

纳米光栅的表面等离激元增强型 GaN-LED

李志全, 刘同磊, 白兰迪, 谢锐杰, 岳中, 冯丹丹, 顾而丹

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为提高传统 GaN 基 LED 的发光效率, 提出了一种基于纳米光栅结构的透射式表面等离激元增强型 GaN-LED。该增强型 LED 包含覆盖在 p 型 GaN 光栅槽内的低折射率 SiO₂ 膜、Ag 膜以及槽表面的 ITO 薄膜。详细阐述了该结构增强 LED 发光特性的基本原理, 利用基于有限元法的模拟软件“COMSOL™-RF Module”对该结构进行参数优化和数值模拟分析。研究表明, 在周期 $p=280$ nm, 占空比 $f=0.5$, SiO₂ 层的厚度 $d_{\text{SiO}_2}=25$ nm, 银层的厚度 $d_{\text{Ag}}=15$ nm, ITO 层的厚度 $d_{\text{ITO}}=30$ nm 时, 该结构在可见光范围内具有较高的传输效率, 其零阶透射率高达 0.716, 零阶反射率为 0.224, -1 阶透射率峰值 0.183, 且 Purcell 因子增强了近 16.4 倍。该结构可以同时提高 GaN 基 LED 的内量子效率、光萃取效率和 SPP 萃取效率。

关键词: 光学器件; 发光二极管; 有限元法; 纳米光栅; 表面等离激元

中图分类号: TN312.8 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0920005

Surface-plasmon-enhanced GaN-LED based on nano-grating

Li Zhiquan, Liu Tonglei, Bai Landi, Xie Ruijie, Yue Zhong, Feng Dandan, Gu Erdan

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to improve the luminous efficiency of conventional GaN-LED, a transmissive surface plasmon enhanced GaN-LED based on nano-grating was proposed. The enhanced LED included a low refractive index SiO₂ film and a Ag film in the p-GaN grating slot, and the top layer ITO film. The basic principle of improving LED emission characteristics for this new structure was described in detail, and with simulation software "COMSOL™-RF Module" based on the finite element method, the parameter optimization and numerical simulation analysis for the structure were studied. The results show that when the period $p=280$ nm, the duty ratio $f=0.5$, $d_{\text{SiO}_2}=25$ nm, $d_{\text{Ag}}=15$ nm, $d_{\text{ITO}}=30$ nm, the transmission efficiency of the structure is higher in the visible range, and the 0th order transmittance is 0.716, the 0th order reflectivity is 0.224, the peak of the -1st order transmittance is 0.183, with Purcell factor enhancing nearly 16.4 times. The internal quantum efficiency, light extraction efficiency and SPP extraction efficiency can be improved simultaneously in this new GaN-LED.

Key words: optical devices; light emitting diode; finite element method; nano-grating; surface plasmons

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-05-03

基金项目: 河北省自然科学基金(F2017203316)

作者简介: 李志全(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事非线性光电检测及微纳米结构光学性能方面的研究。

Email: lzq54@ysu.edu.cn

0 引言

氮化镓基发光二极管(Light emitting diode, LED)具有体积小、效率高、寿命长、可靠性强等传统光源不及的优点^[1],随着研究的不断深入,越来越受到人们的重视。近年来,氮化镓基 LED 在全彩显示、光通信、固态照明等领域得到了广泛的应用^[2-3]。但现行 LED 的发光效率仍具有很大的可提升空间,改善 LED 发光性能成为 LED 制作及应用的研究热点。

目前限制氮化镓基 LED 发光效率的两个主要因素分别为光萃取效率和内量子效率^[4-5]。一方面,由于 GaN 材料的折射率远大于自由空间中空气的折射率,致使光从 GaN 层透射到空气中的临界角很小(约 23.5°),大于临界角的大部分光被反射回 GaN 内部,产生热量。这不仅降低了 LED 的光萃取效率,且使 LED 长期处于高温工作状态,缩短其使用寿命。可借助光子晶体^[6-7]、表面粗化^[8-9]和纳米光栅^[10-11]等微纳结构的衍射或散射行为,以提升 LED 的光萃取效率。另一方面,由于高密度的位错缺陷、晶格失配以及量子局限斯塔克效应的影响,导致 GaN-LED 在室温下的内量子效率比较低。一般通过提高材料的生长品质等方法来增加 LED 的内量子效率,但这种方法成本较高,且技术难度大。

近期研究表明,利用金属和介质产生的“表面等离极化激元”(Surface plasmon polaritons, SPP)的电磁场模式与 LED 中量子阱(Quantum well, QW)的相互耦合作用,可以大大提升其内量子效率。然而,在由单一金属层覆盖的微纳米结构 LED 中,存在三个主要问题^[11]:(1) 金属层的衰减全反射和吸收损耗较大,导致 LED 的顶层光萃取效率非常低;(2) 金属层和介质表面产生的 SPP 提取效率非常低;(3) 金属膜两侧材料折射率的不对称分布导致光在金属膜中的传输效率低,且交界面处的表面等离子体模式被破坏。这三个问题一直限制着表面等离激元 LED 发光效率的提高。可通过在金属层表面添加一层高折射率材料,形成拟对称波导结构来解决这些问题。另有研究表明在金属层和 GaN 层中间插入一种低折射率介质层可以大大提高 SPP 的萃取效率^[12]。

文中提出了一种基于微纳光栅的透射式表面等离激元增强型 LED。该结构包含一层低折射率 SiO₂

层,一层金属银层和具有较高折射率的 ITO 层,均匀地覆盖在图案化的 p-GaN 层上。其中金属层用来维持表面等离子体的产生和传输,进而提高其内量子效率。ITO 和 SiO₂ 层的存在,使银薄膜表面产生较强的 SPP 效应,进而使薄膜两侧的表面等离激元与量子阱强烈耦合,产生远场辐射模式。同时 SiO₂ 层的存在可抑制 SPP 的吸收损耗,这样光萃取效率和 SPP 萃取效率可以被进一步提高。

1 理论基础与结构模型

1.1 表面等离激元耦合机理

文中构建的 LED 模型提供了两种表面等离激元耦合机制,一种是 GaN 光栅和银光栅提供了周期性结构,在外加电磁场作用下,周期性结构会造成特定波长的极化电子振荡^[13],其产生的电磁场可为入射光提供额外的 Δk_x 值,从而能够激发等离激元共振,如图 1 所示。色散关系可以由公式(1)表示。

$$k \sin \theta \pm n g = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} = k_{sp} \quad (1)$$

式中: $k \sin \theta$ 为入射光的水平波向量,其中光栅 Bragg 向量 $g=2\pi/\Lambda$, Λ 为光栅周期; n 为衍射级次; ϵ_1 、 ϵ_2 分别为空气和金属银的介电系数。

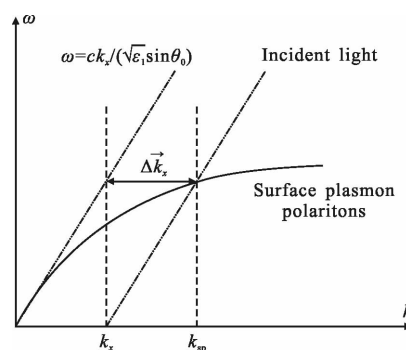


图 1 光栅结构激发 SPPs 色散变化曲线

Fig.1 Dispersion transformation curve of SPPs excited by grating

另一种耦合机制是利用 GaN 内部产生全反射消逝波(ATR)来激发表面等离激元^[14],如图 2 所示。GaN 的介电系数大于 1,当光以大于全反射角的角度出射时,在 GaN 的上表面会发生全反射,紧邻全反射界面将有一部分消逝波穿透到银膜下表面,消逝波的水平波向量 k_x 与表面等离激元的波向量 k_{sp} 耦合时,即可激发银膜下表面的等离激元共振^[15]。

可用公式(2)表示。

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_3} \sin\theta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} = k_{sp} \quad (2)$$

式中： ϵ_3 为 GaN 的介电系数。

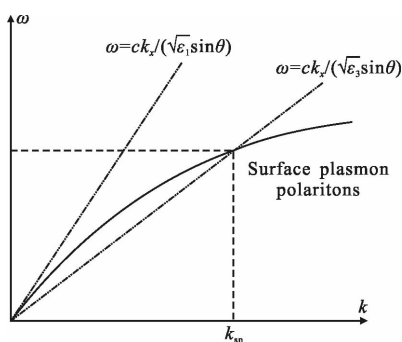


图 2 ATR 激发 SPPs 色散变化曲线

Fig.2 Dispersion transformation curve of SPPs excited by ATR

对于表面等离子体增强型 LED，其内量子效率 (η_{int}') 和外量子效率 (η_{ext}') 的关系表达式分别为：

$$\eta_{int}' = \frac{k_{rad} + k_{spp}}{k_{rad} + k_{spp} + k_{non-rad}} = 1 - \frac{1 - \eta_{int}}{F_p} \quad (3)$$

$$\eta_{ext}' = \frac{C_{ext} \cdot k_{rad} + C_{spp} \cdot k_{spp}}{k_{rad} + k_{spp} + k_{non-rad}} \quad (4)$$

式中： k_{rad} 和 $k_{non-rad}$ 分别表示电子/空穴对的辐射复合速率和非辐射复合速率； k_{spp} 表示量子阱与表面等离子体的耦合速率； C_{spp} 表示 SPP 的萃取效率； F_p 被定义为 Purcell 因子，表示内量子效率增强效应的量化。且 $F_p = (k_{rad} + k_{spp} + k_{non-rad}) / (k_{rad} + k_{non-rad})$ 。根据公式(3)和公式(4)，如果内量子效率 η_{int}' (或 F_p)，光萃取率效率 C_{ext} 和 SPP 萃取效率 C_{spp} 可以同时增大，那么 LED 的发光效率将会显著提高。

1.2 LED 结构模型

图 3(a)~(c) 分别为 LED 原始样片、多层矩形光栅样片 (Multilayer rectangular grating, MRG) 和单层矩形光栅样片 (Single layer rectangular grating, SRG) 的结构示意图，且其发射谱中心波长均为 460 nm。图 3(a) 为一种典型的单量子阱 GaN-LED 外延片结构，从下至上依次为蓝宝石衬底，350 nm 厚的 n 型 GaN 层，几纳米厚的 InGaN 单量子阱层和 200 nm 厚的 p 型 GaN 层。图 3(b) 为多层矩形光栅样片，其制作过程如下：首先对 p-GaN 层进行光栅刻蚀，刻蚀深度为 180 nm，周期为 p ，占空比 $f=0.5$ ；其次在 p-GaN 光栅槽内分别覆盖一层 25 nm 的 SiO_2 层和

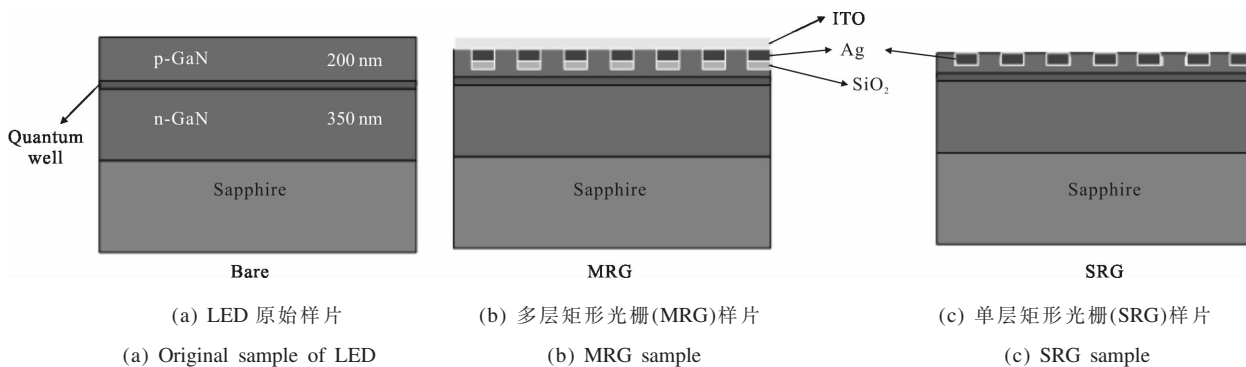


图 3 LED 结构模型

Fig.3 LED structure model

15 nm 的金属银层，将高于银膜表面的 p-GaN 层全部去除；最后，在其表面覆盖一层高折射率的 ITO 介质层，保证金属两侧折射率呈对称化分布，减少金属对 SPP 的损耗和吸收作用。ITO 具有高透射性，能够减少反射回 LED 内部的光，且具有电流扩展作用。为了验证金属两侧折射率对称化对 LED 发光效率的影响，加入 SRG 进行对比，如图 3(c) 所示。该结构中只加入一层 Ag 纳米光栅，其上表面为空气，下表面为 GaN，两侧介质折射率相差很大。

MRG-LED 的结构示意图如图 4 所示，由 QW

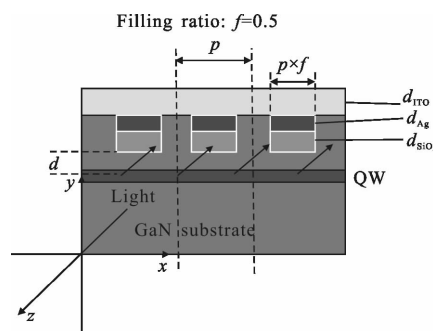


图 4 MRG-LED 结构示意图

Fig.4 Schematic illustration of the MRG-LED

区域产生的光波具有不同的波长和出射角, 定义出射光波与垂直方向的夹角为入射角 θ , 并假定 GaN 层的厚度为半无限大。光栅周期, 光栅占空比, SiO₂ 层底部到 QW 的距离, SiO₂ 层的厚度, 银层的厚度和 ITO 层的厚度分别定义为 $p, f, d, d_{\text{SiO}_2}, d_{\text{Ag}}$ 和 d_{ITO} 。

为确保 QW 中的偶极子能够与 SPP 有效耦合, 选择 SiO₂ 层底部到 QW 的距离 $d=20$ nm。一般情况下, d_{SiO_2} 越大, 光的反射率越大, 但 d_{SiO_2} 过小时, 会使 F_p 急剧减小, 不利于内量子效率的提高, 综合考虑反射率和 F_p , 选择 $d_{\text{SiO}_2}=25$ nm, 这样既保证 SPP 具有较高的萃取率, 又不会造成 Purcell 增强因子的急剧变化。银膜的厚度 d_{Ag} 选择 15 nm, 可以保证金属光栅较高的透射率和传输特性^[11]。同时定义光栅的占空比 $f=0.5$ 。

利用基于有限元法(Finite element method, FEM)的模拟软件“COMSOL™-RF Module”对文中提出的 LED 模型进行数值仿真, 应用参数化扫描功能分析该模型在横磁(Transverse magnetic, TM)模式和横电(Transverse electric, TE)模式下的零阶透射率、零阶反射率、-1 阶透射率随波长和入射角 θ 的变化规律, 进一步分析该 LED 模型结构下的 SPP 模式、Purcell 效应、电场分布情况以及归一化辐射功率和归一化吸收功率。在 p-GaN 底部边界设置散射边界条件模拟不同方向和不同波长的入射光, 入射光的波长记为 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 Floquet 周期性边界条件。GaN 的折射率为 2.5, 空气的折射率为 1, SiO₂ 和 ITO 的折射率来自数据手册^[16]。金属银的介电常数可以根据公式(5)进行计算。

$$\varepsilon_m(\lambda) = \varepsilon_{\text{nr}} + i\varepsilon_{\text{mi}} = \varepsilon_{\infty} - \frac{\lambda^2 \lambda_c}{\lambda_p^2 (\lambda_c + i\lambda)} \quad (5)$$

式中: λ 的单位为 m; λ_c 表示金属的共振波长; λ_p 表示金属的等离子体波长。对于金属 Ag: $\varepsilon_{\infty}=5.8, \lambda_p=1.454 \times 10^{-7}$ m, $\lambda_c=1.761 \times 10^{-6}$ m。

2 结果与讨论

2.1 周期优化

在可见光波段为得到最佳的传输特性, 设置初始条件为: $p=180$ nm, $f=0.5, d=20$ nm, $d_{\text{SiO}_2}=25$ nm, $d_{\text{Ag}}=15$ nm, $d_{\text{ITO}}=30$ nm。该光栅结构属亚波长纳米结

构, 有助于加强在可见光波段的零阶传输特性。所谓零阶传输特性是指当衍射级次为 0 时, 该结构的传输特性。设置入射角 θ 为 0° , 即入射光从底部垂直向上入射。设置 p 为自变量, 利用商业软件“COMSOL™-RF Module”的参数化扫描功能, 对不同周期 p 的 TM 和 TE 模式下的零阶传输特性随入射光波长变化的传输特性进行探究, 如图 5 所示。发射光谱的波长范围为 440~500 nm, 设置周期 p 的步长为 10 nm, 扫描范围为 100~300 nm。根据扫描结果, 非偏振光的综合传输特性在周期 $p=280$ nm 时达到最大。在 TM 模式下, 入射波长越大, 其零阶传输特性越好, 在周期 $p=280$ nm, 波长为 460 nm 时, 其零阶传输率高达 0.675; 在 TE 模式下, 零阶传输率也随着波长的增加而增加, $p=280$ nm 时, 传输特性曲线明显优于其他周期。考虑非偏振光的情况, 最佳周期 $p=280$ nm 时, 其零阶传输特性达到最大。

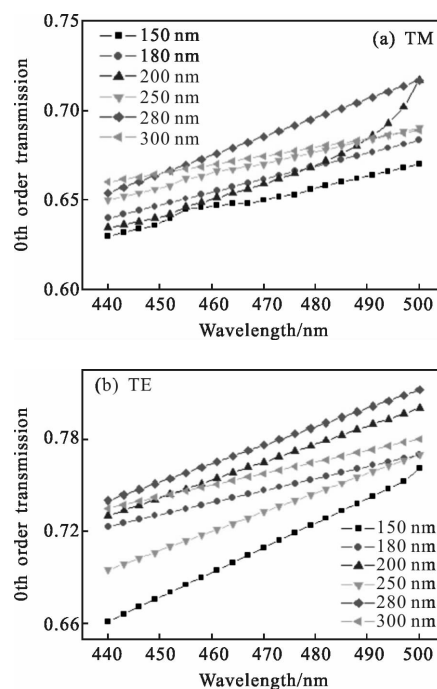


图 5 不同周期条件下, (a)TM 偏振 0 阶传输特性随波长的变化曲线; (b)TE 偏振 0 阶传输特性随波长的变化曲线

Fig.5 (a) TM-polarized 0th order transmissions versus wavelength with different periods; (b) TE-polarized 0th order transmissions versus wavelength with different periods

2.2 ITO 层厚度优化

固定周期 $p=280$ nm, 其他参数不变, 对 ITO 缓冲层的厚度进行参数优化。设置参数 d_{ITO} 的步长为

10 nm, 扫描范围 10~100 nm, 入射角 θ 的变化范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$ 。该结构在 TM 模式下的零阶传输特性随着入射角 θ 的变化曲线如图 6(a)所示。由图可知, 一定厚度的 ITO 缓冲层可以增加可见光的透射, 当 d_{ITO} 小于 50 nm 时, 随着 d_{ITO} 的增加, 其透射特性越来越好; 当 d_{ITO} 超过 50 nm 时, 其透射率突变到 0.4~0.5 范围内, 与不加 ITO 缓冲层和 SiO_2 缓冲层的 SRG 结构具有相近的透射率。在 $d_{\text{ITO}}=30, 40, 50$ nm 时, 三组参数下的零阶传输特性随着入射角的变化曲线非常相近, 透射率相差很小。为了选取最优的 d_{ITO} 参数, 对三组参数下的零阶反射率进行对比分析。三组参数下的零阶反射率随着入射角的变化曲线如图 6(b)

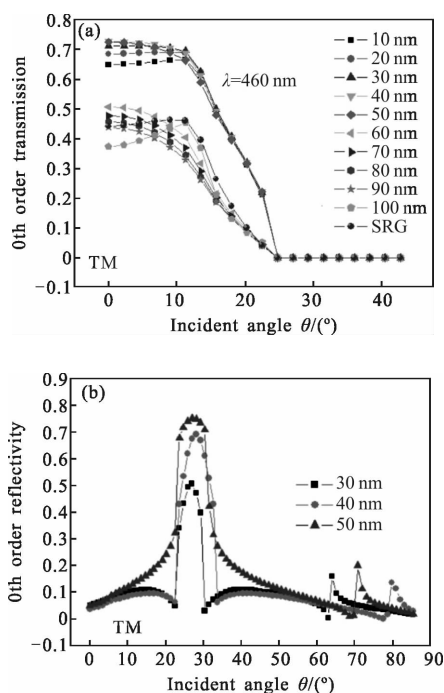


图 6 (a) 在 460 nm 中心波长处, TM 偏振零阶传输特性在不同的 d_{ITO} 参数下随入射角的变化曲线; (b) 在 460 nm 中心波长处, TM 偏振零阶反射特性在不同的 d_{ITO} 参数下随入射角的变化曲线

Fig.6 (a) TM-polarized 0th order transmission versus incident angle for different parameter d_{ITO} at 460 nm center wavelength; (b) TM-polarized 0th order reflectivity versus incident angle for different parameter d_{ITO} at 460 nm center wavelength

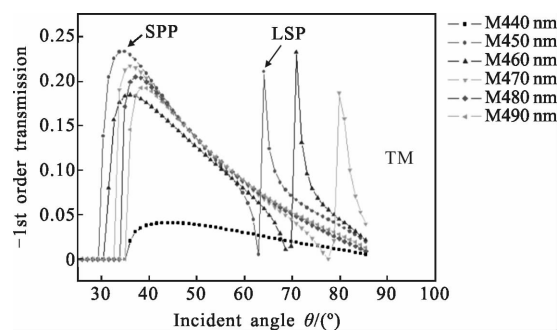
所示。由图可知, 随着 d_{ITO} 的增加, 其零阶反射率逐渐增大, 且反射角跨度范围也相应变大。当 $d_{\text{ITO}}=30$ nm 时, 该结构具有最小的零阶反射率, 并且反射角跨度

范围较小(约 $23^\circ\sim 30^\circ$), 可以保证更多光的透射, 以提高 LED 的光萃取效率 C_{ext} 。同时由图 6(a)可知, 当入射角 θ 超过 23.5° 时, 其零阶透射率变为 0, 此时会在界面发生全反射现象。只有以小于 23.5° 的入射角入射到交界面的光波才能够透射到空气中, 入射角大于 23.5° 的入射光会被反射回 GaN 内部, 产生热量, 缩短 LED 寿命。可以充分利用这一部分能量来激发产生 SPP, 进而增强 LED 的内量子效率和透射效率。

2.3 SPP 模式分析

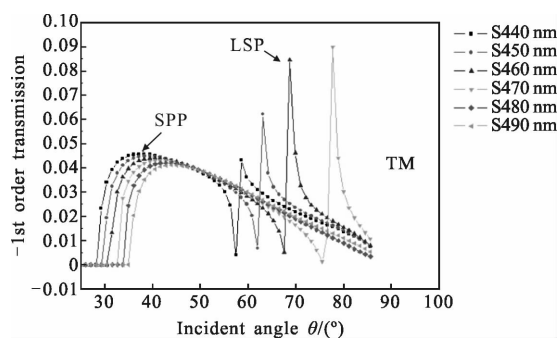
进一步探究 MRG 和 SRG 结构中 SPP 模式的传输特性, 在 TM 模式下, 对 MRG 和 SRG 结构下的 -1 阶传输特性(-1 阶透射衍射角下的透射特性)随着入射角的变化情况进行研究。样本 LED 的中心波长为 460 nm, 设置仿真波长步长为 10 nm, 扫描波长范围为 440~490 nm。当入射角超过 27° , 且入射波长在 440~490 nm 范围内, 优化后的 MRG 样本仅存在 -1 阶透射特性。MRG 和 SRG 样品的 -1 阶透射率随着入射角的变化曲线分别如图 7(a)和 7(b)所示。对于不同波长的入射光, 激发产生 SPP 和局域表面等离子激元(Localized surface plasmon, LSP)的入射角存在差异, 当波长等于 450 nm 时, 在入射角 $30\sim 63^\circ$ 范围内能够激发出 SPP, 在入射角大于 63° 时, LSP 将会在增强透射率方面起关键作用, 激发产生的 SPP 和 LSP 如图 7(a)中箭头所示。

由图 7(b)可知, 随着入射波长的增加, 激发 SPP 和 LSP 所需的入射角也会变大, 当波长超过 470 nm 时, 该结构将只能激发出 SPP, LSP 将会被限制。对于 MRG 样本, 在波长 460 nm 附近, 同样能够激发出 SPP 和 LSP, 能够增强可见光的透射。在波长为 460 nm 时, MRG 的 -1 阶透射率峰值(0.183)远大于



(a) MRG 结构

(a) MRG structure



(b) SRG 结构
(b) SRG structure

图 7 TM 偏振-1 阶传输特性在不同的波长时随入射角的变化曲线
Fig.7 TM-polarized -1st order transmissions versus incident angle at different wavelengths

SRG 的-1 阶透射率峰值(0.042), 这表明在 MRG 样品中的 SPP (LSP) 确实在增强透射率方面起到了非常重要的作用。这主要是因为, 在 MRG 样品中, 银膜两侧具有对称化的电场分布, 且对 SPP 有较低的吸收损耗, SPP 能够最大限度地耦合为远场辐射光, 增加 SPP 的萃取效率 C_{spp} , 进而提高其发光效率。

2.4 Purcell 效应

利用 SPP 提高 LED 的内量子效率是基于 1946 年 Purcell 提出的激子自发辐射速率和态密度有关的原理^[17], SPP 的高态密度可以增强 LED 中电子/空穴的辐射复合速率, 进而提高有源层的内量子效率, 获得更好的发光效果。为了对 Purcell 效应进行量化分析, 利用“COMSOL™-RF Module”软件的散射边界条件对 MRG 和 SRG 样本进行 3D 数值模拟。在仿真模型中, p-GaN 底部边界设置散射边界条件以模拟不同方向和不同波长的入射光, 入射光的波长 $\lambda=460\text{ nm}$ 。

两种结构的 LED 在 $x-y$ 平面上电场强度的空间分布如图 8(a)和 8(b)所示, 由图可知, 在银膜内部和表面的电场强度非常大, 银膜激发产生的 SPP 能够与 QW 有较强的相互耦合, 激发产生更加强烈的电场, 进而提高其电子/空穴的辐射复合速率, 增强内量子效率。为了对比两种结构的增强效果, 分别对图中银膜下表面 30 nm 处的平面范围 (图中黑色虚线) 进行电场强度积分, 分别定义为 $|E_M|^2$ 和 $|E_S|^2$, 且 $|E_M|^2$ 和 $|E_S|^2$ 的值越大, 表明该结构具有更大的 Purcell 效应, 内量子效率更大。与原始结构的 $|E_V|^2$ 相比, $|E_M/E_V|^2$ 和 $|E_S/E_V|^2$ 分别为 16.4 和 5.8, 这表明

MRG 和 SRG 结构都能够有效提高 LED 的内量子效率, 且 MRG 结构的增强效果更加明显。对比图(a)和图(b)可知, MRG 结构较 SRG 结构拥有更优的传输特性和辐射能量, 即 MRG 结构拥有较高的光萃取率效率 C_{ext} 和 SPP 萃取率 C_{spp} 。

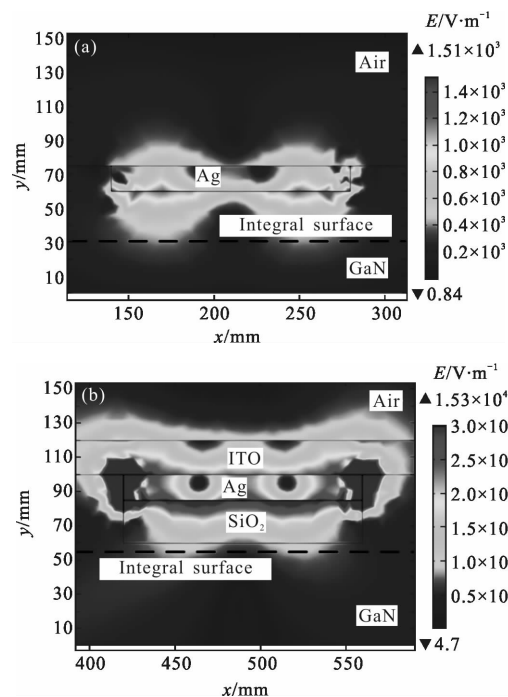


图 8 两种结构 LED 在 $x-y$ 平面的计算电场强度的空间分布情况(a)SRG 结构(b)MRG 结构
Fig.8 Calculated magnitude distribution of electric field in the $x-y$ plane of the (a) SRG (b) MRG

2.5 归一化辐射/吸收功率

对 MRG 和 SRG 结构进行整体模拟计算和分析, 定义归一化辐射功率 (N_{rp}) 和归一化吸收功率 (N_{ap})。归一化辐射功率指的是 MRG(SRG)结构与原始结构(Bare)出光功率的比值, 归一化吸收功率指 MRG(SRG)结构中 Ag 光栅对光的吸收功率与原始结构(Bare)出光功率的比值。设置周期 $p=280\text{ nm}$, 占空比 $f=0.5$, $d_{SiO_2}=25\text{ nm}$, $d_{Ag}=15\text{ nm}$, $d_{ITO}=30\text{ nm}$, 扫描波长范围 440~490 nm, 扫描步长 1 nm, 归一化辐射功率和归一化吸收功率随入射波波长的变化情况如图 9 所示。与原始结构相比, MRG 和 SRG 结构下的归一化辐射功率分别提高了 9.514 和 4.201 倍, 且 SRG 结构中的归一化吸收功率是 MRG 结构的 1.33 倍, 表明 SRG 结构中会有更多的能量损耗, 从而导致出光效率低。同时, 加入 SiO_2 层和 ITO 层会造成 MRG

结构整体透射率(T)的相对降低,如图 9 所示。从整体出光效率和能量损耗角度考虑,MRG 结构明显优于 SRG 结构和传统结构,这一结果为实验制备高性能 GaN 基 LED 芯片具有一定的指导作用。

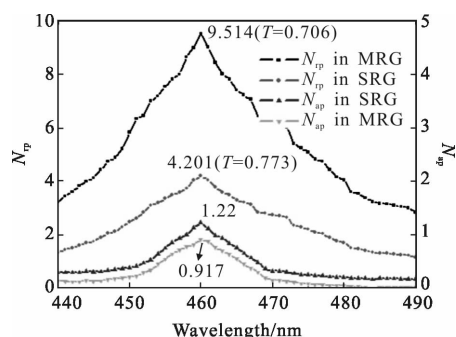


图 9 归一化辐射功率与归一化吸收功率随入射波长的变化曲线
Fig.9 Normalized radiated power and normalized absorbed power versus wavelength

3 结论

文中提出了一种基于微纳光栅的透射式表面等离子激元增强型 LED 结构,该结构可以通过纳米压印光刻技术和感应耦合等离子体刻蚀技术进行制造。MRG-LED 结构与单一金属层覆盖的微纳米结构相比具有如下优势:(1) 在可见光波段,MRG 结构具有更优的传输特性和辐射能量;(2) ITO 和 SiO₂ 层的折射率呈准对称化分布,使银薄膜两侧的表面等离子激元强烈耦合,产生远场辐射模式;(3) SiO₂ 层的存在改善了 SPP 模式的场分布,减少了 SPP 沿界面传输时的热损耗效应。模拟实验结果表明,在周期 $p=280\text{ nm}$, 占空比 $f=0.5$, $d_{\text{SiO}_2}=25\text{ nm}$, $d_{\text{Ag}}=15\text{ nm}$, $d_{\text{ITO}}=30\text{ nm}$ 时,该结构在可见光范围内具有较高的传输特性,其零阶透射率高达 0.716,零阶反射率 0.224,-1 阶透射率峰值 0.183,较传统 LED 结构和 SRG-LED 结构而言,其 Purcell 因子分别增强 16.4 倍和 2.83 倍,发光效率增强了 9.514 倍。这一结果对实验制备高性能 GaN 基 LED 芯片具有十分重要的指导意义。

参考文献:

[1] Pimputkar S, Speck J S, Denbaars S P, et al. Prospects for LED lighting[J]. *Nature Photonics*, 2003, 3(4): 180-182.
[2] Yeh Y H, Sheu J K, Lee M L, et al. Vertical gan-based leds with naturally textured surface formed by patterned

sapphire substrate with self-assembled ag nanodots as etching mask [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 62 (9): 2919-2923.

[3] Krames M R, Bhat J, Collins D, et al. High power III nitride emitters for solid state lighting [J]. *Physica Status Solidi*, 2015, 192(2): 237-245.
[4] Ryu H Y. Modification of internal quantum efficiency and efficiency droop in GaN -based flip-chip light-emitting diodes via the Purcell effect [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (19): 1157-1166.
[5] Liu Yang, Guo Zhiyou, Li Jing, et al. Performance enhancement of InGaN -based light-emitting diodes with InGaN/AlInN/InGaN composition-graded barriers [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2015, 30(12): 125014.
[6] Wei Tongbo, Huo Ziqiang, Zhang Yonghui, et al. Efficiency enhancement of homoepitaxial InGaN/GaN light-emitting diodes on free-standing GaN substrate with double embedded SiO₂ photonic crystals [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (13): A1093.
[7] Hu Yonglu, Liu Daoliu, Wang Bo, et al. Characteristics of light extraction for surface-microcavity photonic crystal LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0623004. (in Chinese)
[8] Chang S J, Chang L M, Kuo D S, et al. Gan-based leds with rough surface and selective koh etching [J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 10(1): 27-32.
[9] Lin T H, Wang S J, Tu Y C, et al. Improving the performance of power GaN-based thin-film flip-chip LEDs through a twofold roughened surface[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2016, 45: 69-75.
[10] Li Zhiqian, Wang Cong, Li Wenchao, et al. Improving LED luminescence properties by using Ag/P-GaN double grating [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1185-1191. (in Chinese)
[11] Zhu Jun, Zhang Haosu, Zhu Zhendong, et al. Surface-plasmon-enhanced GaN -LED based on the multilayered rectangular nano-grating [J]. *Optics Communications*, 2014, 322(8): 66-72.
[12] Shen Kunching, Liao Chehao, Yu Zanyao, et al. Effects of the intermediate SiO₂ layer on polarized output of a light-emitting diode with surface plasmon coupling[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(11): 11213.
[13] Ma Lijie, Zhao Junfeng. Improving LED luminous efficiency by surface plasmon enhanced waveguide [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0720003.

- [14] Andreas O. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection [J]. *Zeitschrift Fur Physik A Hadrons & Nuclei*, 1968, 216(4): 398-410.
- [15] Li Wenchao, Sha Xiaopeng, Li Zhiqian, 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*, 2016: 1-6.
- [16] Palik E D. Handbook of optical constants of solids II [J]. *Boston Academic Press*, 2014, 39(1): 189.
- [17] Purcell E M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies[J]. *Physical Review*, 1955, 69(11): 839.