen Y S, Tsai F J, et al. Improving emission enhancement in surface plasmon coupling with an InGaN/GaN quantum well by inserting a dielectric layer of low refractive index between metal and semiconductor [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(23): 233113.