

基于正弦微纳光栅的反射式表面 等离子增强型 GaN-LED

张洪酥¹ 朱 钧^{1,*} 朱振东^{1,2} 李群庆³ 金国藩¹

¹清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084
(²清华大学清华-富士康纳米技术研究中心, 北京 100084; ³清华大学物理系, 北京 100084)

摘要 以中心波长为 650 nm 的氮化镓 LED 外延片为研究对象, 提出了一种反射式表面等离子增强型 LED 来提高其发光效率。该结构包含依次覆盖在正弦起伏的 p 型 GaN 层上的一层低折射率的 SiO₂ 膜与一层 Ag 膜。银膜用来增强内量子效率, 而 SiO₂ 层能进一步提高 GaN 层上表面的反射率, 同时通过优化蓝宝石衬底的厚度使得 GaN 层下方的透射率较高, 从而得到了较大的发光效率。

关键词 光学器件; 微纳光子学; 表面等离子体增强型 LED; 微纳光栅; GaN LED

中图分类号 TN312.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.042302

Bottom-Emitting Surface-Plasmon-Enhanced GaN-LED Based on the Sinusoidal Nano-Gratings

Zhang Haosu¹ Zhu Jun¹ Zhu Zhendong^{1,2} Li Qunqing³ Jin Guofan¹

¹ State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tsinghua University, Beijing 100084, China

² Tsinghua-Foxconn Nanotechnology Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China

³ Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract We investigate the GaN-LED epitaxial wafers whose central wavelength is 650 nm and propose a kind of bottom-emitting surface-plasmon-enhanced LED to improve its emission efficiency. This LED includes a SiO₂ layer of low refractive index and a silver film coated on the sinusoidal wavy-patterned p-GaN layer in sequence. The Ag film is used to enhance the internal quantum efficiency and the SiO₂ layer is employed to further improve the reflectivity of the upper surface of GaN-layer. And the transmissivity through the sapphire substrate whose thickness is optimized is very high. The emission efficiency of this structure is raised greatly.

Key words optical device; micro/nano photonics; surface-plasmon-enhanced LED; nano-grating; GaN LED

OCIS codes 230.3670; 240.6680; 250.5230; 050.1950; 230.7370

1 引 言

氮化镓 LED 因其具有体积小、耗电低、寿命长和节能环保等优点得到了广泛的应用, 成为固体照明领域内的主力军^[1,2]。然而它的发光效率还有很大的提升空间, 提高其发光效率是十分有意义的工作。LED 的发光效率主要取决于萃取率与内量子效率。一方面, 由于氮化镓的折射率($n_{\text{GaN}} \approx 2.5$)远大于空气的折射率($n_{\text{air}} = 1.0$), 所以光从氮化镓中透射到空气中时临界角很小(约为 23.6°), 大部分光无法透射到空气中, 这使得其萃取率较低。借助于光栅与光子晶体等微纳结构的衍射或散射, 可以大大提升萃取率^[3~6]。另一方面,

收稿日期: 2013-01-04; **收到修改稿日期**: 2013-01-23; **网络出版日期**: 2013-04-01

作者简介: 张洪酥(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事微纳光学和 LED 等方面的研究。

E-mail: zhanghs08@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 金国藩(1929—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事光学仪器、应用光学、精密测试技术与光学信息处理等方面的研究。E-mail: jgf-dpi@mail.tsinghua.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: j_zhu@mail.tsinghua.edu.cn

在室温下,红光氮化镓 LED 的内量子效率比较低。要增加内量子效率通常依靠提高 GaN 材料生长品质等方法,但这一类方法一般成本较高^[1,2]。最近有很多研究表明利用金属薄膜所支持的“表面等离激元”(SPP)电磁场模式与 LED 中偶极子的相互耦合作用,可以大大提升内量子效率^[8~13]。本文提出了一种基于正弦微纳光栅的反射式表面等离激元增强型氮化镓 LED 外延片。该外延片利用距离量子阱很近的金属微纳光栅来同时提高氮化镓 LED 的内量子效率、萃取率与 SPP 萃取率。

2 研究背景

对于 SPP 增强型 LED 器件,其发光效率 η'_{ext} 和内量子效率 η'_{int} 的表达式分别为

$$\eta'_{\text{ext}} = \frac{C_{\text{ext}}k_{\text{rad}} + C_{\text{SPP}}k_{\text{SPP}}}{k_{\text{rad}} + k_{\text{SPP}} + k_{\text{non-rad}}}, \quad (1)$$

$$\eta'_{\text{int}} = \frac{k_{\text{rad}} + k_{\text{SPP}}}{k_{\text{rad}} + k_{\text{SPP}} + k_{\text{non-rad}}} = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{int}}}{F_{\text{P}}}, \quad (2)$$

式中 k_{SPP} 为偶极子与 SPP 的耦合速率; k_{rad} 为偶极子的辐射复合速率; $k_{\text{non-rad}}$ 为偶极子的非辐射复合速率; C_{ext} 为萃取率; C_{SPP} 为 SPP 萃取效率,即定量描述有多少 SPP 耦合成为远场辐射光波用于照明; $\eta_{\text{int}} = k_{\text{rad}} / (k_{\text{rad}} + k_{\text{non-rad}})$ 是没有任何覆盖层及任何微纳结构的传统 LED 的内量子效率; $F_{\text{P}} = (k_{\text{rad}} + k_{\text{SPP}} + k_{\text{non-rad}}) / (k_{\text{rad}} + k_{\text{non-rad}})$ 被定义为 Purcell 增强因子,用来定量描述内量子效率增强效应^[8~11]。

从(1)式可以看出,当 Purcell 增强因子 F_{P} 、萃取率 C_{ext} 和 SPP 萃取率 C_{SPP} 都很大时,这种 LED 将具有较高的发光效率^[8~10]。对于 F_{P} 来说,当金属膜与量子阱中的偶极子距离在几十纳米以内时,SPP 与偶极子的耦合作用明显, F_{P} 将会达到一个很大的值^[8~11,14]。从(2)式可以看出,利用这种方法可以将 LED 的内量子效率大大提升。对于 C_{SPP} 来说,在无微纳结构的普通 LED 中,依靠界面的粗糙起伏, C_{SPP} 仅能达到 5%~10%^[11,15~17];利用光栅等微纳结构,理论与实验都证明 C_{SPP} 可以达到约 80%^[15,16]。微纳结构的衍射或散射同样也可以提高 C_{ext} 。因此,本文提出利用多层微纳光栅结构来同时提高 LED 的内量子效率、萃取率与 SPP 萃取率。该结构包含依次覆盖在正弦起伏的 p 型 GaN 层上的一层介质膜与一层金属薄膜。其中与量子阱距离在几十纳米以内的金属膜用于电场的增强来提升内量子效率,插入在金属膜与半导体层之间的低折射率介质膜可以抑制金属膜对光的吸收从而进一步提升萃取率 C_{ext} 和 SPP 萃取率 C_{SPP} 。

本文选择的原始样片及反射式样片的示意图如图 1(a)和(b)所示,假设它们的中心波长为 650 nm。图 1(a)所示的原始样片是一种典型的单量子阱 GaN-LED 外延片结构。其结构从下至上依次为数百微米厚的蓝宝石衬底,350 nm 厚的 n 型 GaN 层,几纳米厚的 InGaIn 单量子阱和 200 nm 厚的 p 型 GaN 层。传统的 GaN-LED 中,蓝宝石层最底部以上数百微米厚的一层是不透明的。本文设计的反射式结构需要对蓝宝石衬底进行抛光处理,然后利用包含银膜的微纳光栅来同时提高内量子效率、萃取率和 SPP 萃取率。进一步的研究表明在金属薄膜与 GaN 之间插入 SiO_2 ($n_{\text{SiO}_2} \approx 1.5$) 一类的低折射率介质膜,可以降低金属膜对光及 SPP 的吸收,从而进一步提升 C_{ext} 和 C_{SPP} ^[18,19]。设计的正弦光栅 LED 如图 1(b)所示:在 p 型 GaN 层上刻蚀出正弦面型光栅后,覆盖一层厚度经过优化的 SiO_2 薄膜与银膜。该 LED 的制作基于抛光、纳米压印、蒸发与沉积等基本的微纳工艺,加工成本低。

这种反射式结构的优势在于银膜可以同时增大内量子效率与底部出射的萃取率。而在透射式结构中,银膜虽然会增强内量子效率,但会因为对光的吸收造成顶部出射的萃取率大大减小^[8~11]。

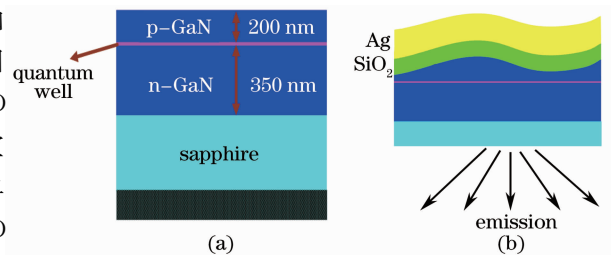


图 1 样片示意图。(a) 原始样片,蓝宝石层内下方深色部分表示不透明层;(b) 反射式样片,蓝宝石衬底经过了抛光处理,并且通过优化其厚度用于提高透光率

Fig. 1 Diagram LED chips. (a) Naked sample. The dark-colored layer represents the opaque bottom of the sapphire substrate. (b) bottom-emitting sample. The sapphire substrate has been polished and its thickness is optimized to enhance its transmission

3 理论分析

3.1 计算模型及结构参数

在此结构中,当 GaN 层上表面的反射率与穿透蓝宝石衬底的透射率都较大时,就有较高的萃光率和 SPP 萃取率。LED 的量子阱(QW)区域产生的光波具有不同的波长和不同的出射角。这里,假定不同角度的波长为 650 nm 的平面波入射到 GaN 层的上、下表面,来对 LED 结构的光学特性进行分析。需要指出的是,只有以小于 23.6° 的入射角入射到 GaN 下表面的光波才可能透射到底部的空气中。因此,分析正弦光栅的衍射特性时,主要分析其衍射角小于 23.6° 的各个衍射级次的衍射效率,这些级次的总衍射率效率越高意味着萃光率越高。下面来讨论各个结构参数。

此结构中,需要确定的参数有正弦光栅的槽深(h)与周期(p),量子阱至 SiO_2 层最底部的距离(d), SiO_2 层的厚度(t_{SiO_2}),Ag 层的厚度(t_{Ag})以及蓝宝石衬底的厚度(t_{sap})。选择 $d=20$ nm 以保证偶极子与 SPP 较强的耦合作用来得到较高的内量子效率。一般情况下, t_{SiO_2} 越大 GaN 层上表面的反射率越大,但当 t_{SiO_2} 达到数百纳米时又会使得 Purcell 增强因子 F_P 过小,导致几乎没有内量子效率的增强^[18,19],综合考虑反射率与 Purcell 增强因子,选择 $t_{\text{SiO}_2}=30$ nm。在可见光波段,SPP 在金属 Ag 内的趋肤深度为 $40\sim 50$ nm。当 t_{Ag} 略大于此值时,一方面,由于较厚的银膜使得 LED 顶部几乎无透射光,GaN 层上表面的反射率趋于它的上限值;另一方面,由于较厚的银膜与量子阱具有更强的耦合作用,Purcell 增强因子也接近于其上限值^[8]。当 t_{Ag} 远大于该趋肤深度时,反射率与 Purcell 增强因子几乎饱和,不再增加,所以选择 $t_{\text{Ag}}=50$ nm 来增加 LED 的发光效率。由于蓝宝石的折射率(n_{sap})近似满足它作为增透膜的条件 $n_{\text{sap}} \approx (n_{\text{air}} n_{\text{GaN}})^{1/2}$,把 t_{sap} 定为增透的最优厚度: $t_{\text{sap}} = \lambda / (4n_{\text{sap}}) \approx 100$ nm($\lambda=650$ nm, $n_{\text{sap}}=1.76$)。这个厚度可以通过控制抛光蓝宝石的工艺参数来实现。

周期 p 和槽深 h 对衍射角小于 23.6° 的各衍射级次的总反射率影响较大,下面将研究它们的变化对光栅衍射行为的影响。

本文另外选择了一个无任何微纳结构的 LED 作为参考样品与正弦光栅 LED 进行对比分析。该参考样品为一个多层平板结构,各层从下至上依次为:厚度为 100 nm 的蓝宝石层,350 nm 的 n 型 GaN 层,量子阱层,60 nm 的 p 型 GaN 层,30 nm 的 SiO_2 层和 50 nm 的 Ag 膜。下面将通过计算,确定光栅结构较优的槽深(h_{opt})和周期(p_{opt}),并给出计算结果的分析与比较。

GaN 层上表面反射率的计算模型如图 2(a)所示。利用基于 C(Chandezon)方法的计算软件“Delta”^[20~22],研究了周期和槽深对光栅衍射行为的影响,计算中 Ag 的折射率采用实验测量的数值^[23]。针对周期在 $50\sim 1000$ nm 范围内,槽深在 $10\sim 120$ nm 范围内的大量正弦光栅进行计算。计算中周期的步长设为 50 nm,槽深的步长设为 5 nm。计算结果表明周期为 200 nm,槽深为 80 nm 时,光栅中衍射角小于 23.6° 的各级次的反射率较高,所以得到 $p_{\text{opt}}=200$ nm, $h_{\text{opt}}=80$ nm。光栅的各个结构参数标注在图 2(a)中,此情形下该光栅只有 0 级(R_0)与 -1 级(R_{-1})两个反射级次,入射角(θ)与衍射角(θ'),0 级与 -1 级反射级次如图 2(a)所示。

正弦光栅与平板结构的 TM 及 TE 偏振态的 0 级反射率的计算结果如图 2(b)所示。正弦光栅 LED 的 TM 及 TE 偏振态的 -1 级反射率的计算结果如图 2(c)所示。当入射角 θ 在 $64^\circ\sim 89.9^\circ$ 的范围内,其 -1 级反射级次的衍射角 θ' 在 $17.5^\circ\sim 23.6^\circ$ 的范围内。对于 TE 偏振态来讲,正弦光栅与平板结构有几乎相同的 0 级反射率,也就是对小角度的光有几乎一样的萃光率,对入射角大于 64° 的光依靠光栅的 -1 级反射有一定的萃取率,而没有微纳结构的 LED 无法萃取任何入射角大于 23.6° 的光。对于 TM 偏振态来讲,正弦光栅仅在入射角在 $17^\circ\sim 23.6^\circ$ 的小范围内 0 级反射率相对平板结构有较大差距,但对入射角大于 64° 的光依靠光栅的 -1 级反射有较高的萃取率。这些显示出了正弦光栅相对于平板结构在萃光方面的优势。

正弦光栅和平板结构 LED 的底部透射率计算模型如图 2(d)所示。GaN 层底部透射率的计算结果如图 2(e)所示,图中给出了入射角 θ 与折射角 θ' 。从该图中可观察到,由于蓝宝石衬底的增透作用,当入射角 $\theta < 20^\circ$ 时,TM 和 TE 偏振态的底部透射率分别在 95% 和 90% 以上。这意味着以小角度入射到下表面的光几乎可以全部被萃取到下方的空气中。

利用下式估算被上表面反射后透射到下方空气中的光的萃取率:

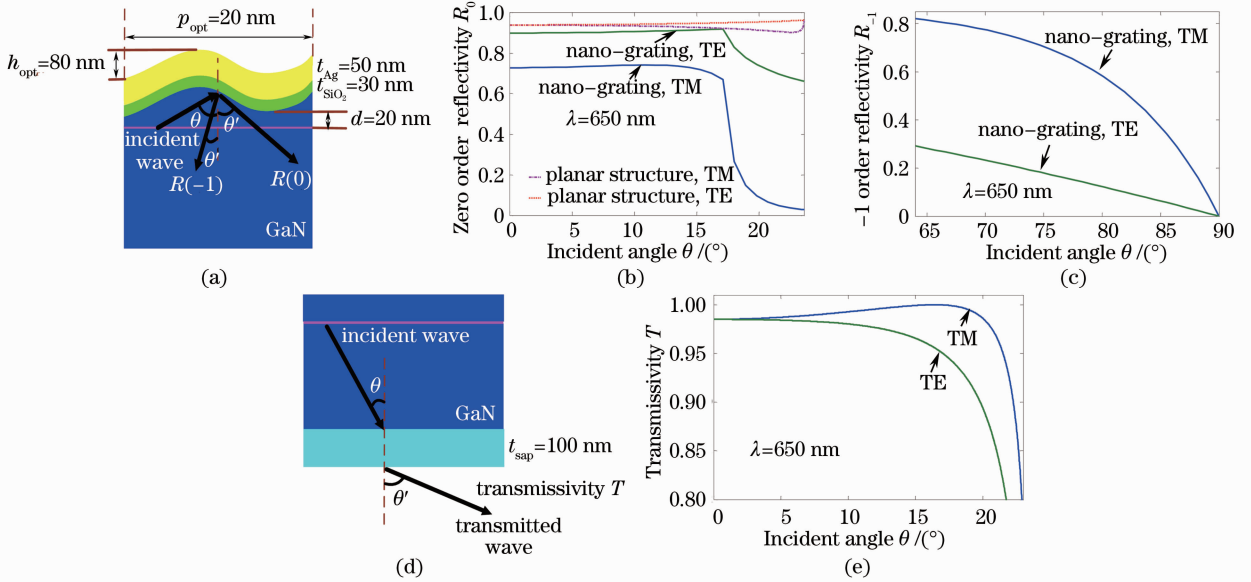


图 2 (a) 计算正弦光栅的 GaN 层上表面反射率的模型；(b) 正弦光栅和平板结构中 TM 及 TE 偏振态的 0 级反射率；(c) 正弦光栅中 TM 及 TE 偏振态的 -1 级反射率；(d) 计算底部透射率的模型；(e) 不同入射角的 TM 及 TE 偏振态的底部透射率计算结果

Fig. 2 (a) Model used in the calculativity of reflection on the upper surface of GaN layer in the sinusoidal grating; (b) calculated TM and TE polarized 0th order reflectivity versus incident angle θ in sinusoidal grating and planar structure; (c) calculated TM and TE polarized -1st order reflectivity versus incident angle θ in sinusoidal grating; (d) model used in the calculation of transmissivity through the sapphire layer; (e) calculated TM and TE polarized transmissivity versus incident angle θ

$$C_{\text{ext}} \approx \int_0^{23.6^\circ} R_0(\theta) T(\theta'_0) \sin \theta d\theta + \int_{64^\circ}^{89.9^\circ} R_{-1}(\theta) T(\theta'_{-1}) \sin \theta d\theta, \quad (3)$$

式中 θ'_0 与 θ'_{-1} 分别表示 0 级与 -1 级反射级次的衍射角。对于正弦光栅 LED, 其 TM 与 TE 光的萃取率分别为 17% 与 14%; 对于平板 LED, 其 TM 与 TE 光的萃取率分别为 12% 与 11%。正如前面的分析, 由于光栅结构可以萃取大角度的光, 其萃取率相对平板结构有一定的提升。

3.2 反射式结构的 SPP 导模的近场分布

下面计算 SPP 导模的近场分布来定性分析 Purcell 效应。为了提高模拟仿真的精度, 此处的计算模型考虑了 GaN 层的厚度, 假设波长为 650 nm 的光波从下方无穷厚的空气中入射来研究这种多层光栅的 SPP 导模的特性。计算模型的示意图如图 3(a) 所示。利用“Delta”软件计算 TM 偏振态下随入射角变化的 0 级反射率, 结果如图 3(b) 所示。该图表明两个 SPP 共振角分别为 55° 和 79.5° , 把它们分别记为 SPP(1) 和 SPP(2)。

根据已知的共振角, 利用基于有限元法 (FEM) 的模拟软件“COMSOLTM-RF Module”得到了 SPP 共振处的电场强度的空间分布^[24]。SPP(1) 和 SPP(2) 共振处的电场振幅分布分别如图 3(c) 和 (d) 所示。从这两幅图中可见, 该结构的 SPP(1) 和 SPP(2) 共振时, 量子阱处电场强度的平均增强约为 630 倍与 540 倍, 这意味着 SPP 与量子阱会有较强的相互耦合^[8~10]。并且正如图 3(b) 所表明的, SPP(1) 对应的反射率低谷比 SPP(2) 的更深更窄, 说明 SPP(1) 共振更剧烈, 电场增强效应更明显。但是 SPP(2) 共振的半峰全宽比 SPP(1) 的大, 这意味着入射角为 $75^\circ \sim 85^\circ$ 的光都可以与 SPP(2) 发生耦合作用, 而只有入射角为 $54^\circ \sim 57^\circ$ 小范围内的光才可以与 SPP(1) 发生耦合作用。从图 3(c) 和 (d) 还可观察到, SPP(1) 与 SPP(2) 模式的电场主要集中在低折射率的 SiO₂ 层中, 这意味着 SiO₂ 层改善了 SPP 模式的场分布, 减小了 SPP 沿界面传播时的热损耗, 从而提高了 SPP 萃取率^[18,19]。对于作为参考样片的平板结构, 同样计算了波长为 650 nm 的光波从下方空气中以 55° 和 79.5° 入射时的电场振幅分布, 如图 3(e) 和 (f) 所示。从这两幅图中可观察到, 由于没有发生 SPP 共振, 量子阱处电场强度的平均增强约为 320 倍与 240 倍。并且, 由于没有发生 SPP 共振, 电场也没有

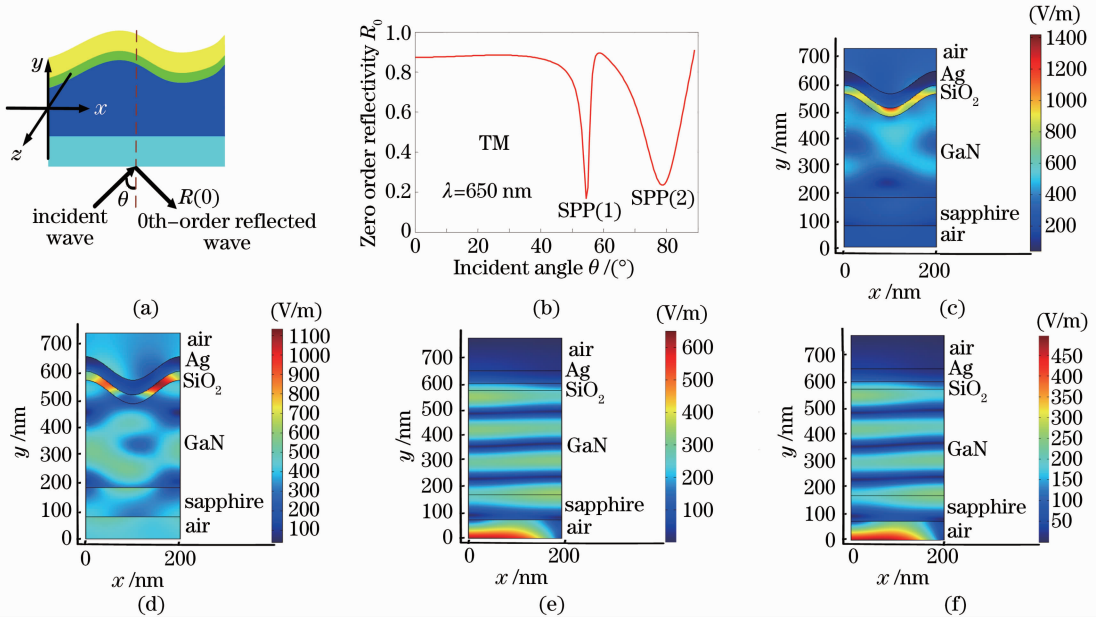


图3 (a) 计算正弦光栅的 SPP 共振角的模型;(b) 波长 650 nm、TM 偏振态下的 0 级反射率;(c) 光栅结构中 SPP(1)共振处的电场振幅分布;(d) 光栅结构中 SPP(2)共振处的电场振幅分布;(e) 平板结构中入射角为 55° 时的电场振幅分布;(f) 平板结构中入射角为 79.5° 时的电场振幅分布

Fig. 3 (a) Model utilized in the calculation of SPP resonance angles in the sinusoidal grating; (b) calculated TM-polarized zero-order reflectivity versus incident angle at the 650 nm wavelength; (c) magnitude distribution of the electric field at SPP(1) resonance in the nano-grating; (d) magnitude distribution of the electric field at SPP(2) resonance in the nano-grating; (e) magnitude distribution of the electric field at the 55° incident angle in the planar structure; (f) magnitude distribution of the electric field at the 79.5° incident angle in the planar structure

被局限在 SiO_2 层中。

在正弦光栅 LED 中,SPP(1)和 SPP(2)这两个模式会被 GaN 层内入射角分别为 16.1° 和 19.0° 的光波所激发。这两个角度附近的光波通过与 SPP 相互耦合作用提高了内量子效率,同时 SPP 可以被光栅散射出来用于照明,提高发光效率。

4 结 论

给出了基于正弦面型微纳光栅的反射式 SPP 增强型 LED 的结构优化及计算分析,为 LED 的设计加工提供了一定的理论分析依据。在通常的 LED 研究中往往只单独考虑内量子效率或萃取率,所以发光效率的提升有限。本文中的 LED 通过结构及参数的优化,其内量子效率、萃取率及 SPP 萃取率都有较大的提升,故发光效率提升较大。该 LED 的制作简单而且加工成本低,因此该结构有望应用于氮化镓 LED 产品的生产制作中。

参 考 文 献

- 1 S. Nakamura, S. F. Chichibu, Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes[M]. London: Taylor & Francis, 2000
- 2 史光国. 半导体发光二极管及固体照明[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- 3 Dong-Ho Kim, Chi-O Cho, Yeong-Geun Roh *et al.*. Enhanced light extraction from GaN-based light-emitting diodes with holographically generated two-dimensional photonic crystal patterns[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(20): 203508
- 4 Liu Hongwei, Kan Qiang, Wang Chunxia *et al.*. Light extraction enhancement of GaN LED with a two-dimensional photonic crystal slab[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(5): 054216
- 5 Hongwei Liu, Qiang Kan, Chunxia Wang *et al.*. Light extraction of GaN LEDs with 2-D photonic crystal structure[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(10): 918~910
- 6 Xiaomin Jin, Bei Zhang, Tao Dai *et al.*. Optimization of top polymer gratings to improve GaN LEDs light transmission[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 788~790
- 7 B. Monemar, J. P. Bergman, G. Pozina *et al.*. Carrier and exciton dynamics in $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ multiple quantum well

- structures[C]. *SPIE*, 1999, **3624**: 168~178
- 8 A. Neogi, C. -W. Lee, H. O. Everitt *et al.*. Enhancement of spontaneous recombination rate in a quantum well by resonant surface plasmon coupling[J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **66**(15): 153305
- 9 I. Gontijo, M. Borodisky, E. Yablonvitch *et al.*. Coupling of InGaN quantum-well photoluminescence to silver surface plasmons[J]. *Phys. Rev. B*, 1999, **60**(16): 11564~11567
- 10 K. Okamoto, I. Niki, A. Scherer *et al.*. Surface plasmon enhanced spontaneous emission rate of InGaN/GaN quantum wells probed by time-resolved photoluminescence spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(7): 071102
- 11 K. Okamoto, I. Niki, A. Shvartser *et al.*. Surface-plasmon-enhanced light emitters based on InGaN quantum wells[J]. *Nature Mater.*, 2004, **3**(9): 601~605
- 12 Yan Jie, Wang Pei, Lu Yonghua *et al.*. Process of enhanced emission of light-emitting diode using surface plasmons[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2009, **26**(1): 1~9
阎杰, 王沛, 鲁拥华等. 利用表面等离子体增强发光二极管发光效率的研究进展[J]. *量子电子学报*, 2009, **26**(1): 1~9
- 13 Lin Yannan. The Study of Luminescence Efficiency of InGaN MQWs by using with Micron Metal Grating[D]. Tai Wan: Tai Wan National University, 2007
林彦男. 微米金属光栅对氮化镓多重量子阱发光效率之研究[D]. 台北: 台湾中央大学, 2007
- 14 Heinz Raether. Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings[M]. New York: Springer-Verlag, 1988
- 15 John Morland, Arnold Adams, Paul K. Hansma. Efficiency of light emission from surface plasmons[J]. *Phys. Rev. B*, 1982, **25**(4): 2297~2300
- 16 John M. Lupton, Benjamin J. Matterson, Ifor D. W. Samuel *et al.*. Bragg scattering from periodically micro-structured light emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(21): 3340~3342
- 17 P. K. Hansma. Tunneling Spectroscopy: Capabilities Applications and New Techniques[M]. P. K. Hansma (ed.) New York: Plenum, 1982. Chapter 5
- 18 Kun-Ching Shen, Cheng-Yen Chen, Che-Hao Liao *et al.*. Enhancement of polarized light-emitting diode through surface plasmon coupling generated on a metal grating[C]. OSA/ACP Conference, 2009. TuN5
- 19 Yen-Cheng Lu, Yung-Sheng Chen, Fu-Ji Tsai *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]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(23): 233113
- 20 Li Lifeng. A User's Guide to DELTA (Version 1.4): A Computer Program for Modeling Planar, One-Dimensionally Periodic, Multilayer-Coated, Diffraction Gratings[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993
- 21 J. Chandezon, M. T. Dupuis, G. Cornet *et al.*. Multicoated gratings: a differential formalism applicable in the entire optical region[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(7): 839~846
- 22 J. Chandezon, D. Maystre, G. Raoult. A new theoretical method for diffraction gratings and its numerical application[J]. *J. Opt. (Paris)*, 1980, **11**(4): 235~241
- 23 Marvin J. Weber. Handbook of Optical Materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003
- 24 中仿科技公司. COMSOL 介绍与技术资料. cntech.com.cn