

文章编号 1004-924X(2017)05-1185-07

利用 Ag/P-GaN 双光栅改善 LED 发光特性

李志全, 王 聪*, 李文超, 牛力勇, 童 凯

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 东北大学 秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为了提高 GaN 基 LED 的发光效率, 设计了一种新型 LED 模型, 该模型主要包括 Ag 光栅, 氧化铟锡过渡层和 P-GaN 光栅。首先阐述了利用该结构激发表面等离子体从而改善 LED 发光特性的原理, 讨论了该模型的加工工艺与制作过程。基于 COMSOL 软件, 利用有限元法对本文提出的 LED 模型进行了仿真分析, 得出该模型在不同结构参数下, 归一化辐射功率与归一化损耗功率随波长的变化规律以及电场分布情况。仿真结果表明, 在 ITO 过渡层厚度为 55 nm, 周期为 270 nm, 占空比为 0.5 时, 所设计的 GaN 基 LED 模型的发光强度较普通 LED 提高近 30 倍, 这一结果为研制高性能 GaN 基 LED 提供了可靠基础。

关键词: 发光二极管; 表面等离子体; 发光效率; 光栅; 辐射功率

中图分类号: TN312.8; O472.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1185

Improving LED luminescence properties by using Ag/P-GaN double grating

LI Zhi-quan, WANG Cong*, LI Wen-chao, NIU Li-yong, TONG Kai

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. School of Control Engineering, Northwest University, Qinhuangdao 066004, China)

* Corresponding author, E-mail: 904291668@qq.com

Abstract: In order to improve the luminous efficiency of GaN based LED, a novel type LED model which mainly includes Ag grating, transition layer of indium tin oxide and P-GaN grating was designed. The method that using the structure to stimulate surface plasma for improving luminous characteristics of LED was explored, and the processing technology and manufacturing process of the model was discussed. Based on COMSOL software, the LED model was simulated by finite element method, revealing the principle for the variation of normalized radiant power and normalized loss power with wavelength and electric field distribution under different structure parameters. The simulation result shows that when the thickness of the transition layer is 55 nm, period is 270 nm and duty circle is 0.5, the luminous intensity of the GaN based LED is increased nearly 30 times of the normal LED, which lays a reliable foundation for the research of GaN based LED with high performance.

Key words: light-emitting diode; surface plasmon; luminous efficiency; grating; radiation power

收稿日期: 2016-10-14; 修订日期: 2016-11-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61172044)

1 引言

半导体发光二极管(Light Emitting Diode, LED)以其体积小、耗能小、寿命长和可靠性高等优点,已广泛应用于照明、显示、光通信等领域^[1-2]。但现行 LED 较低的发光效率致使 LED 产业的发展受到限制,所以改善 LED 发光性能成为 LED 制作及应用的研究热点。LED 的发光效率由外量子效率决定,外量子效率主要取决于光提取率和内量子效率,一方面,由于 GaN 的折射率远远高于空气折射率,光线在 GaN 与空气界面上发生全反射,使大部分的光反射回 GaN 中,产生热能,只有少部分的光能辐射到空气中。这不仅使得 LED 光提取率降低,而且使 LED 长期处于高温工作状态,寿命缩短,表面粗化、光子晶体等方法,可以提升光提取率^[3-4]。另一方面在室温下 GaN 基 LED 的内量子效率比较低,通常依靠提高 GaN 材料生长品质等方法来增加内量子效率,但这一类方法的成本较高^[5]。

近年来,利用金属表面局域等离子体(Localized Surface Plasma, LSP)特性提高 LED 的内量子效率、光提取效率及改进光出射特性等方面性能的研究备受关注。2004 年, Koichi Okamoto 等人首次利用表面等离子体激元(Surface Plasma Polaritons, SPP)来提高 InGaN/GaN 量子阱 LED 的发光效率,当金属表面 SPP 的谐振频率与 GaN 量子阱(Quantum Well, QW)的发光频率重叠时, SPP 模式中所耦合的能量显著增加,因此其内量子效率提高,这种现象被称为珀塞尔效应^[6]。为使 SPP 的谐振频率与 LED 的发射峰值频率覆盖重合,取得更大的内量子效率,金属纳米光栅、纳米金属离子、纳米天线和纳米阵列结构等纳米结构得到了广泛的应用。Sung 等人提出一种金纳米粒子耦合 GaN 基的 LED,使电致发光强度(EL)增强了 1.8 倍^[7]。Gabrie Lozano 等研究基于表面等离子阵列的固态光源,用于增强极化光的发光效率并且发光装置具有高定向性质^[8]。有研究表明,微纳米光栅结构可以有效提高 SPP 波的光提取效率。kamoto 等人在金属表面刻写亚波长金属光栅,使 SPP 能量更有效地转化为光能量,增强了 LED 的发光强度^[9]。Drezet 等人也通过 Au 光栅使得 GaP 的逃逸角得到有效放大,从而更加利于 LED

的光提取^[10]。C. H. Lin 等人提出了光电化学刻蚀与相位掩模干涉相结合的方法在倒装 LED 芯片的出光面,即 n-GaN 面上刻蚀形成一维光栅结构以提高 LED 光提取率的方案^[11]。与其他结构相比,金属纳米光栅还具有制作简单、成本低的优势。

本文设计了带有氧化铟锡(ITO)过渡层的 Ag/p-GaN 双光栅结构,通过同时提高 LED 的光提取率和内量子效率全面地增强了 LED 的发光效率。

2 结构设计及理论研究

2.1 LED 结构模型

本文设计了一种双光栅 LED 结构,如图 1 所示。由于商品化 LED 晶片一般采用蓝宝石(0001)作为衬底,该 LED 结构包括 400 nm 厚的 N-GaN 缓冲层, InGaN(3 nm)/GaIn(5 nm)多层量子阱和 200 nm 厚的 p-GaN。首先,利用纳米压印技术和感应耦合等离子体刻蚀技术在 p-GaN 层刻蚀周期性光栅结构,使 p-GaN 表面粗化,增加出光面积,并使本应发生全反射的光线从不同表面射出,放大逃逸角,从而提高光提取率^[12]。光栅脊距量子阱高度为 150 nm,刻蚀深度为 50 nm,光栅周期记为 T ,占空比记为 r 。然后,在 p-GaN 光栅结构上沉积一层 ITO 作为过渡层,并在表面蒸镀金属制作 p 型电极。ITO 具有高透射性,能够减少反射回 LED 内部的光^[13-14],而且 ITO 具有扩展电流的作用。接着,在 ITO 表层与 p-GaN 光栅对应的位置制作 20 nm 厚的 Ag 光栅以激发 SP, Ag 光栅的周期为 T ,占空比为 r , Ag 光栅与 p-GaN 光栅脊之间的 ITO 过渡层厚度记为 d 。最后,在 n-GaN 上制作 n 型电极。

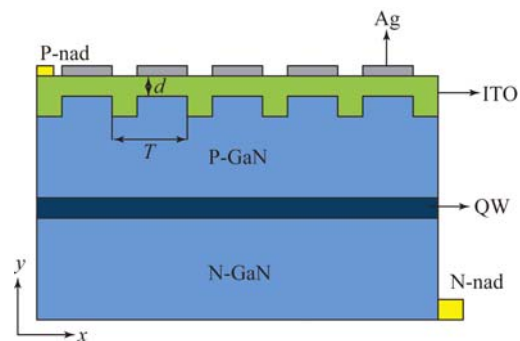


图 1 Ag/P-GaN 双光栅 LED 模型结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Ag/P-GaN double grating LED model

2.2 理论研究

LED 外量子效率受内量子效率(η_{int})和光提取率(C_{ext})的影响,其关系式为:

$$\eta_{\text{ext}} = C_{\text{ext}} \cdot \eta_{\text{int}} = C_{\text{ext}} \cdot \frac{k_{\text{rad}}}{k_{\text{rad}} + k_{\text{non}}}. \quad (1)$$

内量子效率可由 QW 中电子/空穴对的辐射复合速率 k_{rad} 和非辐射复合速率 k_{non} 决定,其关系式为:

$$\eta_{\text{int}} = k_{\text{rad}} / (k_{\text{rad}} + k_{\text{non}}). \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,LED 的发光效率可以通过提高光提取率(C_{ext})、增加载流子的自发辐射复合率 k_{rad} 或减小非辐射复合率 k_{non} 来增强。合理的 SPP 耦合结构既可以提高 LED 的内量子效率,又能提高 LED 的光提取效率,是增强 LED 发光的有效途径^[15]。

当 SPP 与量子阱发生耦合时,内量子效率 η_{int}^* 的表达式为:

$$\eta_{\text{int}}^* = \frac{k_{\text{rad}} + k_{\text{spc}}}{k_{\text{non}} + k_{\text{rad}} + k_{\text{spc}}} = 1 - \frac{k_{\text{non}}}{k_{\text{non}} + k_{\text{rad}} + k_{\text{spc}}}, \quad (3)$$

式中 k_{spc} 为 SPP 耦合率,可由费米黄金定律给出:

$$k_{\text{spc}} = \frac{2\pi}{\hbar} |\mathbf{d} \cdot \mathbf{E}(\boldsymbol{\omega})|^2 \rho(\boldsymbol{\omega}), \quad (4)$$

其中: \hbar 是普朗克常量, \mathbf{d} 是电子空穴对的偶极矩, $\mathbf{E}(\boldsymbol{\omega})$ 表示 SPP 在介质层的电场, $\rho(\boldsymbol{\omega})$ 是 SPP 的态密度。LSP 在金属与介质交界处形成强烈的局域场,具有很高的 SP 态密度,因此 $k_{\text{spc}} > k_{\text{rad}} + k_{\text{non}}$ ^[16]。

当 SPP 与量子阱发生耦合时,外量子效率 η_{ext}^* 的表达式为:

$$\eta_{\text{ext}}^* = \frac{C_{\text{ext}} \cdot k_{\text{rad}} + C_{\text{spp}} \cdot k_{\text{spc}}}{k_{\text{rad}} + k_{\text{non}} + k_{\text{spc}}}, \quad (5)$$

其中 C_{spp} 表示 SP 波的光提取效率。

文中所设计的结构中, p-GaN 光栅结构可以有效提高 LED 的光提取效率(C_{ext}), 而银纳米光栅与 ITO 过渡层主要用于提高 SPP 波的耦合率(k_{spc})和光提取效率(C_{spp})。

2.3 共振条件

当入射光为 X-偏振光, 并从 GaN 底部沿 Y 轴方向垂直入射时产生有效激发 LSP, 入射场需满足相位匹配方程^[17]:

$$\text{Re}(k_g) - \frac{2\pi}{c} f_0 \sin \theta = \frac{2\pi}{\eta T}, \quad (6)$$

式中: k_g 为 LSP 波矢, f_0 为共振频率, T 为光栅周期, 无量纲常数 η 与介质介电常数及绝缘层厚

度有关。由于文中为垂直入射方式, 即入射角 $\theta=0$, 式(6)可以简化为:

$$\text{Re}(k_g) = \frac{2\pi}{\eta T}. \quad (7)$$

共振频率由式(8)给出:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \text{Re}(k_g). \quad (8)$$

结合式(7)和式(8)可得:

$$f_0 = \frac{e}{2\pi \hbar} \sqrt{\frac{E_F}{\eta \epsilon_0 (\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}) T}}, \quad (9)$$

式(9)即为激发 LSP 的共振条件。

2.4 参数设置

基于 COMSOL 软件, 利用有限元法对本文提出的 LED 模型进行数值仿真, 利用参数化扫描功能分析归一化辐射功率与归一化吸收功率在不同参数下随波长的变化规律。计算中, 在 p-GaN 底部边界设置散射边界条件以模拟入射光, 入射光波长记为 λ , 在 z 轴方向上设置完美匹配层以模拟无限延伸的空气, 在 x 方向和 $-x$ 方向设置周期性边界条件。GaN 的折射率为 2.5, 空气的折射率为 1, ITO 和银的介电常数计算公式为:

$$\epsilon_m(\lambda) = \epsilon_{\text{mr}} + i\epsilon_{\text{mi}} = \epsilon_{\infty} - \frac{\lambda^2 \lambda_c}{\lambda_p^2 (\lambda_c + i\lambda)}, \quad (10)$$

式中: λ_p 为金属的等离子体波长, λ_c 为金属的共振波长。金属 Ag: $\epsilon_{\infty} = 5.8$, $\lambda_p = 1.454 1 \times 10^{-7}$ m, $\lambda_c = 1.761 4 \times 10^{-6}$ m; ITO: $\epsilon_{\infty} = 3.8$, $\lambda_p = 5.649 7 \times 10^{-7}$ m, $\lambda_c = 11.210 7 \times 10^{-6}$ m^[18]。

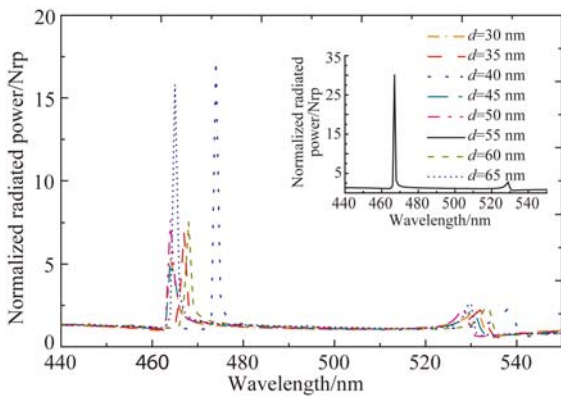
3 仿真结果与数值分析

3.1 过渡层厚度 d

首先, 分析 ITO 过渡层厚度 d 对 LED 模型发光效率的影响。当光栅周期为 270 nm, 占空比为 0.5 时, 在不同 ITO 层厚度下 ($d=35, 40, 45, 50, 55, 60, 65$ nm), 归一化辐射功率随波长的变化如图 2(a) 所示。 d 取不同值时, 辐射功率曲线在 460~480 nm 波段均出现明显波峰, 在 $d=55$ nm 时, 峰值达到最大, 归一化辐射功率约增强了 30 倍, 此时波长 λ 约为 465 nm, 继续增加 d 值, 峰值不再增大, 反而减小。

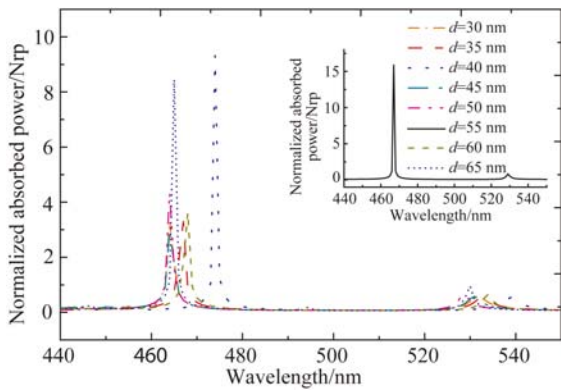
定义 Ag 光栅吸收的全部功率为归一化吸收功率, 吸收功率水平代表着一定的 LSP, 吸收功率峰值与 LSP 的共振模式有关。不同 d 值下, 归一化吸收功率的变化如图 2(b) 所示。与图 2(a)

中的辐射功率相对应,不同 d 值下,吸收功率在 460~470 nm 波段也产生波峰,且两者的变化趋势一致。结果表明,结构中产生的 LSP 越强,LED 的发光效率越高,这主要是因为 LSP 与 QW 之间的有效耦合增强了 LED 的出光效率。但当 d 超过 55 nm 时,ITO 透射性降低,能够通过 ITO 层的光减少,LSP 激发程度也随之降低,LED 的发光效率降低。



(a) 归一化辐射功率随波长的变化

(a) Variation of normalized radiated power with wavelength



(b) 归一化吸收功率随波长的变化

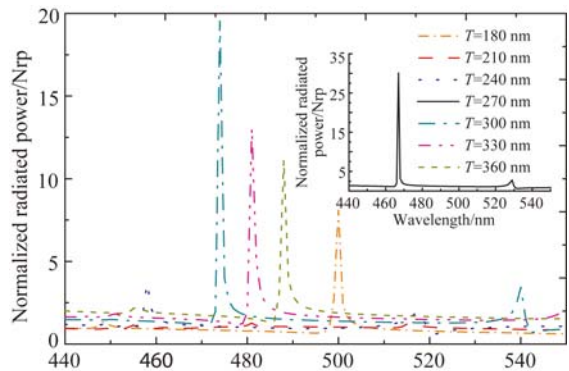
(b) Variation of normalized absorbed power with wavelength

图 2 $T=270$ nm 时 ITO 厚度对 LED 模型发光效率的影响
Fig. 2 Effect of ITO thickness on luminous efficiency of LED model with T of 270 nm

3.2 光栅周期 T

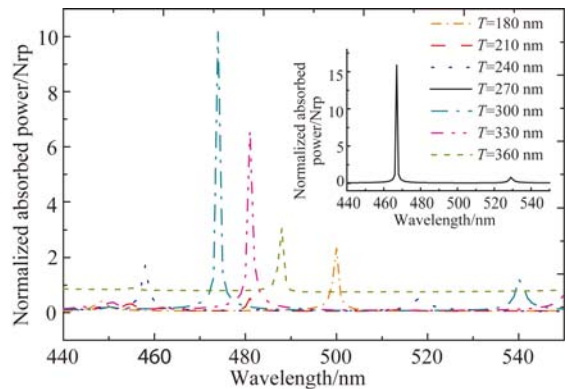
入射光无法直接激发 LSP,而光栅结构可以形成特定波长的极化电子振荡,为 LSP 的激发提供额外的水平波向量。因此,光栅周期对 LSP 特性有显著影响,如式(9)所示,光栅周期在一定范围内才能满足激发 LSP 所需的共振条件。当 ITO 薄膜厚度为 55 nm,占空比为 0.5 时,在不同

光栅周期下 ($T=180, 210, 240, 270, 300, 330, 360$ nm),归一化辐射功率与归一化吸收功率随波长的变化分别如图 3(a)和图 3(b)所示。图中,不同周期对应的辐射功率和吸收功率曲线中出现不同程度的波峰。LSP 的共振频率与周期有关,周期的增大导致共振频率的减小(图 3 中峰值随周期的增加发生红移)。在周期为 270 nm,波长约为 465 nm 时,辐射功率的增强效果达到最佳,LSP 激发程度达到最大。GaN 纳米光栅的周期还会影响 GaN 的逃逸角。 $T=270$ nm 时,逃逸角外的辐射强度大幅度提高。



(a) 归一化辐射功率随波长的变化

(a) Variation of normalized radiated power with wavelength



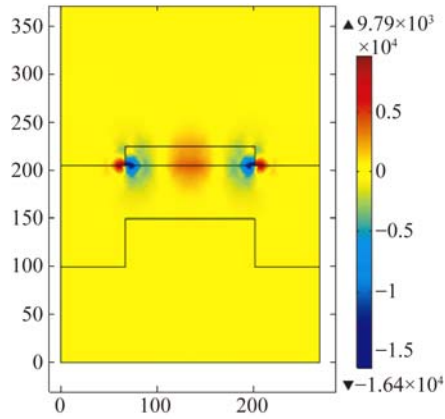
(b) 归一化吸收功率随波长的变化

(b) Variation of normalized absorbed power with wavelength

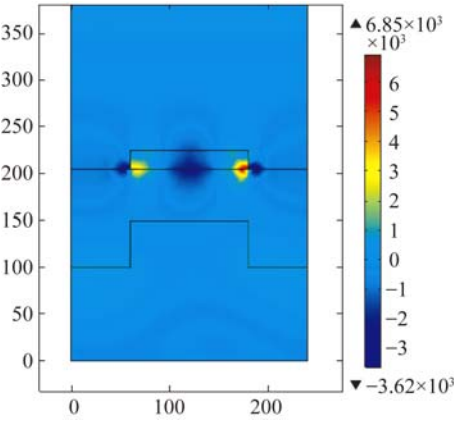
图 3 $d=55$ nm 时光栅周期对 LED 模型发光效率的影响
Fig. 3 Effect of grating period on luminous efficiency of LED model with d of 55 nm

在满足共振条件的情况下,在 Ag 光栅与 ITO 交界面可以形成局域电场,故周期 T 还可影响局域电场的强度分布,图 4(a)和 4(b)分别为 T 为 270,300 nm 时,共振频率下的电场强度分布。可以看出,周期为 270 nm 时局域电场强度

更大,此时电场局域在 ITO 与 Ag 界面上。



(a) $d=55\text{ nm}, T=270\text{ nm}, r=0.5, \lambda=465\text{ nm}$



(b) $d=55\text{ nm}, T=300\text{ nm}, r=0.5, \lambda=472\text{ nm}$

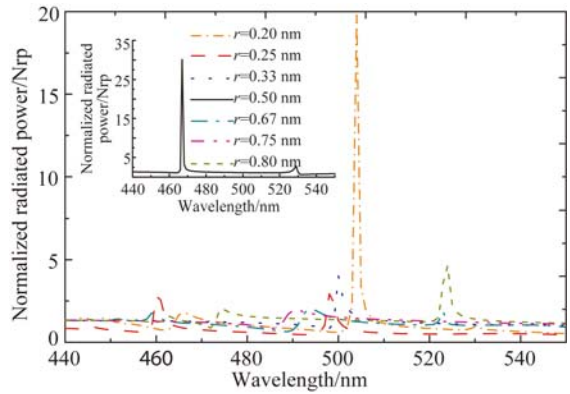
图 4 电场分布

Fig. 4 Distribution of electric field

3.3 占空比 r

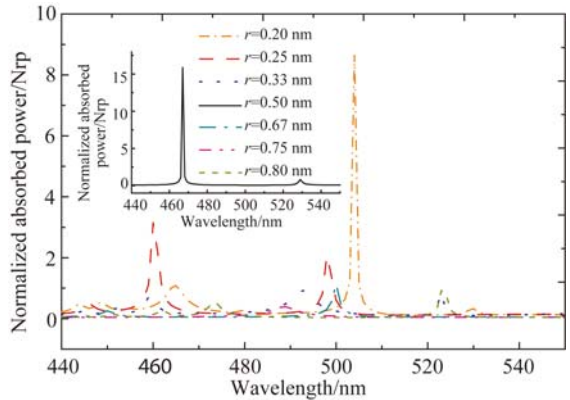
将周期固定为 270 nm,ITO 薄膜厚度固定为 55 nm,当占空比不同时($r=0.2, 0.25, 0.33, 0.5, 0.67, 0.75, 0.8$)发光效率在 440~520 nm 波段有明显增强,归一化辐射功率和归一化吸收功率随波长的变化分别如图 5(a)和 5(b)所示。

图 5 中最明显的波峰分别产生于 $r=0.5, \lambda=456\text{ nm}$ 和 $r=0.2, \lambda=505\text{ nm}$ 的条件下,前者的归一化辐射功率提高近 30 倍,后者的归一化辐射功率虽也有提高(约 20 倍),但小于前者,故本文中未做讨论。对比图 5(a)和图 5(b)可知,占空比变化的情况下,归一化吸收功率的变化趋势虽依旧与归一化辐射功率保持良好的一致性,波峰出现的位置基本相同,但峰值大小不同。这一现象证明占空比能影响光逃逸角的变化,从而影响 LED 的光提取率。



(a) 归一化辐射功率随波长变化

(a) Variation of normalized radiated power with wavelength



(b) 归一化吸收功率随波长变化

(b) Variation of normalized absorption power with wavelength

图 5 $T=270\text{ nm}, d=55\text{ nm}$ 时占空比对 LED 模型发光效率的影响

Fig. 5 Effect of duty cycle on luminous efficiency of LED model with T of 270 nm and d of 55 nm

4 结 论

本文设计了一种利用 Ag 纳米光栅、ITO 过渡层和 p-GaN 光栅提高 LED 发光效率的新型结构。基于 COMSOL 有限元软件,深入研究了 ITO 厚度、光栅周期及占空比对 LED 发光效率的影响。仿真结果表明,归一化辐射功率和吸收功率的变化趋势一致。ITO 过渡层的厚度决定 LSP 的激发强度,进而影响发光效率,ITO 层厚度 d 超过一定范围后,LSP 激发程度逐渐减弱,发光效率逐渐降低。光栅周期可同时影响归一化的辐射功率和吸收功率的电场强度分布,且随着周期 T 的增加,波峰发生红移。占空比的变化会显著影响 LSP 与 QW 的有效耦合。当 ITO 厚度为 55 nm,光栅周期为 270 nm,占空比 r 为 0.5 时,LED 的发光效率达到最大,较普通 LED 提高了近 30 倍。双光栅结构的 LED 制作简单、加工成本低,有望应用于 GaN 基 LED 产品的生产中。

参考文献:

- [1] 赵会富, 刘华, 孙强, 等. 基于折射/全反射/反射/折射结构的 LED 准直系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):1472-1479.
ZHAO H F, LIU H, SUN Q, *et al.*. Design of RIXR LED collimate system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1472-1479. (in Chinese)
- [2] 胡晓龙, 齐赵毅, 黄华茂, 等. 基于谐振腔效应的近紫外垂直结构 LED 光萃取效率优化[J]. 发光学报, 2016, 37(7):836-844.
HU X L, QI ZH Y, HUANG H M, *et al.*. Optimization of resonant-cavity effect and photonic crystals structure for high light extraction efficiency UV-A vertical-structure LEDs [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(7):836-844. (in Chinese)
- [3] 王志斌, 张骞, 张健, 等. 基于表面等离子激元的双金属光栅结构提高 LED 光提取效率的研究[J]. 发光学报, 2013, 34(12):1624-1630.
WANG ZH B, ZHANG Q, ZHANG J, *et al.*. Improvement of LED light emitting efficiency by using double metal gratings [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(12):1624-1630. (in Chinese)
- [4] 陈依新, 汤益丹, 沈光地, 等. 表面为二维光子晶体结构的 AlGaInP 系发光二极管的研究[J]. 物理学报, 2010, 59(11):8083-8087.
CHEN Y X, TANG Y D, SHEN G D, *et al.*. Al-GaInP LED with surface structure of two-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(11):8083-8087. (in Chinese)
- [5] 张振明, 李康, 孔凡敏, 等. 采用银纳米圆盘阵列提高 LED 发光特性的研究[J]. 光学学报, 2012, 35(4): 0423001.
ZHANG ZH M, LI K, KONG F M, *et al.*. Study on improving light emitting efficiency of LED by using silver nanodisk array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 35(4): 0423001. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] SUNG J H, KIM B S, CHOI C H, *et al.*. Enhanced luminescence of GaN-based light-emitting diode with a localized surface plasmon resonance [J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, 86(4): 1120-1123.
- [8] LOZANO G, LOUWERS D J, RODRÍGUEZ S R K, *et al.*. Plasmonics for solid-state lighting: enhanced excitation and directional emission of highly efficient light sources [J]. *Light Science & Applications*, 2013, 2(5):e66.
- [9] OKAMOTO K, NIKI I, SHVARTSER A, *et al.*. Surface plasmon enhanced bright light emission from InGaN/GaN [J]. *Physica Status Solidi*, 2007, 204(6):2103-2107.
- [10] DREZET A, PRZYBILLA F, LAUX E, *et al.*. Opening the light extraction cone of high index substrates with plasmonic gratings: Light emitting diode applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(2):021101.
- [11] LIN C H, TU C G, CHEN H S, *et al.*. Vertical light-emitting diodes with surface gratings and rough surfaces for effective light extraction [J]. *Optics Express*, 2013, 21(15):17686-17694.
- [12] 陈泳屹, 秦莉, 佟存住, 等. 用于光束整形的表面等离子体双光栅结构[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6):1461-1468.
CHEN Y Y, QIN L, TONG C ZH, *et al.*. Dual gratings based on surface plasmons for optical beam shaping [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1461-1468. (in Chinese)
- [13] 胡金勇, 黄华茂, 王洪, 等. ITO 表面粗化提高 GaN 基 LED 芯片出光效率[J]. 发光学报, 2014, 35(5):613-617.
HU J Y, HUANG H M, WANG H, *et al.*. Light-output enhancement of GaN-based light-emitting diodes with surface textured ITO [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(5): 613-617. (in Chinese)
- [14] 赵亚丽, 马富花, 江波, 等. ITO/Ag 光子晶体薄膜的制备及性能[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6):1516-1522.
ZHAO Y L, MA F H, JIANG B, *et al.*. Preparation and properties of ITO/Ag photonic crystal thin films [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1516-1522. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] BIEHS S A, AGARWAL G S. Dynamical quantum theory of heat transfer between plasmonic nanosystems [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(3):700-707.

- [17] GAO W L, SHU J, QIU C Y, *et al.*. Excitation of plasmonic waves in graphene by guided-mode resonances [J]. *ACS Nano*, 2012, 6 (9): 7806-7813.
- [18] SRIVASTAVA S K, VERMA R, GUPTA B D. Theoretical modeling of a self-referenced dual mode SPR sensor utilizing indium tin oxide film [J]. *Optics Communications*, 2016, 369:131-137.

作者简介:



李志全(1954—),男,黑龙江肇东人,博士,教授,博士生导师,2001年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事非线性光电检测技术和光学微纳米结构特性方面的研究。E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

通讯作者:



王聪(1990—),女,河北衡水人,硕士研究生,2013年于河北农业大学获得学士学位,主要从事光学微纳米结构特性方面的研究。E-mail: 904291668@qq.com