

纳米半球微镜阵列结构对 GaN 基 LED 光提取效率的影响

王晓民^{1,2} 李 康¹ 孔凡敏¹ 张振明¹ 高 晖¹

(¹ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

(² 山东大学附属省立医院, 山东 济南 250014)

摘要 为了分析表面纳米半球微镜结构对 GaN 基发光二极管(LED)光提取效率的影响,利用时域有限差分法(FDTD)分别对 GaN、ZnO、SiO₂、聚苯乙烯组成的半球微镜结构进行了分析和比较,同时用模式分析方法从理论上对 FDTD 计算结果进行了进一步验证。研究发现,在亚波长范围,折射率较小的材料不利于导模与表面结构层的耦合,不会对光提取效率的提高产生明显影响。相比之下,折射率较大的材料会使更多的模式耦合到半球微镜阵列层,更有利于光提取效率的提高;当材料选定,纳米半球半径增加时,光提取效率也逐渐增加,优化后半径为 600 nm 的半球微镜阵列结构 GaN 基 LED,其光提取效率比没有结构的普通平板 LED 增强 5.66 倍,在以上波导材料结构中最为优化。在此基础上,通过等效折射率的计算得到半球微镜结构的等效折射率模型,并利用非对称平板模式分析的办法对以上得到的结论进行了分析和验证。这些结果对实际的高性能 GaN 基 LED 的设计与优化具有重要意义。

关键词 光学器件;发光二极管;时域有限差分法;光提取效率;半球微镜结构;模式分析

中图分类号 O472 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1223001

Effect of Structure of Nano-Hemisphere Microlens Array on Light Extraction Efficiency of GaN-LED

Wang Xiaomin^{1,2} Li Kang¹ Kong Fanmin¹ Zhang Zhenming¹ Gao Hui¹

(¹ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan, Shandong 250100, China)
(² Biomedical Engineering Department, Shandong Provincial Hospital Affiliated to Shandong University, Ji'nan, Shandong 250014, China)

Abstract To improve the light extraction efficiency (LEE) of GaN-LED with hemisphere microlens array surface structure, four kinds of waveguide materials such as GaN, ZnO, SiO₂ and polystyrene are studied with finite-difference time-domain method. The simulation results are further tested by mode analysis method. The results show that the LEE can be improved when the refractive index grows higher, and the LEE of microlens array with bigger radius hemisphere is better in the subwavelength structure. The optimized model with 600 nm radius hemisphere microlens array of GaN material, with which the LEE exhibits 5.66 times enhancement than that of the planar LED, is the best output among those results. The above results are analyzed and verified by the asymmetric planar mode analysis method with equivalent refractive index. These results provide a theoretical guide on the practical design and optimization of highly efficient GaN-based LED.

Key words optical devices; light emitting diode; finite-difference time-domain; light extraction efficiency; hemisphere microlens structure; mode analysis

OCIS codes 230.3670; 230.0250; 160.5298

收稿日期: 2012-04-06; **收到修改稿日期**: 2012-07-08

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: 王晓民(1973—),男,博士研究生,副主任技师,主要从事电磁场数值计算、LED 建模仿真和生物医学工程等方面的研究。E-mail: antwxm@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

在目前半导体固体发光器件中,由于发光二极管(LED)具有节能环保、高可靠性、长寿命和小体积等优点,被广泛应用于移动设备、交通信号、背景显示、医疗和日常照明等诸多领域。随着相关技术的不断发展,GaN基LED作为白光照明的新型光源,有望替代其他传统的照明光源,成为未来照明的最佳选择^[1~4]。但是,发光效率不高成为目前制约该技术发展的重要因素。由于GaN的折射率与空气折射率之间存在较大差异,光线在二者界面上会发生全内反射而折回到半导体中,从而使得大部分光能量被束缚在半导体内部;并且光线在穿透界面时会发生菲涅耳反射,也不可避免地造成能量的损失。对于无任何表面结构的GaN基蓝光LED,其顶端光提取效率(LEE)仅为4%左右。如何提高LED的光提取效率,是现在国际上半导体发光界重点研究的问题。

科研人员提出了诸多提升GaN基蓝光LED顶端光提取效率的方式。其中最直接的方法就是在LED上下表面做结构,通过破坏光的全内反射来将束缚在内的光提取出来,包括图形化衬底、表面粗化、光子晶体结构以及表面微结构等。图形化衬底是早期应用较为有效的技术,通过倒装芯片技术以及蚀刻法在衬底表面进行图案加工,可以得到30%~50%的出光效率提高^[5~7]。表面粗化也是有效提高光输出功率的通用方式之一,通过铂、镍等金属簇做蚀刻掩模进行表面粗化或生成表面不规则锥簇,可以达到40%以上的出光效率增强^[8~10]。另外,光子晶体技术的兴起和运用成为近些年来研究的热点,光子晶体结构抑制了自主的光发射形式,将更多的模式分配到出光模式,导致了出光强度的提升,表面刻蚀光子晶体能够得到成倍的出光效率^[11~17]。

以上技术中,图形化衬底技术光提取效率相对其他几项技术提升效率相对较小;对于表面粗化来说,由于其具有很大的不确定性,目前难以用理论来模拟和分析。在LED表面刻蚀光子晶体,可以在一定程度上提高光提取效率,不过工艺复杂,成本较高。

近年来,添加表面微结构来增加LED出光的技术得到了很多研究者的关注。比如Ee等^[18]通过SiO₂与聚苯乙烯(PS)胶体球快速对流沉积法形成表层三角晶格阵列,出光效率达到219%,Lee等^[19]通过液相沉积法生成表面SiO₂半球微镜结构,出光效率达到1.29倍以上,Wu等^[20]通过p-GaN层蚀刻得到类似半球结构表面阵列,出光效率增强到

250%,近期,Yin等^[21]实验得到在氧化铟锡(ITO)上生长ZnO表层柱(椎)结构,出光效率提高到110%。目前各种材料应用到表面微结构,使LED得到了不同程度光提取效率增强,但波导材料结构和属性与光提取效率间联系尚未得到清晰阐明。

为了研究表面纳米微镜结构对LED光提取效率的影响,分别采用GaN、ZnO、SiO₂、PS作为表面微镜结构的材料,利用时域有限差分法(FDTD)对LED进行建模计算。目前,光学模拟的方法研究微结构对LED光提取效率影响的研究工作主要有传输矩阵法^[22,23]、平面波扩展法^[24,25]、FDTD^[26,27]、有限元法^[28]及基于几何光学的蒙特卡罗射线跟踪法^[29,30]等,其中尤以FDTD算法和射线跟踪法目前较为常见。FDTD算法是时域迭代方式的求解过程,可以有效地处理复杂形状目标和非均匀介质物体的电磁场传播、散射和辐射等问题。与其他电磁场数值仿真方法相比,该算法简单直观,网格划分灵活,通用性强,对计算机性能和内存大小要求很高。但是,基于上述数值分析的手段仍未能从理论上阐明影响GaN蓝光LED出光效率的真正原因。对于LED结构内部的能量分布、模式耦合机制尚不清楚,使得结构优化带有一定的盲目性。通过等效折射率近似,提出将LED模型看作多层介质波导进行模式分析的理论。完善了LED中的模式分析方法,从而为LED的建模仿真及相应结构参数的优化提供了更为便利的手段,能够在一定程度上阐明LED各层结构中的结构参数对LED光提取效率影响的物理机制。

由于计算量的限定和模型大小的局限,当半径超出600 nm之后,一方面直径已经达到微米量级,超出亚波长尺度,另一方面,很难继续保持建模尺寸下的微镜阵列排布特点,通过此计算方法难以继续得到精确结论。多数实验报道了亚波长范围微镜结构的良好光提取效率^[18~20],为确保准确性,在600 nm以下选取不同的半径参数对计算的光提取效率进行比较,得到光提取效率与表面半球结构的折射率的对应关系。

2 FDTD 仿真及结论

计算所采用的LED结构模型如图1所示,自下而上依次为厚度为1000 nm的蓝宝石衬底(折射率 $n=1.7$)、n-GaN、量子阱有源层(MQW)、p-GaN($n=2.5$)和表面纳米半球阵列结构。其中图1(a)给出了GaN基LED的三维结构仿真模型,图1(b)

给出了沿 LED 生长方向的二维纵切面示意图。其中有源层距离顶端出光面的距离为 200 nm，整个 GaN 层厚度为 2000 nm。在仿真区域表面有半球微镜阵列结构。表面纳米半球半径为 r ，蓝光的中心波长选为 465 nm。文献[27,31]证明，对于有源层内的电子-空穴复合发光过程，可以用水平放置的

电偶极子来模拟，通过单偶极子源建模来代替 GaN 基蓝光 LED 量子阱的载流子复合发光进行 LED 的数值仿真。本文采用位于有源层 xoy 面中心，横向平放的电流源替代有源层作为发光源进行仿真计算。

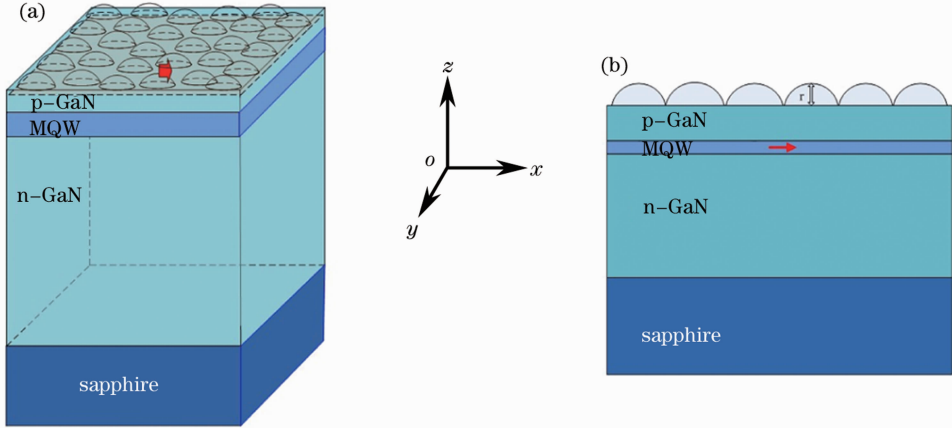


图 1 GaN 基 LED (a)三维结构和(b)二维截面表面半球微镜阵列示意图

Fig. 1 Schematic of GaN-based LED (a) 3D structure and (b) 2D cross section surface hemisphere microlens array

为了计算顶端光提取效率，所计算的区域不仅包含整体 LED 结构。在整个计算区域 ($4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$) 的侧面及上表面添加了完美匹配层 (PML)，用来吸收外来波和避免非电磁反射，同时在下底面引入完美导体层来模拟实际 LED 结构中底部金属接触(金属反射镜)对能量的反射。

需要指出的是，实际的大功率 GaN 基蓝光 LED 尺寸多为数百微米甚至是毫米量级，但考虑到现有的计算条件，若对这种大尺寸的结构进行 FDTD 计算，则在确保计算精确性的前提下，将需要巨大数量的网格，相应的内存需求也是现有的计算条件所不能满足的。根据文献[27]报道， $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ 的尺度已经很接近较大尺度如 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ 的计算结论。故本文采用了较小的尺寸来计算，在尽可能保证模拟的真实性的情况下取计算的近似值。

光提取效率的概念包含了顶端光提取效率及侧面出光提取效率。在实际的大功率 LED 结构中，其上下两个表面的尺寸在几百微米的数量级，而其侧面的尺寸仅为几微米，故相比较而言，侧面的出光是可以忽略不计的。而对于下表面而言，实际的 LED 结构中，底部一般有反射层，故底部的出光会反射回结构内部。基于发光二极管出光特点，为进行定量比较，定义顶端光提取效率 η_{extr} 为上表面出光功率与源的总功率之比，即

$$\eta_{\text{extr}} = \frac{p_{z,\text{out}}^+}{p_{x,\text{in}}^+ + p_{x,\text{in}}^- + p_{y,\text{in}}^+ + p_{y,\text{in}}^- + p_{z,\text{in}}^+ + p_{z,\text{in}}^-}, \quad (1)$$

式中 $p_{z,\text{out}}^+$ 为在发光二极管 LED 上表面的出光功率， $p_{x,\text{in}}^+, p_{x,\text{in}}^-$ 为在 x 方向上正向与反向数轴的功率值，其余类同。顶端光提取效率增强因子 F 定义为

$$F = \frac{\eta_{\text{extr}}}{\eta_0}, \quad (2)$$

式中 η_0 是无特殊表面结构的普通 LED 的竖直方向上的光提取效率。采用不同折射率材料 SiO_2 ($n = 1.46$), PS ($n = 1.58$), ZnO ($n = 2.0$), GaN ($n = 2.5$) 的 LED 表面半球微镜结构，在 $50 \sim 600 \text{ nm}$ 范围，分别选取不同半球半径，每间隔 50 nm 进行取样运算，得到仿真结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出，相对于 GaN 和 ZnO 材料，PS 和 SiO_2 半球的半径变化对光提取效率的影响不明显。折射率为 2.5 的 GaN 材料的光提取效率最大，当半径取值 600 nm 时光提取效率增强因子 F 达到 5.66。由此推论，选取材料实现表面半球微镜阵列的材料如果在同样的技术实施难度下，仅考虑折射率因素，依次为 GaN、ZnO、PS 和 SiO_2 。

3 模式分析方法及验证

3.1 光子晶体等效折射率推导

由于表面微镜结构在 $x-y$ 截面介电常数呈现规

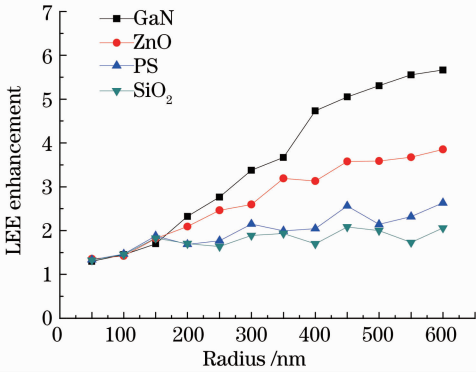


图 2 不同材料光提取效率增强因子与半径关系图
Fig. 2 Relation of LEE enhancement and radius for various materials

则排列,符合光子晶体的结构特点,为了通过等效折射率的非对称平板模式分析方法分析以上结论的合理性,首先按照光子晶体的空间排列特点推导半球微镜阵列层平板的等效折射率。

按照图 3(a)所示紧密排列的三角晶格特点,表面半球结构材料的折射率为 n_{sphere} ,空气折射率用

n_{air} 代替,半球三角晶格阵列等效折射率可表示为

$$n_{\text{eff}} = n_{\text{sphere}} \times \frac{(1/3)\pi r^3}{\sqrt{3}r^3} + n_{\text{air}} \times \frac{\sqrt{3}r^3 - (1/3)\pi r^3}{\sqrt{3}r^3}, \quad (3)$$

式中当折射率 n_{sphere} 分别取 2.5, 2, 1.58, 1.46, 由(3)式推导出对应的折射率值 n_{eff} 为 1.92, 1.61, 1.35, 1.28。为了系统作比较,对四方晶格表面微镜结构也进行了推导。对于图 3(b)所示四方晶格排列的半球阵列,由于相对空隙比三角晶格阵列要大,所以对应的等效折射率会相对小些,等效折射率可表示为

$$n_{\text{eff}} = n_{\text{sphere}} \times \frac{(2/3)\pi r^3}{4r^3} + n_{\text{air}} \times \frac{4r^3 - (2/3)\pi r^3}{4r^3}, \quad (4)$$

当折射率 n_{sphere} 分别取 2.5, 2, 1.58, 1.46, 由(4)式推导出对应的折射率值为 1.79, 1.52, 1.30, 1.24。通过(3)、(4)式扩展部分中间折射率数值获得表格如表 1 所示。图 3(c)为单个半球单元在三维空间的结构示意图。

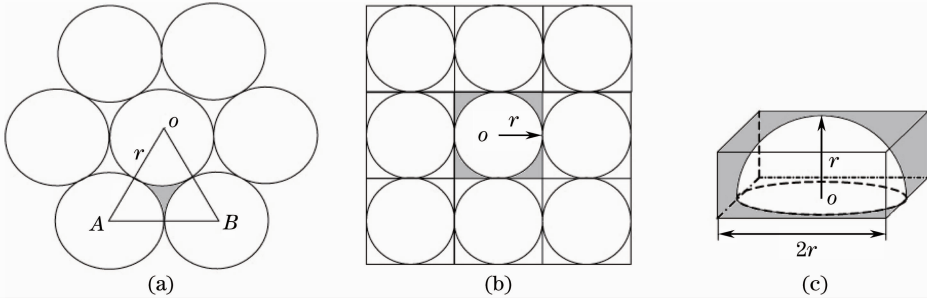


图 3 (a) 三角晶格表面半球阵列横截面示意图; (b) 四方晶格表面半球阵列横截面示意图; (c) 单个半球三维空间结构示意图

Fig. 3 (a) Cross section schematic of triangular lattice of surface hemisphere microlens array; (b) cross section schematic of square lattice of surface hemisphere microlens array; (c) schematic of single hemisphere 3D structure

表 1 三角晶格与四方晶格表面微镜结构层等效折射率表

Table 1 Equivalent refractive indexes of triangular and square lattice of surface hemisphere microlens array

n_{sphere}	1.0	1.2	1.46	1.58	1.8	2	2.2	2.4	2.5
Triangular n_{eff}	1.0	1.12	1.28	1.35	1.49	1.61	1.73	1.85	1.92
Square n_{eff}	1.0	1.10	1.24	1.30	1.42	1.52	1.63	1.73	1.79

从以上对于三角晶格与四方晶格的半球阵列表面微镜结构层等效折射率(见表 1)的对比可以看出,三角晶格结构的光子晶体结构等效折射率大于四方晶格结构的同等半径的等效折射率。由于实验生成的表面微镜结构多为近似三角晶格紧密排列,因此以下模式分析也按照三角晶格结构对应的等效折射率分析。

3.2 模式分析验证

利用求解介质波导模式的方法来对 GaN 基蓝

光 LED 的结构参数进行分析。由于微镜结构底部折射率从较高值渐变到 $n=1$,按照客观全面的等效原则,应该分多层不同折射率层按照多层平板进行等效,单层一般不能达到真实仿真状况。例如,通过半径为 600 nm 微镜阵列结构的计算,等效为单层平板的出光效率比没有特殊结构时仅增强 1.37 倍,这与真实微镜结构相比还是有较大差距,如果增加多层平板来近似等效,将会逼近真实结论,但是计算量增加巨大。对比同等微镜结构的不同材料时,重

点在于比较不同材料折射率对出光模式的影响。为了实现理论突破,并为今后的深化分析提供借鉴,采用简化了的单层平板模型进行模式分析,仅考虑由于材料折射率变化而导致整体光提取效率的改变因素,通过等效折射率近似的方式将表面半球微镜结构等效为一层均匀介质波导。

这样该结构可以简化成为有限层数的非对称平板波导结构。结合麦克斯韦方程组和边界连续性条件便可以得出结构内介质波导模式分布。

取自下而上三层波导材料分别为介质衬底层、GaN 芯层、半球微镜结构等效折射率层。介电常数设定为 $\epsilon_{\text{substrate}}, \epsilon_{\text{core}}, \epsilon_{\text{sphere}}$, 对于导模,传播常数 β 变化范围为

$$k_0 \epsilon_{\text{substrate}}^{1/2} < \beta < k_0 \epsilon_{\text{core}}^{1/2}, \quad (5)$$

式中 k_0 为波数。假设芯层高度为 h , 为简化公式运算,设 γ 变量

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{core}}^2 &= k_0^2 \epsilon_{\text{core}}(x) - \beta^2, \gamma_{\text{substrate}}^2 = k_0^2 \epsilon_{\text{substrate}}(x) - \beta^2, \\ \gamma_{\text{sphere}}^2 &= k_0^2 \epsilon_{\text{sphere}}(x) - \beta^2, \end{aligned} \quad (6)$$

得到 TE 导模的特征方程为

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{core}} h &= m\pi + \arctan \frac{\gamma_{\text{substrate}}}{\gamma_{\text{core}}} + \arctan \frac{\gamma_{\text{sphere}}}{\gamma_{\text{core}}}, \\ m &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (7)$$

TE 导模的电场分量 $E_{y_0}(x)$ 和传播常数 β 满足的横向亥姆霍兹方程为

$$\frac{d^2 E_{y_0}(x)}{dx^2} + [k_0^2 \epsilon(x) - \beta^2] E_{y_0}(x) = 0. \quad (8)$$

由上述公式可以求解得到以 GaN 为芯层的各种 TE 导模。

首先考虑折射率维持不变,仅变化微镜阵列结构小球的半径,图 4 给出了半球微镜结构层为 SiO_2 , 折射率为 1.46, 等效折射率为 1.28, 半径分别为 100 nm 和 400 nm 时对应的三层非对称平板波导低阶导模变化情况,图中背景中黑色曲线为 0 阶模,白色线为高阶模。

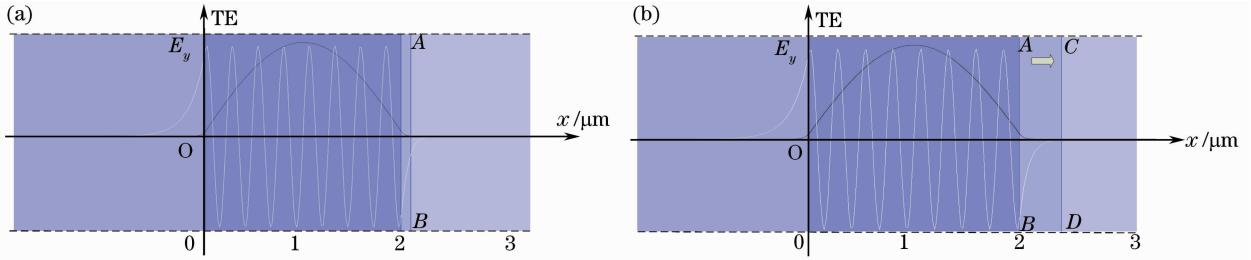


图 4 $n_{\text{eff}}=1.28$ 时 TE 模式分布图。(a) $r=100$ nm; (b) $r=400$ nm

Fig. 4 TE modes distribution maps when $n_{\text{eff}}=1.28$. (a) $r=100$ nm; (b) $r=400$ nm

从图 4 看到,当等效折射率为 1.28 时,有极少低阶模分布在半球微镜结构层区域,高阶模也未能耦合到表层。从图 4(b)看出,当半球微镜结构层厚度由 \overline{AB} 向 \overline{CD} 变化的过程,耦合没有明显增加。结合图 2 的 FDTD 计算结果分析,验证了在取材 SiO_2 , 半球半径从 100~500 nm 增长缓慢,到超过 500 nm 后,光提取效率不再明显增加。

当折射率增加后,情况有所不同。采用 GaN 作为表面微镜结构材料,折射率为 2.5, 等效折射率为 $n_{\text{eff}}=1.92$ 时的模式计算结果,如图 5 所示。从图 5 中可以看出,当 $r=100$ nm 时,支持 15 个 TE 模式,只有一个高阶模式可以进入半球微镜结构层区域,这种状态下光提取效率增强仍不明显,如图 5(a)所示;当 $r=200$ nm 时,支持 15 个 TE 模式,有 3 种模式进入半球微镜结构层区域,有效耦合有一定的增强,如图 5(b)所示;当 $r=300$ nm 时,支持 16 个 TE 模式,有 4 种模式进入半球微镜结构层区域,有效耦

合明显增强,如图 5(c)所示;当 $r=400$ nm 和 500 nm 时,均支持 17 个 TE 模式,有 5 种模式进入半球微镜结构层区域,得到有效耦合继续增强,如图 5(d)和 (e);当 $r=600$ nm 时,支持 18 个 TE 模式,有 6 种模进入半球微镜结构层区域,得到最大有效耦合状态,如图 5(f)所示。

随着半径 r 的增加,表面结构层的厚度增大,有越来越多的模式存在于表面结构层中,这些模式可以被表面半球微镜阵列结构提取到空气中,因此,随着半球半径的增大,光提取效率必然呈现增大的趋势,这验证了图 2 所示的 FDTD 计算结果。为从能量角度更明确看出这种趋势,将其中 $r=100$ nm 与 $r=600$ nm 场强功率分布进行了比较,如图 6 所示,从图中可以看出,不同半径 $r=100$ nm 与 600 nm 的低阶模 E_y^2 在半球微镜结构层区域,后者比前者 E_y^2 能量增强了一倍以上。如改变构成半球微镜结构的材料,按照 PS 及 ZnO 的折射率再进行分析计

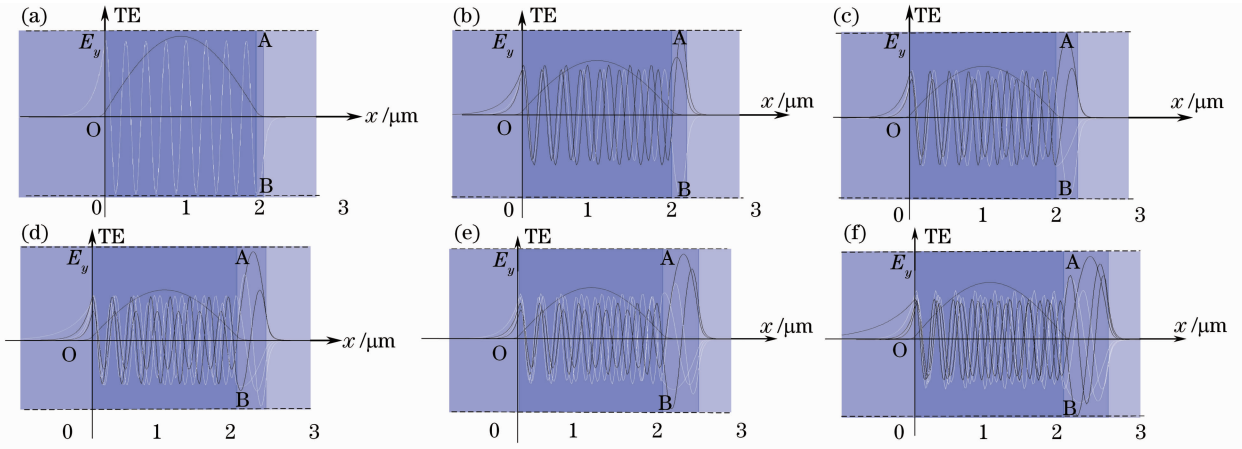


图 5 $n_{\text{eff}}=1.92$ 对应的 TE 模式分布图。(a) $r=100\text{ nm}$; (b) $r=200\text{ nm}$; (c) $r=300\text{ nm}$; (d) $r=400\text{ nm}$; (e) $r=500\text{ nm}$; (f) $r=600\text{ nm}$

Fig. 5 TE modes distribution maps corresponding to $n_{\text{eff}}=1.92$. (a) $r=100\text{ nm}$; (b) $r=200\text{ nm}$; (c) $r=300\text{ nm}$; (d) $r=400\text{ nm}$; (e) $r=500\text{ nm}$; (f) $r=600\text{ nm}$

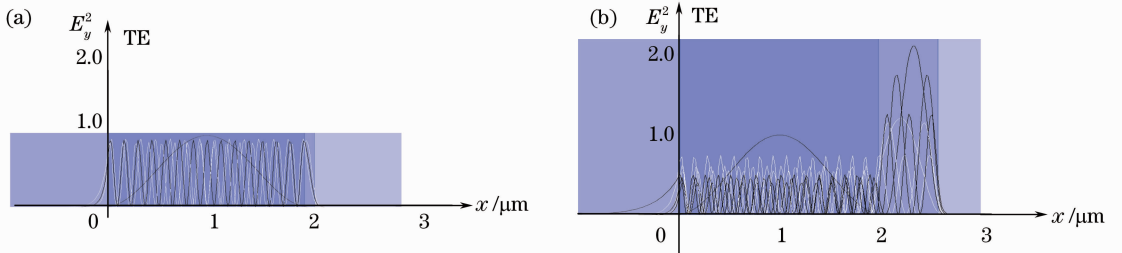


图 6 $n_{\text{eff}}=1.92$ 对应的 TE 模式场强功率分布图。(a) $r=100\text{ nm}$; (b) $r=600\text{ nm}$

Fig. 6 TE modes field strength power distribution maps corresponding to $n_{\text{eff}}=1.92$. (a) $r=100\text{ nm}$; (b) $r=600\text{ nm}$

算,各种模式变化介于 SiO_2 与 GaN 计算结果区间。这与之前通过 FDTD 得到的计算结论也是一致的。

4 结 论

利用 FDTD 与模式分析的方法对采用不同材料作为表面半球微镜结构的 LED 进行了亚波长范围的计算和比较。通过 FDTD 计算结果发现,LED 表面半球微镜结构的材料折射率的变化对光提取效率产生明显影响,与低折射率材料 PS 和 SiO_2 相比,折射率较大的材料 GaN 、 ZnO 使得光提取效率会有更大的增强。为了从理论上进行更为深入的分析,采用等效折射率方式将半球微镜阵列结构 LED 模型等效为平面波导结构,从模式分析的角度分析了不同折射率表面半球微镜阵列结构对 LED 中电场模式的影响,对 FDTD 计算结果进行了验证。当表面阵列结构的折射率较低时,进入到表面结构层的模式部分很少,从而导致其无法与表面结构进行有效地耦合,此时表面结构的厚度变化对光提取效率不会产生明显影响。而当表面阵列结构的折射率

较高时,有更多的模式进入到表面结构层中,从而使更多的能量被耦合并提取出来,此时,等效折射率层的厚度变化对光提取效率影响更为积极。此时厚度的增加也会使更多的模式进入到表面结构层,从而使光提取效率得到提高。这就从模式的角度解释了折射率及半径参量变化对于半球微镜阵列结构 GaN 基蓝光 LED 光提取效率的影响。

结果表明,在亚波长领域,对于采用表面纳米半球微镜阵列结构的方法提高 GaN 基 LED 光提取效率,其表面半球微镜阵列结构的材料为 GaN 时,光提取效率最高可增强到 5.66 倍;对于半径在 600 nm 以下的半球微镜阵列,半径增大,更容易提高光提取效率。这为高性能 LED 的优化及大规模商业应用提供了重要的理论依据。

参 考 文 献

- 1 F. Nguyen. Challenges in the design of a RGB LED display for indoor applications [J]. *Synthetic Metals*, 2001, **122** (1): 215~219
- 2 D. A. Steigerwald, J. C. Bhat, D. Collins *et al.*. Illumination

- with solid state lighting technology[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(2): 310~320
- 3 D. Fyfe. LED Technology: organic displays come of age[J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(8): 453
- 4 Luo Yi, Feng Zexin, Han Yanjun *et al.*. Optics in solid state lighting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900117
罗毅, 冯泽心, 韩彦军等. 面向半导体照明的光学[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900117
- 5 D. S. Han, J. Y. Kim, S. I. Na *et al.*. Improvement of light extraction efficiency of flip-chip light-emitting diode by texturing the bottom side surface of sapphire substrate[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(13): 1406~1408
- 6 C. F. Shen, S. J. Chang, W. S. Chen *et al.*. Nitride-based high-power flip-chip LED with double-side patterned sapphire substrate[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(10): 780~782
- 7 Huang Hongyong, Guo Zhiyou, Ye Guoguang *et al.*. Influence of patterned substrate parameters on luminous efficiency of LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): 100416
黄鸿勇, 郭志友, 叶国光等. 图形衬底参数对 LED 发光效率的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): 100416
- 8 C. Huh, K. S. Lee, E. J. Kang *et al.*. Improved light-output and electrical performance of InGaN-based light-emitting diode by microroughening of the p-GaN surface[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**: 9383
- 9 H. W. Huang, C. C. Kao, J. T. Chu *et al.*. Improvement of InGaN-GaN light-emitting diode performance with a nano-roughened p-GaN surface[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(5): 983~985
- 10 T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma *et al.*. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**: 855
- 11 Y. C. Shin, D. H. Kim, D. J. Chae *et al.*. Effects of nanometer-scale photonic crystal structures on the light extraction from GaN light-emitting diodes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(9): 1375~1380
- 12 S. M. Pan, R. C. Tu, Y. M. Fan *et al.*. Enhanced output power of InGaN-GaN light-emitting diodes with high-transparency nickel-oxide-indium-tin-oxide ohmic contacts [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(5): 646~648
- 13 X. X. Fu, B. Zhang, X. N. Kang *et al.*. GaN-based light-emitting diodes with photonic crystals structures fabricated by porous anodic alumina template [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(105): A1104~A1108
- 14 C. Y. Huang, H. M. Ku, S. Chao. Light extraction enhancement for InGaN/GaN LED by three dimensional auto-cloned photonics crystal [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23702~23711
- 15 T. A. Truong, L. M. Campos, E. Matioli *et al.*. Light extraction from GaN-based light emitting diode structures with a noninvasive two-dimensional photonic crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(2): 023101
- 16 M. Fujita, S. Takahashi, Y. Tanaka *et al.*. Simultaneous inhibition and redistribution of spontaneous light emission in photonic crystals[J]. *Science*, 2005, **308**(5726): 1296~1298
- 17 H. Y. Ryu, J. I. Shim. Structural parameter dependence of light extraction efficiency in photonic crystal InGaN vertical light-emitting diode structures [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(5): 714~720
- 18 Y. K. Ee, R. A. Arif, N. Tansu *et al.*. Enhancement of light extraction efficiency of InGaN quantum wells light emitting diodes using SiO/polystyrene microlens arrays[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**: 221107
- 19 M. K. Lee, C. L. Ho, C. H. Fan. High light extraction efficiency of gallium nitride light emitting diode with silicon oxide hemispherical microlens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(6): 061103
- 20 M. L. Wu, Y. C. Lee, S. P. Yang *et al.*. Azimuthally isotropic irradiance of GaN-based light-emitting diodes with GaN microlens arrays[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 6148~6155
- 21 Z. Yin, X. Liu, Y. Wu *et al.*. Enhancement of light extraction in GaN-based light-emitting diodes using rough beveled ZnO nanocone arrays[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(2): 1013~1021
- 22 H. J. Gao, L. Y. Yu, P. J. Niu. Research on the utilization of AR coating to improve the LED luminous efficiency [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **301**: 208~212
- 23 B. Mulyanti, L. Hasanah, K. Rijal. The electrical characteristics model of GaN/InGaN/GaN heterostructure in InGaN-based LED[J]. *Applied Physics Research*, 2012, **4**(2): p98
- 24 G. M. Wu, Z. J. Cai, J. C. Wang *et al.*. Design and simulation in GaN based light emitting diodes using focused ion beam generated photonic crystals [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, **203**(17-18): 2674~2678
- 25 K. H. Li, H. W. Choi. Air-spaced GaN nanopillar photonic band gap structures patterned by nanosphere lithography[J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **109**(2): 23107
- 26 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. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(4): 1257~1263
- 27 H. Gao, L. Li, F. Kong *et al.*. Improving light extraction efficiency of GaN-based LEDs by Al_xGa_{1-x}N confining layer and embedded photonic crystals[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, pp(99): 1~11
- 28 L. Tan, J. Li, K. Wang *et al.*. Effects of defects on the thermal and optical performance of high-brightness light-emitting diodes [J]. *IEEE Trans. Electron. Packaging Manufacturing*, 2009, **32**(4): 233~240
- 29 Y. K. Ee, P. Kumnorkaew, R. A. Arif *et al.*. Light extraction efficiency enhancement of InGaN quantum wells light-emitting diodes with polydimethylsiloxane concave microstructures[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16): 13747~13757
- 30 Z. Liu, K. Wang, X. Luo *et al.*. Precise optical modeling of blue light-emitting diodes by Monte Carlo ray-tracing[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 9398~9412
- 31 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