

采用银纳米圆盘阵列提高 LED 发光特性的研究

张振明 李 康 孔凡敏 高 晖

(山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

摘要 为了提高 GaN 基蓝光 LED 的发光效率, 设计了在 LED 有源层上方引入银纳米圆盘阵列的模型。利用时域有限差分方法计算了银纳米圆盘阵列不同结构参数情况下 LED 有源层自发辐射率的变化情况及光提取效率值。通过对有源区的近场分布和 LED 远场方向性的分析, 理论上解释了利用该金属纳米结构生成的表面等离子激元对 LED 性能增强的影响, 利用该模型可使得表面等离子激元与有源层有效耦合, 从而增强有源层的自发辐射率。此外, 银纳米粒子组成的阵列结构所生成的栅格矢量可以补偿表面等离子激元的波矢量, 从而可将局域化表面等离子激元转为辐射性表面等离子激元, 显著提高 LED 顶端光提取效率。结果表明, 当银纳米圆盘颗粒满足直径为 120 nm, 厚度为 30 nm 时, 含该结构的 GaN 基蓝光 LED 自发辐射率比普通 LED 增强了 3.6 倍。在此基础上, 当其按照晶格常数为 220 nm 的三角晶格排列时, 顶端光提取效率增强为 2.5 倍。这些结果为实际的高性能 GaN 基 LED 的设计与优化提供了一定的参考。

关键词 光学器件; 发光二极管; 时域有限差分; 银纳米圆盘颗粒; 表面等离子激元

中图分类号 O472 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0423001

Study on Improving Light Emitting Efficiency of LED by Using Silver Nanodisk Array

Zhang Zhenming Li Kang Kong Fanmin Gao Hui

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract In order to improve the light emitting efficiency of GaN-based blue LED, a novel LED model, which has a layer of silver nanodisk array embedded above the quantum well, is designed. The rates of spontaneous emission change and light extraction efficiencies of the models with various geometric parameters are calculated by using finite-difference time-domain method. With the analysis for near field distribution of active region (AR) and far field directivity of LED, we theoretically explain the influence of surface plasmon polaritons (SPP) formed on silver nanodisks on the improvement of LED performance. This model could contribute to the coupling between SPP and AR, leading to the enhancement of spontaneous emission of AR. Besides, due to the compensation for wave vector of SPP by lattice vector of silver nanodisk array, the localized SPP could radiate to space and light extraction efficiency of LED could be improved. Optimization results show that on the condition that the diameter of nanodisk is set to 120 nm and its thickness is chosen as 30 nm, the spontaneous emission is enhanced by 3.6 times compared to that of the conventional LED. Furthermore, as the nanodisks are arranged to the array with triangular lattice and the lattice constant is 220 nm, light extraction efficiency gets 2.5 times enhancement. These results provide a theoretical reference on the practical design and optimization of highly efficient GaN-based LED.

Key words optical devices; light emitting diodes; finite-difference time-domain; silver nanodisks; surface plasmon polariton

OCIS codes 230.0250; 230.3670; 240.6680; 260.2110

收稿日期: 2011-10-20; 收到修改稿日期: 2011-12-07

基金项目: 国家 973 计划(2009CB930503, 2009CB930501)和国家自然科学基金(61077043)资助课题。

作者简介: 张振明(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事 LED 建模仿真和电磁场数值计算等方面的研究。

E-mail: zhzhming_001@163.com

导师简介: 李 康(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、纳米光电子学和电磁场数值分析方法等方面的研究。E-mail: kangli@sdu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

发光二极管(LED)具有耗能少、体积小、可靠性高和寿命长等优点,已经被广泛应用于各个领域。GaN 基的 LED 可以作为白光照明光源,随着相关技术的不断发展进步,很有希望替代传统的照明光源,成为无公害且节能减排的绿色照明的最佳选择^[1]。然而,传统 LED 受到全内反射及菲涅耳效应的限制,发光效率低,阻碍了 LED 产业的发展。为了提高 LED 的发光效率,研究者们提出了很多改进的 LED 结构,其中采用表面等离子激元(SPP)技术^[2~5]和光子晶体技术^[6~9]的结构吸引了很多研究人员的兴趣。由于 SPP 具有将电磁场能量聚集在纳米空间范围内的特性,已被用于超透镜、纳米器件制作和光纤传感等领域^[10,11]。若 LED 的有源层附近含有金属结构,利用所激发的 SPP 与有源层之间的耦合,可以增强有源层的自发辐射率^[2]。若在 LED 中制作光子晶体结构,则可以通过二维光子晶体产生的倒晶格矢量,将在光子晶体层中传播的布洛赫模转化为辐射模式,从而将其携带的光能量提取出来,提高 LED 的光提取效率^[9]。

为了在 LED 中引入 SPP,可以在有源层上方的 p-GaN 中增添一层几十纳米厚的金属膜^[12]。然而,受制于金属趋肤效应,当金属膜超过一定厚度后(约 50 nm),只有极少的光能量可以穿透;同时,激发的 SPP 更多地呈现出局限于金属表面的特性,不能向远区辐射,因此 LED 的光提取效率不会得到显著的增强。通过光子晶体提高 GaN 基 LED 的发光特性得到了普遍的论证。但近来更多的文献指出^[9,13],LED 有源区发出的能量大部分转化为局限在 GaN 内的低阶导模形式,由于其有效折射率远大于光子晶体的等效折射率,不易被光子晶体提取。仅当光子晶体深度刻蚀入有源区后,才能在一定程度上抑制有源区能量向低阶导模转化,从而使得 LED 顶端光提取效率得到增强。但这将不可避免地造成有源层被破坏,导致 LED 自发辐射率的降低。

近年来,在有源层附近的 GaN 中嵌入金属颗粒的方法得到很多研究者的关注。在有源层下方置入金属颗粒以提升 LED 发光特性的模型^[14],虽然在理论上会有表面等离子激元与反射的双重作用,但由于制备时长时间处于高温环境中,最后金属颗粒大量减少,增强效果并不明显^[7,8]。而在有源层上方放置金属颗粒的方法在制备上难度较小,易于在实际制造中施行,并且在实验中也得到了良好的增强效果^[3,4]。然而,实验中所制备的金属颗粒多为

近似圆形的结构,形成的局域表面等离子激元(LSP)与有源层的耦合效果较弱,并且金属颗粒大小不一,排列无序,这不利于 LSP 向辐射性 SPP 的转化。

为了补偿 LED 自发辐射率,同时为了利用光子晶体的作用来提高提取效率,在光子晶体模型的基础上,本文提出了在 p-GaN 中有源层上方嵌入银纳米圆盘阵列结构的类嵌入式光子晶体模型,并通过时域有限差分方法对该结构与有源层的相互作用及其对 LED 光提取效率的影响进行了详细的数值计算。计算结果表明,本文提出的模型使得 SPP 与有源层有效耦合,增强了有源层的自发辐射率;同时由于银纳米阵列中栅格矢量的作用将局域化的 SPP 转为辐射模式的 SPP,LED 的顶端光提取效率获得了很大增强。本文的结果对高性能 GaN 基蓝光 LED 的设计与制造具有一定的理论参考价值。

2 计算模型与方法

采用了尺寸为 $4000\text{ nm} \times 4000\text{ nm} \times 2000\text{ nm}$ 的垂直结构 LED 模型进行计算,如图 1 所示。采用水平放置的电偶极子作为实际有源层结构的模拟^[15],位置在距离模型顶部 200 nm 处。源上面为 200 nm 厚的 p-GaN 层,下面为 1800 nm 厚的 n-GaN 层,其折射率均设为 2.5。由于本文讨论的是 GaN 基的蓝光 LED,频率为 645.16 THz,对应的波长为 465 nm,与之最接近的是金和银的等离子振荡频率,分别为 2.462 eV (537 nm) 和 2.84 eV (437 nm)^[2]。然而金在蓝光频段的强吸收效应阻碍了自发辐射的增强,所以对于 GaN 基蓝光 LED 来说,采用金属银来产生 SPP 并与量子阱耦合更为合适。

对于空气孔光子晶体结构模型,当其按照三角晶格排列,半径为 60 nm、晶格常数为 200 nm(填充因子为 0.30~0.35)时,光提取效率得到最大增强^[7]。同时,考虑到规则排列结构所形成的晶格矢量对 SPP 从局域模式到辐射模式转化的作用,本文采用按照三角晶格形式均匀排列的银纳米圆盘阵列结构,银圆盘直径固定为 120 nm,晶格常数在 200 nm 左右,用 t 表示。整个计算采用时域有限差分方法(FDTD)^[16],对于超出计算空间的电磁场区域,利用完全匹配层(PML)吸收。银纳米圆盘嵌入在有源层上方的 p-GaN 内,贴近有源层,距离为 20 nm。

在计算中,银的介电常数采用修正 Drude 模型来近似,定义为

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega\gamma}, \quad (1)$$

式中 ϵ_{∞} , ω_p 和 $1/\gamma$ 分别为频率接近无穷大时的介电常数、等离激元振荡频率以及弛豫时间。根据光学手册中的实验数据^[17] 进行曲线拟合, 选取银在可见光频段的参数分别为 $\epsilon_{\infty} = 5.888$, $\omega_p = 1.433 \times 10^{16}$ rad/s, $\gamma = 2.4871 \times 10^{13}$ Hz。

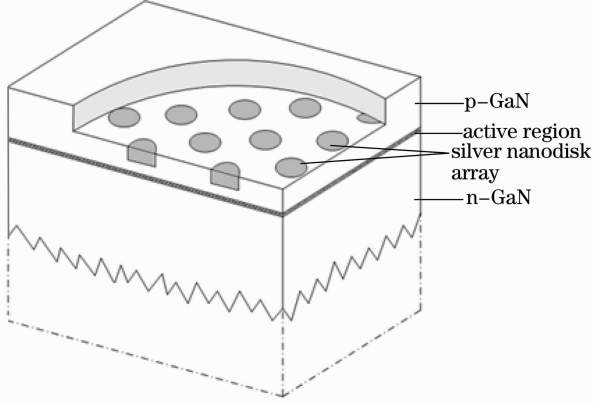


图 1 含有银纳米圆盘粒子的 LED 计算模型
(纵剖立体图)

Fig. 1 Schematic of LED calculation model with silver nanodisks (vertical section)

自发辐射率是影响 LED 有源层内量子效率的关键因素。自发辐射率是处于激发态的电子自发地由高能级状态转化到低能级的状态, 与空穴复合, 同时释放出光子的自发辐射过程的速率。因为 LED 为非相干光源, 其发光过程主要对应于光的自发辐射, 所以有源层中光子自发辐射的速率近似等于电子-空穴对的辐射复合率。文献^[18]已经证明, 自发辐射率的变化可以通过计算源能量的变化求得, 为

$$\eta_{\text{spont}} = \frac{P_{\text{dipole}}^{\text{silver}}}{P_{\text{dipole}}^{\text{bulk}}}, \quad (2)$$

式中 η_{spont} 为自发辐射率的增强倍数, $P_{\text{dipole}}^{\text{silver}}$ 和 $P_{\text{dipole}}^{\text{bulk}}$ 分别为有金属结构和没有金属结构时偶极子源辐射的总能量。为了计算这部分能量, 首先用一个边长为 200 nm 的封闭立方体包围偶极子源, 分别对其六个面的功率法向分量进行面积分, 然后相加得到流出立方体的能量通量 P_0 , 即

$$P_0 = P_{\text{left}} + P_{\text{right}} + P_{\text{front}} + P_{\text{back}} + P_{\text{top}} + P_{\text{bottom}}, \quad (3)$$

显然, 对于没有加入金属的结构, 有

$$\eta_{\text{spont}} = \frac{P_0}{P_{\text{dipole}}^{\text{bulk}}} = 1, \quad (4)$$

然而对于加入金属的结构, 则还需考虑金属损耗的能量 P_{loss} 和由金属激发的表面等离激元携带的能量

P_{SPP} , 此时自发辐射率的变化满足

$$\eta_{\text{spont}} = \frac{P_{\text{dipole}}^{\text{silver}}}{P_{\text{dipole}}^{\text{bulk}}} = \frac{P_0 + P_{\text{loss}} + P_{\text{SPP}}}{P_{\text{dipole}}^{\text{bulk}}} = F + \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{dipole}}^{\text{bulk}}} + \frac{P_{\text{SPP}}}{P_{\text{dipole}}^{\text{bulk}}}, \quad (5)$$

式中 $F = \frac{P_0}{P_{\text{dipole}}^{\text{bulk}}}$ 为定义的增强因子。需要说明的是, 当加入的金属较薄时, 产生的表面等离激元较弱, 其携带的能量可以忽略, 由此可得近似关系式

$$\eta_{\text{spont}} = \frac{P_0 + P_{\text{loss}} + P_{\text{SPP}}}{P_{\text{dipole}}^{\text{bulk}}} \approx F + \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{dipole}}^{\text{bulk}}}. \quad (6)$$

定义光提取效率 Γ_{extr} 为 LED 模型的顶面出光能量 P_{out} 与源辐射总能量 P_{dipole} 的比值, 即

$$\Gamma_{\text{extr}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{dipole}}}, \quad (7)$$

式中顶部出光能量 P_{out} 通过对计算模型的顶面进行法向分量的功率面积分求得, 对于不含金属的结构, P_{dipole} 可以通过(3)式求得, 对于含有金属的结构为

$$P_{\text{dipole}} = P_0 + P_{\text{loss}} + P_{\text{SPP}}. \quad (8)$$

计算中, 光提取效率增强倍数 η_{extr} 为光提取效率 Γ_{extr} 的变化倍数, 以不含金属结构的 LED 模型为基准。

3 结果与分析

3.1 银纳米圆盘结构对 LED 自发辐射率的影响

通过采用(6)式的方法, 计算了 4 种不同晶格常数排列时银纳米圆盘的厚度 D 对自发辐射率的增强作用, 如图 2 所示。从图中可以看出, 并非所有厚度的银圆盘阵列结构都会使自发辐射率得到显著增强, 而是当厚度达到 15 nm 之后, 曲线才表现出较为明显的上升趋势。在 $D = 30$ nm 时, η_{spont} 取最大值, 随后急剧衰减。当厚度大于 35 nm 后, 自发辐

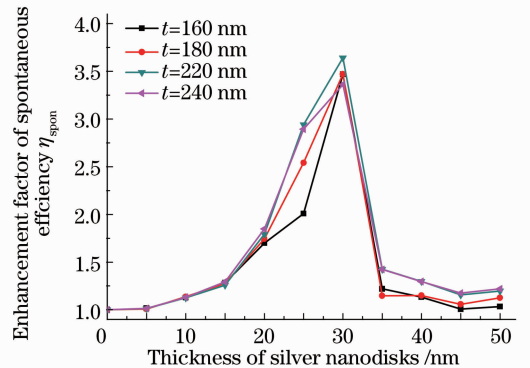


图 2 自发辐射率增强倍数随不同银纳米圆盘结构厚度的变化情况

Fig. 2 Enhancement factor of spontaneous emission rate versus various thicknesses of silver nanodisk

射率没有明显增强。值得注意的是,对应于不同的晶格常数 t , η_{spom} 的变化趋势基本一致。由此可以推断,圆盘排列的不同对自发辐射率的增强不会产生较大影响,导致自发辐射率增强的主要因素应为在银圆盘上产生的局域表面等离激元。

为了详细研究本结构中表面等离激元对自发辐射率增强的作用,对有源区近场分布进行了细致的分析。为了验证本文中计算的精确性,给出了在背景材料为空气时,不同厚度银平板结构的近场分布图,如图 3 所示。

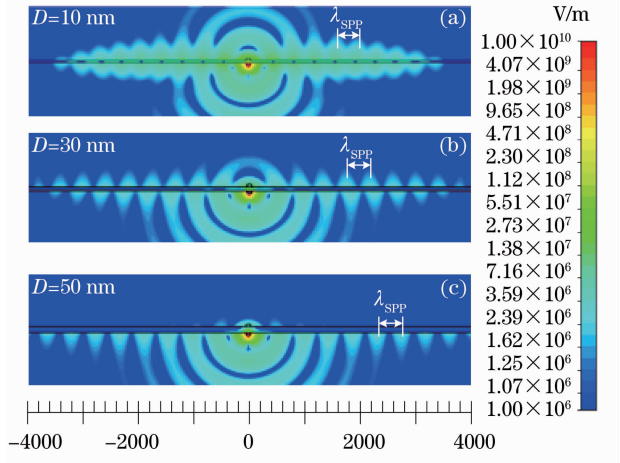


图 3 不同厚度的银平板结构近场电场幅值分布图。

(a) $D=10\text{ nm}$; (b) $D=30\text{ nm}$; (c) $D=50\text{ nm}$

Fig. 3 Electric near-field amplitude distribution of silver film with different thicknesses. (a) $D=10\text{ nm}$; (b) $D=30\text{ nm}$; (c) $D=50\text{ nm}$

从图中可以看出,当银平板厚度较小 ($D < 30\text{ nm}$) 时,其与介质的两个交界面处均会产生 SPP,而当银平板厚度较大 ($D > 50\text{ nm}$) 时,仅在有源区的一侧产生 SPP。同时,SPP 的波长 λ_{SPP} 可表示为^[19]

$$\lambda_{\text{SPP}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{(\epsilon_1 + \epsilon_R)^2 + \epsilon_1^2}{\epsilon_1 (\epsilon_R^2 + \epsilon_1 \epsilon_R + \epsilon_1^2)}}, \quad (9)$$

式中 λ_0 是真空中蓝光的波长 $\lambda_0 = 465\text{ nm}$, ϵ_1 为空气介电常数, ϵ_R 和 ϵ_1 分别对应金属介电常数的实部与虚部。带入数值可求得 $\lambda_{\text{SPP}} = 428.5\text{ nm}$,而在图 3 中,将所标注的 λ_{SPP} 长度与下方的标尺对比可知,其与理论计算值是完全一致的,从而充分验证了本文中采用的 FDTD 方法进行场值分析的精确性。

对于尺寸较小的银圆盘阵列,由于图 2 已证明了不同排列情况对自发辐射率增强的影响不大,故整个阵列的模拟可以简化为单个银纳米圆盘的情况,计算空间缩小为 $500\text{ nm} \times 500\text{ nm} \times 500\text{ nm}$,整

体的 FDTD 仿真设置如图 4 所示。有源层以单个点偶极子源模拟,置于银纳米圆盘下方 20 nm 处。

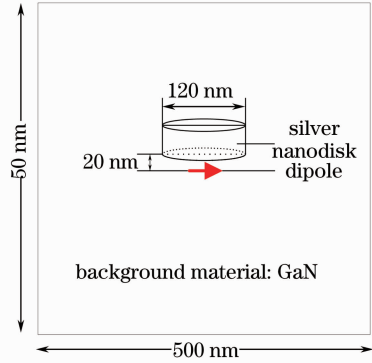


图 4 单纳米银圆盘结构与偶极子源的耦合作用计算模型图

Fig. 4 Calculating model used to analyze the coupling effect between single nanodisk and dipole source

为了研究银圆盘厚度变化所带来的影响,计算了不同厚度情况下的电场分布,如图 5 所示。其中图 5(a),(b) 图分别为 10 nm 厚度银圆盘下表面和上表面的法向电场图;图 5(c),(d) 图分别为 30 nm 厚度银圆盘下表面和上表面的法向电场图;图 5(e),(f) 图分别为 50 nm 厚度银圆盘下表面和上表面的法向电场图。分别比较每一行的左右图,可知,当 $D=10\text{ nm}$ 及 $D=30\text{ nm}$ 时,有源层发出的

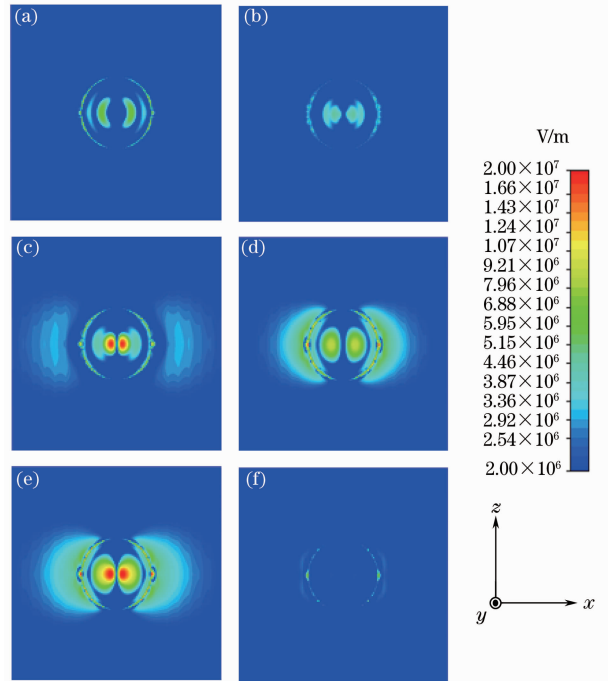


图 5 单纳米银圆盘结构法向电场图

Fig. 5 Normal electric field distributions of single nanodisk model

能量可以轻易地穿过银圆盘结构,这不会对整体的出光造成不利影响。但厚度为 10 nm 时的电场强度比 30 nm 时要小很多,这说明厚度薄的时候,表面等离激元与偶极子源的耦合不明显。当银的厚度在 50 nm 时,虽然银圆盘下层的电场很强[图 5(e)],但是其上层的电场却很弱,也就是说,源能量无法穿透银圆盘向上传播。所以在 30 nm 厚度时,图 2 中的自发辐射率曲线达到最大值。

同时,由图 5 可知,在银圆盘的侧壁上形成了局域 SPP,其所携带的能量对应于(5)式和(6)式中的 P_{SPP} 。由图 5 可知,随着圆盘厚度的增加,局域 SPP 携带的能量越来越多,即 P_{SPP} 随着圆盘厚度的增大而逐渐变得不可忽略。因此在圆盘厚度大于 30 nm 情况下,自发辐射率增强数值(图 2)受到此限制而偏低。然而,不管从损耗和 P_{SPP} 所占的能量比重上,还是从能量传播方面(图 5)考虑,厚于 30 nm 的银圆盘显然不利于光能量的提取。

3.2 银纳米圆盘结构对 LED 光提取效率的影响

采用(7)式的计算方法,计算了三种晶格常数排列情况下以及厚度为 0~50 nm 范围的银圆盘结构对光提取效率的影响,如图 6 所示。为了作对比,同时计算了与银圆盘位置相同,厚度范围相同的银薄膜对 LED 光提取效率的影响。从图中可以明显地看出,当 $t=160$ nm 时,光提取效率几乎没有得到增强,而当 $t=220$ nm 时,光提取效率最高达到 2.5 倍的增强,即晶格常数在 160~220 nm 范围内时(对应的圆盘间距为 40~100 nm),光提取效率随着晶格常数 t 的增大而增大。而在相同情况下,银膜则对光提取效率的提高起反作用。文献[17]分析指出,沿着平面的金属-介质交界面传播的表面等离激元波矢量不能达到辐射性电磁波的要求,所以若在该交界平面上作周期性的结构形成光栅结构,则可通过光栅矢量与波矢量的叠加耦合,将非辐射模式的表面等离激元转化为辐射模式^[20]。图 6 的结果很好的印证了这一判断,从而体现了二维光栅矢量对表面等离激元从非辐射模式到辐射模式转化的作用。

圆盘的厚度也是影响光提取效率的重要因素。从图 6 可以看出,随着银圆盘厚度的增大,三条曲线都呈现先升后降的趋势,晶格常数较大的两条曲线尤为明显。为了进一步了解不同厚度所带来的影响,提取了 $t=220$ nm 时厚度分别为 10, 30, 50 nm 的切向电场分布图,同时为了做比较,再提取了不含金属结构和含有银膜结构的 LED 模型的近场分布,

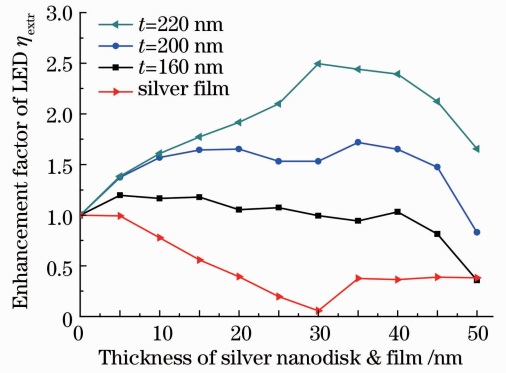


图 6 光提取效率的增强倍数随银粒子层厚度变化曲线
Fig. 6 Enhancement factor of light extraction efficiency versus various thicknesses of silver nanodisk and silver film

如图 7 所示。由图中可以看出,厚度为 10 nm 时,银圆盘结构上存在较弱的 SPP 模式。比较图 7(a)和图 7(b)可以发现,电场的近场分布几乎不变;而当厚度为 30 nm 时,银圆盘结构上出现强烈的 SPP 耦

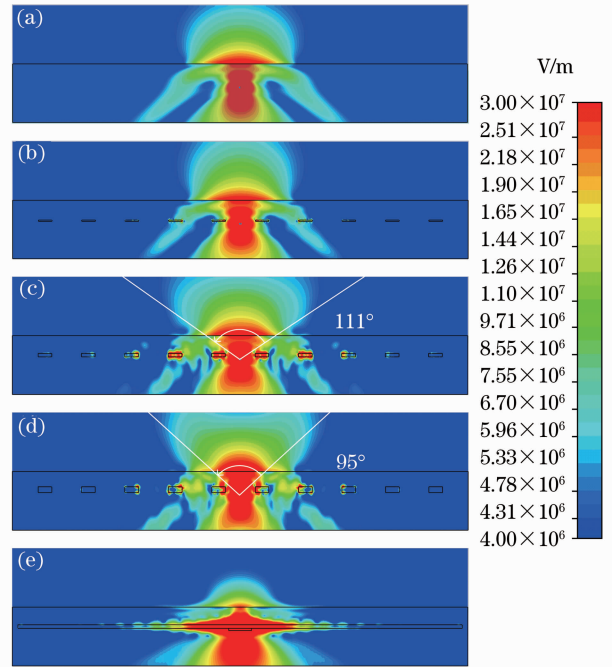


图 7 切向电场分布图。(a) 不包含金属结构的模型;(b) 包含厚度为 10 nm 的银圆盘阵列结构的模型;(c) 包含厚度为 30 nm 的银圆盘阵列结构的模型;(d) 包含厚度为 50 nm 的银圆盘阵列结构的模型;(e) 包含厚度为 30 nm 的银膜结构的模型

Fig. 7 Tangential electric field distributions of the models
(a) Without any metal structure; (b) with 10 nm thickness nanodisk array; (c) with 30 nm thickness nanodisk array; (d) with 50 nm thickness nanodisk array; (e) with 30 nm thickness silver film

合电场,在光栅作用下,向顶部辐射的光能量增加;厚度为 50 nm 时,银圆盘上下表面的 SPP 只在边缘处耦合。同时,比较图 7(c)和图 7(d)可以发现,对于电场强度在 2×10^7 V/m 以上的辐射光锥区域,当厚度为 30 nm 时,顶部光锥张角为 111° ,而当厚度为 50 nm 时,张角仅为 95° 。为了作进一步验证,对图 7(c)和图 7(d)所代表的模型,在距离出光面 100 nm 高度处以源所在位置为中心,以晶格常数的整数倍为半径确定圆平面,对穿过该平面的法向功率进行面积分,所得结果如表 1 所示。从表 1 数据可以得出,较厚的银圆盘结构对应的功率值较少,即较厚的银圆盘结构对有源层激发的光场的辐射作用较弱。而对于图 7(e)所示的银膜结构,产生的 SPP 局域在银的表面,顶部辐射出的光能量极少。由此可知,从 5 nm 开始,随着银厚度的增加,SPP 模式

携带的能量逐渐增大,对总辐射场的影响也逐渐变得显著。厚度为 30 nm 左右时,银圆盘上形成的强烈的局域耦合场使更多的能量被辐射出去。当厚度较大时,银圆盘上下两面的 SPP 耦合变弱,使得整体的光提取效率降低。

表 1 银盘厚度分别为 30 nm 和 50 nm 时, LED 上表面功率积分情况

Table 1 Integration of power through the top surface of two LED models made by different silver nanodisks, whose thickness are 30 nm and 50 nm, respectively

Integral radius / nm	Thickness / nm	
	30	50
220	0.138505	0.0957152
440	0.169838	0.120512
660	0.169946	0.123984
880	0.170893	0.126119

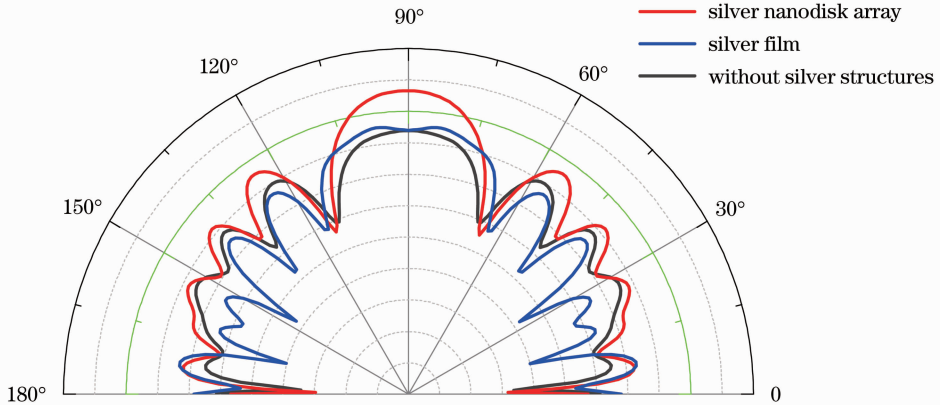


图 8 含有银纳米圆盘结构(红线)、银膜结构(蓝线)与没有加入金属结构(黑线)的 LED 模型远场方向图
Fig. 8 Far-field pattern of the LED models with silver nanodisk array (red line), silver film (blue line) and without any metal structure (black line)

为了观察银圆盘结构对 LED 整体辐射特性的影响,计算了 $t=220$ nm,厚度为 30 nm 模型的方向图,为了比较,同时也计算了不含银结构以及含有银膜结构的 LED 模型的方向图,如图 8 所示(彩图请见网络电子版)。由图 8 可以看出,银纳米圆盘结构对很大范围的方向性都有增强作用,对垂直方向的方向性增强最大。若在银纳米圆盘位置上改为银膜结构,其方向性在倾斜角度处被减弱,在垂直角度上未有明显变化。在含有银膜结构的 LED 模型中,垂直方向的光可以透过银膜向顶面传播,倾斜方向的光在银膜上产生了 SPP,由于这种 SPP 被局域在银膜表面,所以整体的方向性减弱。而含有银纳米圆盘阵列结构的 LED 模型方向性的增强,进一步证明了阵列结构对 SPP 由非辐射向辐射的转化。

4 结 论

设计了 p-GaN 中嵌入银纳米圆盘阵列的 GaN 基蓝光 LED 模型,通过时域有限差分方法进行数值计算,分析了不同的结构参数下有源层自发辐射率和 LED 光提取效率的变化。同时,通过对近场分布和远场方向性的分析,讨论了 SPP 在自发辐射和光提取方面所起到的作用。研究发现,p-GaN 中嵌入银纳米圆盘阵列的 LED 结构不仅可以提高有源层自发辐射率,还可以提高光提取效率。当银纳米圆盘直径固定在 120 nm 时,在 SPP 与偶极子源的相互作用下,圆盘厚度是影响 LED 自发辐射率变化的主要因素,厚度过薄会使产生的 SPP 携带能量减少,与源的耦合作用降低,而较大的厚度则会对向顶部传播的光产生阻挡作用。而在光提取方面,由规

则排列的阵列结构所形成的栅格矢量可以补偿 SPP 波矢量,从而将局域化 SPP 转化为辐射性 SPP,使光提取效率得到增强。计算结果表明,嵌入在有源层上方 20 nm 处的银纳米圆盘厚度为 30 nm 时,自发辐射率有 3.6 倍的增强,当圆盘阵列的晶格常数为 220 nm 时,光提取效率得到了 2.5 倍的增强。

通过初步研究和讨论,发现银纳米圆盘阵列结构对于提高 LED 发光特性显示出良好的发展前景。本文只对规则有序排列的银纳米圆盘阵列的厚度与晶格常数进行了扫描优化与理论分析。基于本结构,可以进一步研究其他形状或者尺寸大小的银盘阵列结构,也可以研究非规则的阵列结构,包括尺寸大小不均一的情况或者无序排列情况。同时,关于实验研究工作的开展,也仍需进一步深入研究。

参 考 文 献

- 1 Fang Zhilie, Liu Muqing. Technology status of light emitting diodes[J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2010, **47**(6): 062502
- 方志烈, 刘木清. 半导体照明光源的技术进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(6): 062502
- 2 K. Okamoto, Y. Yawakami. High-efficiency InGaN/GaN light emitters based on nanophotonics and plasmonics[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2009, **15**(4): 1199~1209
- 3 C. Y. Cho, M. K. Kwon, S. J. Lee *et al.*. Surface plasmon-enhanced light-emitting diodes using silver nanoparticles embedded in p-GaN[J]. *Nanotechnol.*, 2010, **21**(20): 205201
- 4 C. Y. Cho, S. J. Lee, J. H. Song *et al.*. Enhanced optical output power of green light-emitting diodes by surface plasmon of gold nanoparticles[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(5): 051106
- 5 W. H. Chuang, J. Y. Wang, C. C. Yang *et al.*. Numerical study on quantum efficiency enhancement of a light-emitting diode based on surface plasmon coupling with a quantum well[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(16): 1339~1341
- 6 Chen Jian, Wang Qingkang, Li Haihua. Effect of random perturbation of structural parameters on the light extraction efficiency of light emitting diodes with photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 233~236
- 陈 健, 王庆康, 李海华. 光子晶体结构参数的随机扰动对光子晶体 LED 出光效率的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 233~236
- 7 D. H. Long, I. K. Hwang, S. W. Ryu. Design optimization of photonic crystal structure for improved light extraction of GaN

- LED[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2009, **15**(4): 1257~1263
- 8 Y. C. Shin, D. H. Kim, E. H. Kim *et al.*. High efficiency GaN light-emitting diodes with two dimensional photonic crystal structures of deep-hole square lattices[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(1): 116~120
- 9 A. David, H. Benisty, C. Weisbuch. Optimization of light-diffracting photonic-crystals for high extraction efficiency LEDs [J]. *J. Display Technol.*, 2007, **3**(2): 133~148
- 10 Zhang Zhiyou, Du Jinglei, Li Min *et al.*. Optimal design of superfocusing lens configuration based on surface plasmon polariton coupling plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2524~2528
- 张志友, 杜惊雷, 李 敏等. 基于表面等离子体激元耦合相位板超聚焦透镜结构的优化设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2524~2528
- 11 Chen Yong, Zheng Rongsheng, Lu Yonghua *et al.*. Fiber-optic surface plasmon resonant sensor with low-index anti-oxidation coating[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(10): 100605
- 12 Y. Z. Lin, K. Li, F. M. Kong *et al.*. Comprehensive numeric study of gallium nitride light-emitting diodes adopting surface plasmon mediated light emission technique[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2011, **17**(4): 942~951
- 13 A. David, T. Fujii, R. Sharma *et al.*. Photonic-crystal GaN light-emitting diodes with tailored guided modes distribution[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(6): 061124
- 14 G. Sun, J. B. Khurgin, R. A. Soref. Practicable enhancement of spontaneous emission using surface plasmons[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(11): 111107
- 15 H. Benisty, R. Stanley, M. Mayer. Method of source terms for dipole emission modification in modes of arbitrary planar structures[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(5): 1192~1201
- 16 Ge Debiao, Yan Yubo. Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. 8~24
- 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. 8~24
- 17 P. B. Johnson, R. W. Christy. Optical constants of the noble metals[J]. *Phys. Rev. B*, 1972, **6**(12): 4370~4379
- 18 Y. Xu, J. S. Vuckovic, R. K. Lee *et al.*. Finite-difference time-domain calculation of spontaneous emission lifetime in a microcavity[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(3): 465~474
- 19 Gu Benyuan. Surface plasmon sub-wavelength optics: principles and novel effects[J]. *Physics*, 2007, **36**(4): 280~287
- 顾本源. 表面等离子体亚波长光学原理和新颖效应[J]. *物理*, 2007, **36**(4): 280~287
- 20 M. K. Kwon, J. Y. Kim, B. H. Kim *et al.*. Surface-plasmon-enhanced light-emitting diodes[J]. *Adv. Mater.*, 2008, **20**(7): 1253~1257