

高光效 GaN 基 Micro-LED 仿真模型研究

胡新培¹, 蔡俊虎¹, 叶媛媛¹, 陈恩果^{1,2*}, 孙捷^{1,2}, 严群^{1,2}, 郭太良^{1,2}¹福州大学物理与信息工程学院平板显示技术国家地方联合工程实验室, 福建 福州 350108;²中国福建光电信息科学与技术创新实验室(闽都创新实验室), 福建 福州 350108

摘要 微型发光二极管(Micro-LED)显示芯片尺寸减小带来了侧壁效应,导致其正向光提取效率(LEE)降低,实现高光效 Micro-LED 的显示芯片结构仍有待深入研究。从仿真角度出发,基于有限差分时分域法探索高光效 GaN 基 Micro-LED 的优化模型。首先,构建垂直侧壁 GaN 基 Micro-LED 初始叠层结构,定量分析侧壁效应对 LEE 的影响。然后,探索 Micro-LED 多量子阱有源层位置变化对出光效果的影响,分析不同侧壁倾角条件下的 Micro-LED 结构模型,讨论底部反射材料对 LEE 的影响,获得初步优化的 GaN 基 Micro-LED 模型参数。最后,通过设计顶部透射光栅进一步提升 LEE,并探讨光栅周期、光栅高度和占空比对 LEE 的影响。结果表明,优化后的 GaN 基 Micro-LED 的整体 LEE 较初始结构提升了 2.42 倍。

关键词 光电子学; 微发光二极管; 光提取效率; 有限差分时分域法; 光栅; 分布式布拉格反射器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1525001

Simulation Model of GaN-Based Micro-LED with High Light Extraction Efficiency

Hu Xinpei¹, Cai Junhu¹, Ye Yuanyuan¹, Chen Enguo^{1,2*}, Sun Jie^{1,2}, Yan Qun^{1,2},
Guo Tai liang^{1,2}¹National & Local United Engineering Laboratory of Flat Panel Display Technology, College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;²Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China (Mindu Innovation Laboratory), Fuzhou 350108, Fujian, China

Abstract The reduction in the display chip size of micro light emitting diode (Micro-LED) exerts a sidewall effect and consequently results in a decreased forward light extraction efficiency (LEE). The display chip structure of Micro-LED with high LEE still needs to be further studied. For this reason, an optimized model of GaN-based Micro-LED with high LEE is explored by leveraging the finite-difference time-domain method from a simulation perspective. Specifically, the initial laminated structure of GaN-based Micro-LED with vertical sidewalls is constructed, and the influence of the sidewall effect on LEE is analyzed quantitatively. Then, the impact of the position change of multiple-quantum-well active layer in Micro-LED on the light output effect is investigated, and Micro-LED structure models with different inclined sidewall angles are analyzed. The influence of the bottom reflective material on LEE is discussed, and the parameters of the preliminarily optimized GaN-based Micro-LED model are obtained. Finally, LEE is further improved by designing a top transmission grating, and the effects of period, height, and duty cycle on LEE are examined. The results show that the overall LEE of the optimized GaN-based Micro-LED is 2.42 times higher than that of the initial structure.

Key words optoelectronics; micro light emitting diode; light extraction efficiency; finite-difference time-domain method; grating; distributed Bragg reflector

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-02-06; 录用日期: 2022-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(62175032)、福建省自然科学基金项目(2021J01579)、福建省科技重大专项(2021HZ021001)、闽都创新实验室自主部署项目资助项目(2020ZZ111)

通信作者: *ceg@fzu.edu.cn

1 引言

近年来,微型发光二极管(Micro-LED)显示技术备受关注,其应用涵盖了可穿戴设备、手机、车载显示、虚拟现实/增强现实、微型投影和高端电视等领域^[1-5]。Micro-LED显示器具有峰值亮度高、对比度高、功耗低和寿命长的优势,有望取代液晶显示和有机发光二极管成为主流^[6-7]。然而,制备Micro-LED的III族氮化物半导体的折射率约为2.5,与周围介质存在较大的折射率差,这会导致界面间的全内反射严重,使得有源区产生的光子大部分被限制在Micro-LED结构内部直至被吸收损耗殆尽。光提取效率(LEE)提升是设计高光效Micro-LED器件首要考虑的因素^[8-10]。

常规LED的尺寸均大于200 μm ,其侧壁面积占LED正向发光面积的比例有限。Micro-LED芯片尺寸一般小于50 μm ,当芯片尺寸缩小到15 μm 时,由于芯片内部吸收和反射损耗有限,故红色、蓝色和绿色Micro-LED的侧壁发射比将分别增加约184%、24%和24%^[11-13]。虽然Micro-LED的整体光提取效率会因侧壁出光的增加而提高,但是Micro-LED的远场辐射光强分布偏离理想的朗伯分布,这不利于实现Micro-LED全彩化显示,并限制了正向光提取效率,进而导致Micro-LED的光效难以提升^[14-15]。目前主流的高光效Micro-LED设计方案包括几何轮廓重塑、微结构阵列和等离激元等,其中:几何轮廓重塑是将Micro-LED的芯片设计为梯形、六边形和三角形等不同形状,这有助于打破界面全反射,提高Micro-LED正面的光提取效率^[16-18];微结构阵列是利用光子晶体、超构表面等周期性结构对光场进行调控,使更多的光子进入到逃逸锥中而被提取^[19-22];等离激元是利用亚波长金属结构,使原本被全反射束缚的光透过该结构出射,并与Micro-LED发光结构相互耦合,增强Micro-LED的自发辐射^[23-24]。由此可见,Micro-LED的结构模型对其光提取效率的提升具有重要意义,有待进一步深入研究。

本文针对当前Micro-LED尺寸减小所带来的正面光提取效率降低问题,基于有限差分时段(FDTD)方法,设计并优化高光效GaN基Micro-LED的仿真模型。首先,通过参数化扫描,选取单电偶极子在多个不同位置进行逐次仿真并求平均值的方法来模拟Micro-LED有源层发光,为Micro-LED有源层的仿真提供高准确性和高可靠性的新思路。然后,基于光的折反射、Cavity效应、光的干涉和光的衍射等理论,提出包括量子阱有源层位置、芯片外形、侧壁倾斜角度和底部反射材料4个紧密相连的Micro-LED高光效设计流程,并基于顶部透射光栅进一步提升Micro-LED的光效。最后,通过对比分析不同Micro-LED模型所得到的光提取效率、电场强度分布和空间光分布结果,得到最终的高光效GaN基Micro-LED结构模型,为进一步拓展高光效Micro-LED的仿真设计思路和高光效Micro-

LED的制备提供参考。

2 Micro-LED初始结构模型构建

如图1所示,首先建立并分析具有垂直侧壁的GaN基Micro-LED基本叠层结构。FDTD方法是通过求解随时间变化的麦克斯韦方程组得到有限区域内的电磁场分布,与基于蒙特卡罗算法的射线追踪法不同^[20],可以更加有效地处理复杂结构和波动光学现象。

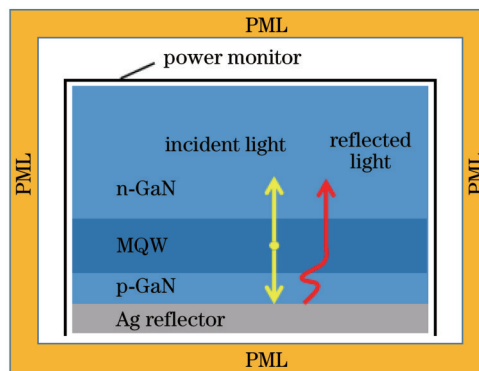


图1 基于FDTD方法构建的垂直侧壁GaN基Micro-LED基本叠层结构

Fig. 1 Basic laminated structure of GaN-based Micro-LED with vertical sidewalls based on FDTD method

整个Micro-LED被包含在计算域中,计算域的所有吸收边界条件均设置为完全匹配层(PML)。考虑到实际仿真效率和各个叠层结构对Micro-LED出光效果的影响,首先对基础仿真模型的结构参数设置进行适当简化^[25-26]。这种倒装GaN基Micro-LED叠层结构主要包括厚度为3 μm 的n-GaN层、厚度为200 nm的InGaN/GaN多量子阱(MQW)有源层和高反射率金属层上方的p-GaN层,其中金属材料为反射率为90%以上的银。设GaN层和MQW层的折射率分别为 $2.45+0.0016i$ 和 $2.48+7.32\times 10^{-5}i$ ^[27]。在计算中,将光谱中心波长为460 nm的电偶极子源置于MQW层中,以代表电子-空穴复合产生的光源。功率监视器设置在n-GaN层一侧的出光面和四周侧壁处,用于收集传输功率并记录近场电场辐射。在本研究中,LEE的定义为功率监视器接收到的整体光提取效率与偶极子源的总发射功率之比。

由于实际的LED有源层中不同的电子和空穴发生辐射复合时产生的光子波矢量不同,即这些波矢量之间彼此是不相干的,故有源层中使用的电偶极子越多结果越可靠,但要确保各个电偶极子之间具有不同的极化方向、频率和初始相位等特性^[28]。Wang等^[29]已经指出单电偶极子和同时放置多电偶极子都无法准确可靠地模拟实际Micro-LED出光。基于此,本文基于参数化扫描选用单电偶极子在多个不同位置处进行逐次仿真并求平均值的方法来近似模拟Micro-LED发光情况,有效避免了以上两种不合理的有源层模拟。理论上电偶极子位置数

量越多,结果越精确,但考虑到仿真效率的问题,需要对其数量进行合理的选择,通过参数化扫描,可以得到 Micro-LED 光提取效率与电偶极子位置的数量 N 的关系曲线图,如图 2 所示。可以看到,当 N 大于 12 时,光提取效率趋于稳定。因此,最终采取均匀分布于 MQW 层中 12 个电偶极子位置处所得到的结果的平均值来描述实际的有源层出光情况。

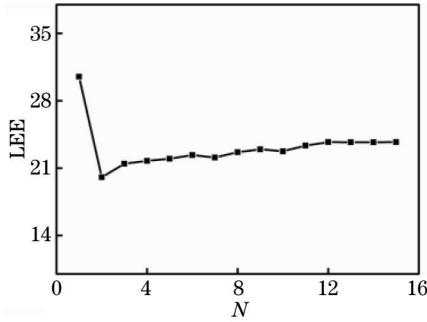


图 2 Micro-LED 的 LEE 与电偶极子位置数量的关系

Fig. 2 Micro-LED LEE varying with number of electric dipole locations

随着 Micro-LED 芯片尺寸的减小,侧壁发光面占比逐渐增大,侧壁发射所占 Micro-LED 整体光提取效率的比重如图 3 所示。从图中折线可以看到,随着芯片尺寸由 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 减小到 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$, Micro-LED 的整体光提取效率由 47.9% 增加到 89.5%,但从柱状图中可以发现,此时正向光提取效率占整体光提取效率的比例下降为原来的 1/2,说明侧壁发射不断增强甚至占据主导地位。然而,由侧壁发射增加而导致的 Micro-LED 光提取效率提升并不利于实现高性能显示,因为这将带来显示子像素间串扰增大、显示色偏和对对比度下降等问题。因此,实现高光效 Micro-LED 的本质在于提升 Micro-LED 正面光提取效率,这将在下文进行详细讨论。考虑到仿真实际要求和芯片尺寸对 Micro-LED 整体光提取效率的影响,下文中 GaN 基 Micro-LED 芯片的宽度均选用 $20\ \mu\text{m}$ 。

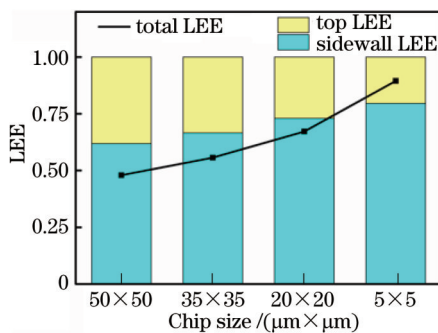


图 3 不同 Micro-LED 芯片尺寸对应的整体 LEE、正向 LEE 和侧壁 LEE

Fig. 3 Total LEE, top LEE and sidewall LEE varying with chip size of Micro-LED

3 Micro-LED 初始结构的光提取效率优化

3.1 多量子阱有源层位置优化

在 Micro-LED 叠层结构中,电子-空穴复合产生的光从 MQW 有源层中发出,由于 MQW 有源层十分靠近金属反射镜,故其发出的光会与反射光发生干涉。然而,逃逸锥中的干涉耦合模式将导致 Micro-LED 的光提取效率发生显著变化,故 MQW 有源层与反射层之间的距离对优化 Micro-LED 的光提取效率至关重要。

如图 4 所示,将代表光辐射的电偶极子置于空气中,假设其与银反射层的距离为 d ,监视器用于监测计算域内的电场强度分布。由光程差理论可知,干涉是由两路光的相消和相长产生的,这两路光分别是电偶极子向上直接出射到空气中的光和被 Ag 层反射后出射到空气中的光,其在垂直方向的光程差与半波长满足

$$2nd = K \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

式中: n 为周围介质的折射率; λ 为出射光的波长; K 为整数。当 K 为偶数时,两束光干涉相长,当 K 为奇数时,两束光干涉相消。若将电偶极子的中心波长设置为 $460\ \text{nm}$,当 d 的初始值为 $115\ \text{nm}$ 时,两束光将发生破坏性干涉,而当 d 的初始值为 $230\ \text{nm}$ 时,由式(1)可知,此时两束光会发生干涉相长。为了更清晰直观地展现 d 值变化对电偶极子电场强度分布的影响,以 $23\ \text{nm}$ 为步长改变参数 d 的值,最终分别得到了 d 为 $115, 138, 161, 184, 207\ \text{nm}$ 时的电偶极子电场强度分布情况,如图 5 所示。可以发现,电偶极子与 Ag 反射层的距离直接影响出射光的强度分布,出射光的强度主要取决于光程差是符合相长干涉条件还是符合相消干涉条件。

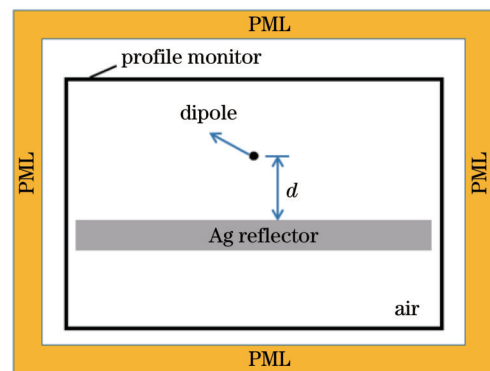


图 4 代表光辐射的电偶极子在空气中的仿真模型

Fig. 4 Simulation model of electric dipole representing light radiation in air

在 GaN 基 Micro-LED 中,电偶极子被放置在有一定折射率的半导体材料中,因此其界面产生干涉的条件又会发生变化。这里,电偶极子的基本设置不变,周围介质设定为氮化物半导体材料,如图 6 所示。两种

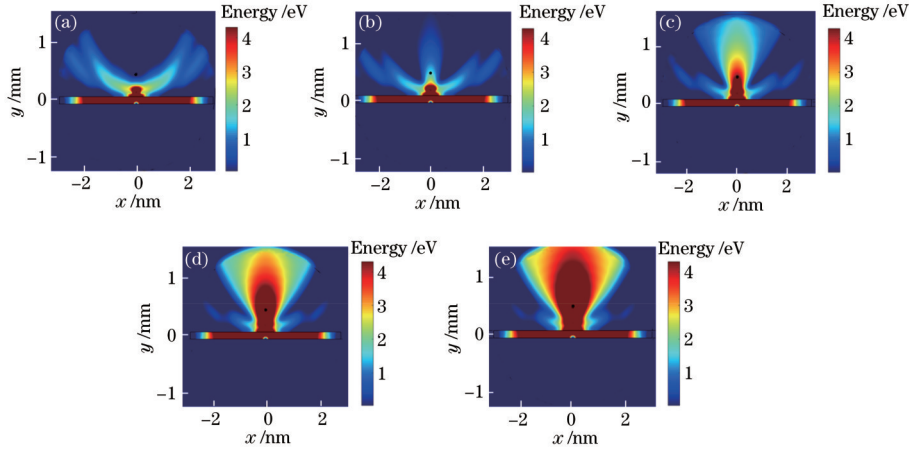


图 5 不同 d 下的电场强度分布图。(a) $d=115$ nm; (b) $d=138$ nm; (c) $d=161$ nm; (d) $d=184$ nm; (e) $d=207$ nm

Fig. 5 Electric field intensity distribution under different d . (a) $d=115$ nm; (b) $d=138$ nm; (c) $d=161$ nm; (d) $d=184$ nm; (e) $d=207$ nm

监视器分别用来计算仿真模型截面计算域中的电场强度分布和 MQW 层-空气界面的透射率曲线。

可以看到,在 MQW 层和高反射率底部反射层之间形成了光学腔,即平面微腔结构光学腔,波长为 460 nm 的单色电偶极子位于底部 Ag 反射层上方 d 距离处。通过参数扫描在 0.05~0.40 μm 之间以步长 0.01 μm 改变 d 值,得到透射率随 d 值变化的曲线,如图 7 所示。可以发现,光提取效率随着 MQW 有源层与 Ag 反射层距离的改变而产生强烈的振荡,这主要是 Cavity 效应^[30-31]造成的,即 MQW 有源层向上发出的光与向下发射又被 Ag 层反射的光发生干涉:若两束光在界面处发生相长干涉,则光提取效率会变高;若两束光发生相消干涉,则光强会变低甚至趋近于 0。

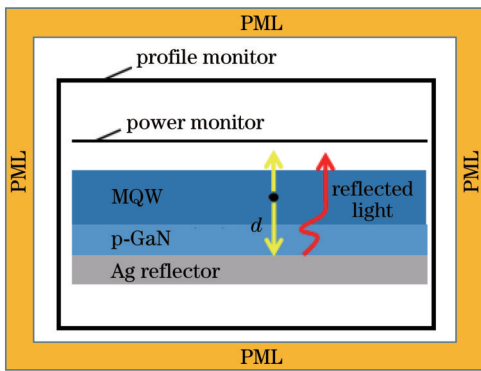


图 6 电偶极子在 MQW 层中的仿真模型示意图

Fig. 6 Simulation model of electric dipole in MQW layer

利用两束光发生干涉相消或干涉相长时的条件公式、仿真中 MQW 的折射率、MQW 的厚度和 p-GaN 材料的折射率,可以计算出不同 K 值下对应的多个 d 值。为更直观地展现干涉相消和干涉相长现象,分别选取两个对应的 d 值,代入图 6 所示的仿真模型中,计算得到相应截面的电场强度分布图,如图 8 所示。图 8(a) 为 $d=240$ nm 情况下得到的满足发射光和反射光之间相消干涉时的电场强度分布图。可以看到,大部分

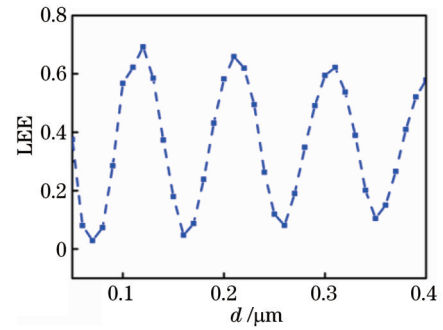


图 7 不同 d 下的 LEE

Fig. 7 LEE under different d

的光被困在叠层结构中,但界面处仍有一些大角度的光出射,即无论是相长干涉还是相消干涉都不会导致正面的出光变成 0。图 8(b) 为 $d=194$ nm 情况下得到的相长干涉时的电场强度分布图。可以看到,界面出光明显,且出射光的能量大多集中在正向的一定角度范围内。这些结果很好地印证了图 7 所得到的光提取效率随 d 值振荡的曲线趋势。以上结果表明,优化 MQW 层与底部 Ag 反射层的间距对 Micro-LED 的光提取效率提升至关重要。最优 d 值可以从图 7 中得到,理论上几个波峰处所对应的 d 值均可选择,且优先选择最佳光提取效率所对应的 d 值,但考虑到实际芯片制备时 p-GaN 层厚度不能太薄,因此选择 d 值为 210 nm 的 Micro-LED 作为后续进一步仿真优化的基础模型。

3.2 芯片外形优化

在 3.1 节的 d 值分析基础上,本节进一步讨论 Micro-LED 的芯片外形优化。对于传统的 GaN 基 Micro-LED,高折射率导致的界面全反射使得光只能从约 23° 的逃逸锥中出射,并且 Micro-LED 的尺寸较小,大角度的光从垂直侧壁出射,影响 Micro-LED 的光强分布和正向光提取效率。因此,通过将 Micro-LED 侧壁刻蚀出一定倾斜角度,改变有源层出射光路,可使更多光突破逃逸锥限制而出射。不同倾角的

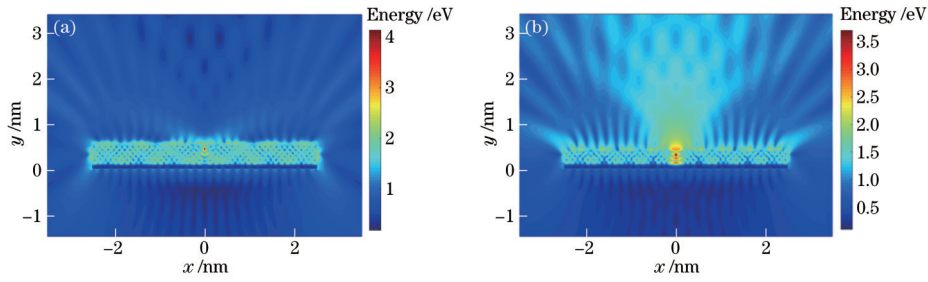


图 8 干涉相消和干涉相长情况下 Micro-LED 叠层结构中的电场强度分布图。(a)干涉相消;(b)干涉相长

Fig. 8 Electric field intensity distribution in Micro-LED laminated structure under constructive interference and destructive interference. (a) Constructive interference; (b) destructive interference

Micro-LED 仿真模型示意图如图 9(a)、(b)所示,两种刻蚀方式使 Micro-LED 的芯片外形分别呈倒梯形和正梯形,假设倾斜侧壁与垂直方向的夹角为 α ,功率监

视器设置在整個 Micro-LED 的四周,用于监测所有出光面出射的光功率。

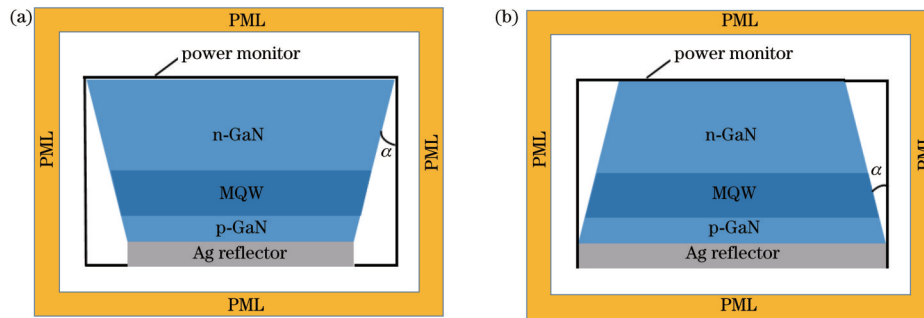


图 9 不同芯片外形的 Micro-LED 仿真模型。(a)倒梯形模型示意图;(b)正梯形模型示意图

Fig. 9 Simulation models of Micro-LED with different chip shapes. (a) Schematic diagram of inverted trapezoidal model; (b) schematic diagram of positive trapezoidal model

参考实际工艺条件,设置参数 α 的扫描范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$,以 2° 为步长分别对两种不同芯片外形的 Micro-LED 叠层结构进行参数扫描,得到随 α 值变化的 Micro-LED 正向光提取效率的变化趋势,如图 10 所示。可以看出,倒梯形外形结构对 Micro-LED 的出光更有利,侧壁通过一定角度的刻蚀,可以使正向光提取效率较垂直侧壁时提升 1.6 倍。正梯形外形因为侧壁角度的增加,使得正向出光面积越来越小,只有在较小角度刻蚀时,其正向光提取效率较垂直侧壁才有明显提升,但仍然总体低于倒梯形 Micro-LED。当 $\alpha > 15^\circ$ 时,正梯形 Micro-LED 的正向光提取效率均低于垂直

侧壁时的光提取效率。由此可知,侧壁倾角变化的整体趋势对实际的芯片制作具有一定指导意义,而实际制备的侧壁倾角控制在一定精度范围内均能得到较好的光效率提升效果。下文将基于侧壁倾角为 $\alpha = 14^\circ$ 的倒梯形 Micro-LED 芯片外形进一步构建相应的仿真模型。

3.3 不同底部反射镜的仿真

为进一步提升 Micro-LED 的光提取效率,通常会在 p-GaN 面上溅射一层高反射率的 Ag,金属虽然对入射光角度依赖性较小,但是在可见光波段中金属损耗不可忽略,且其可产热,这会对器件的性能产生不利影响^[32]。常用的反射镜还有分布式布拉格反射器 (DBR),其是由电介质材料以 $\lambda/4$ 光学厚度堆叠而成的,因为全部使用电介质材料,所以几乎没有任何损耗,但对光的入射角度较为敏感^[33]。DBR 的结构设计和优化已有报道^[34],但其应用于 GaN 基 Micro-LED 中的性能提升效果仍需进一步探索。

以 3.2 节得到的芯片外形,即 α 值为 14° 的倒梯形 Micro-LED 结构为参照,建立与其不同的底部反射层为 DBR 的仿真模型,如图 11 所示。因为所研究的 Micro-LED 为 GaN 基蓝光 LED,所以组成 DBR 的材料选用可见光波段常用的 TiO_2 (折射率为 2.4) 和 SiO_2 (折射率为 1.46)。其中,每层 TiO_2 的厚度(单位为 nm)为

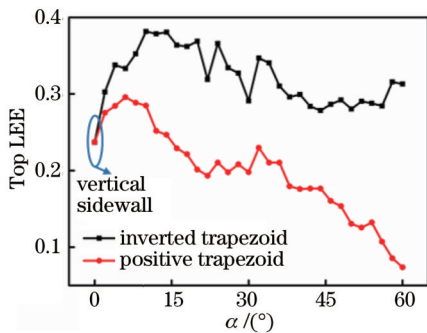


图 10 不同 α 值下 Micro-LED 正向 LEE 的变化

Fig. 10 Top LEE varying with α

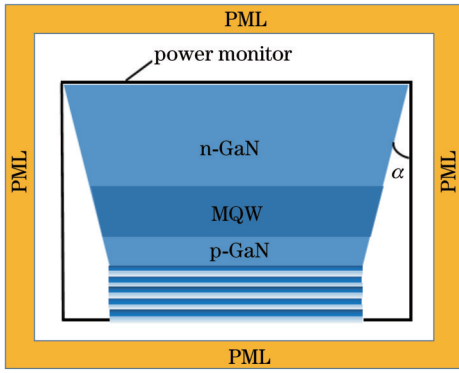


图 11 底部为 DBR 反射镜的倒梯形 Micro-LED 仿真结构图
Fig. 11 Simulation structure diagram of inverted trapezoidal Micro-LED with DBR reflector at bottom

$$\frac{\lambda}{4n_{\text{TiO}_2}} = \frac{460}{4 \times 2.4} = 47.9, \quad (2)$$

式中： n_{TiO_2} 是 TiO_2 的折射率。同理可得，每层 SiO_2 的厚度为 78.7 nm。DBR 的结构如图 12(a) 所示。对该 DBR 在可见光波段的反射率和截面的电场强度分布进行仿真模拟，结果分别如图 12(b) 和图 12(c) 所示。从图 12(b) 可以发现，在可见光波段中，该 DBR 的反射率均可达到 95% 以上。从图 12(c) 可以发现，当光源向上入射到达 DBR 时，大部分的光被反射，只有很少一部分光透过。

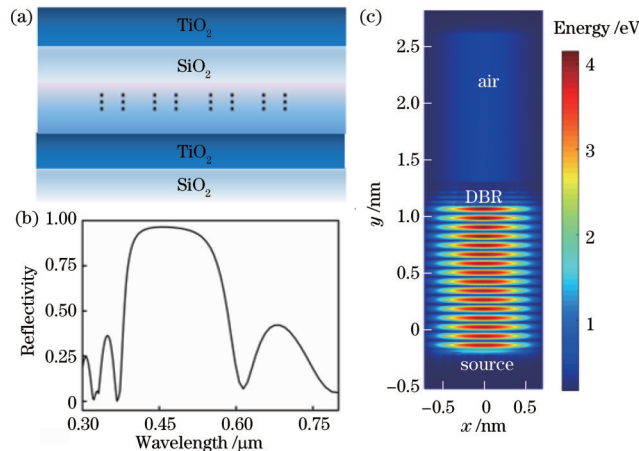


图 12 DBR 反射层仿真结果。(a) DBR 结构示意图；(b) 反射率；(c) 电场强度分布图
Fig. 12 Simulation results of DBR reflector. (a) Structural diagram of DBR; (b) reflectivity; (c) electric field intensity distribution

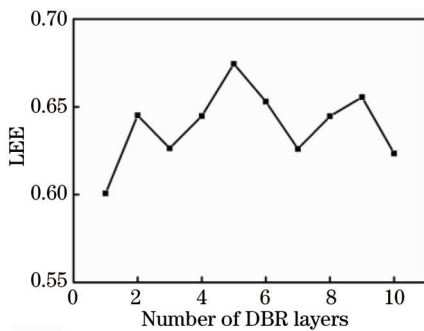


图 13 不同 DBR 层数的 LEE
Fig. 13 LEE varying with number of DBR layers

由图 12 的仿真结果可知，所设计的 DBR 结构符合 Micro-LED 底部反射层所要求的高反射率条件，且避免了金属反射层所带来的损耗。为获得更高的光提取效率，对 DBR 的层数进行参数化扫描，以得到最优的 DBR 层数，结果如图 13 所示。可以发现，当 DBR 层数为 10 时，Micro-LED 的光提取效率最佳。

基于图 13 的仿真结果，对底部反射层为 10 层 DBR 的 GaN 基 Micro-LED 的侧壁倾角进行参数化扫描，结果如图 14(a) 所示。可以发现，当底部反射层采用 DBR 时，Micro-LED 的正向光提取效率比 Ag 反射层高出 50% 左右，而侧壁出射与 Ag 反射层相差不大，且当 α 值为 24° 时，Micro-LED 得到最佳的正向光提取效率，较垂直侧壁提升了 2.1 倍。此外，还可以发现，随着侧壁角度 α 值的增大，Micro-LED 侧壁出射也在不断增加，当达到最大的 60° 时，侧壁的光提取效率比垂直侧壁时高出约 4 倍。这一结果也可以从图 14(b)~(d) 中得到印证。图 14(b) 是仿真模拟得到的初步优化后的 Micro-LED 的光强分布与垂直侧壁的 Micro-LED 对比。可以看出，侧壁出光增加明显，且影响到了正面出光的光强分布。图 14(c) 和图 14(d) 是 $\alpha = 24^\circ$ 时 Micro-LED 不同底部反射层的电场强度分布图。可以发现，以 DBR 为底部反射层的 Micro-LED 出射光更多，且能量分布集中在法线附近，这与图 14(a) 和图 14(b) 的结果一致。

4 顶部透射光栅对 Micro-LED 光效提升的影响

在 GaN 基 Micro-LED 模型出光面处制备周期性微结构阵列，以破坏界面全反射，可增加光从逃逸锥中出射的概率，进一步提升光提取效率。光栅属于一维光子晶体，其具有一定的周期性，不仅可以在周期性晶格排列结构中产生光子禁带，还存在着衍射效应，可以利用该效应破坏 LED 内部的全反射，故其是目前所采用的提高光提取效率最常用的方法之一^[35-37]。实际的光栅制备工艺相对成熟且对光栅尺寸和精度的控制可以精确到纳米量级^[38]，考虑到实际工艺成本，前期相应

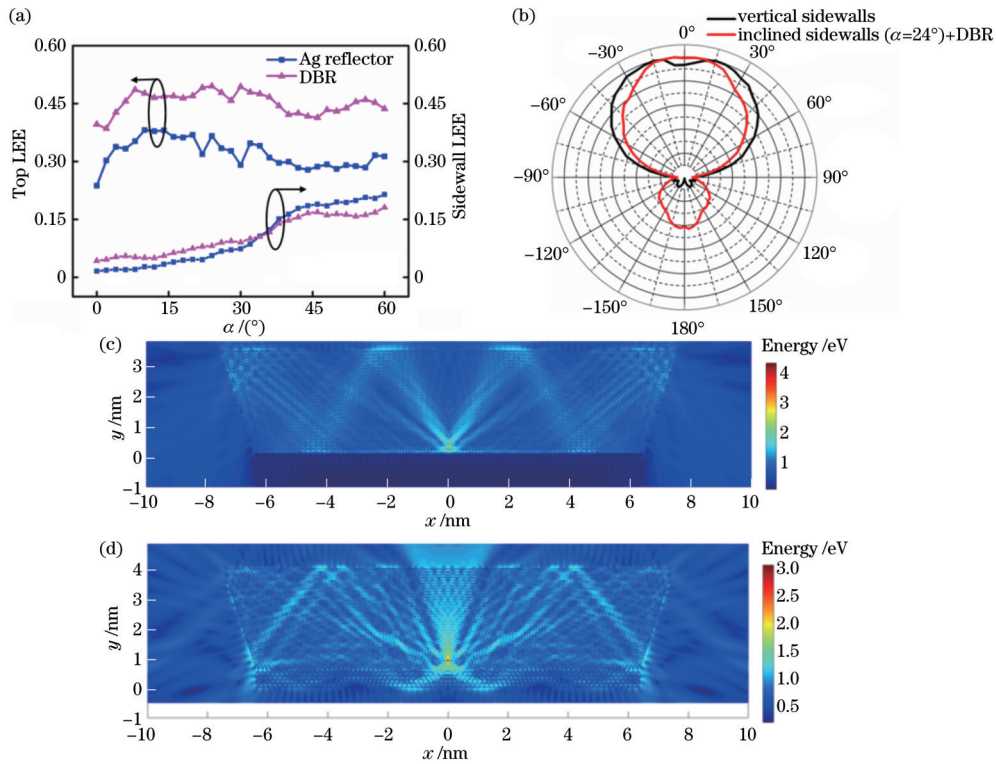


图 14 Micro-LED 底部为 Ag 反射层和 DBR 时的仿真结果。(a) 正向 LEE 和侧壁 LEE 对比; (b) 光强分布对比; (c) 底部为 Ag 反射层时 $\alpha=24^\circ$ 的 Micro-LED 的电场强度分布图; (d) 底部为 DBR 时 $\alpha=24^\circ$ 的 Micro-LED 的电场强度分布图

Fig. 14 Simulation results of Micro-LED with Ag reflector and DBR reflector. (a) Comparison of top LEE and sidewall LEE; (b) comparison of light intensity distribution; (c) electric field intensity distribution of Micro-LED with Ag reflector at $\alpha=24^\circ$; (d) electric field intensity distribution of Micro-LED with DBR at $\alpha=24^\circ$

的仿真优化工作尤为重要。构成光栅的材料可以是空气,也可以是电介质材料,其刻蚀位置可以是 Micro-LED 表面或内部。考虑内部刻蚀不仅不利于器件的电极制备,还可能会减少有效的有源区面积。本研究选用空气型柱状表面光栅进行设计,即在 Micro-LED 的 n-GaN 层出光界面处刻蚀周期性光栅结构,其中 Micro-LED 模型结构参数选用上文得到的最优仿真结果,即 $\alpha=24^\circ, d=210\text{ nm}$,底部 DBR 反射层中每层电介质厚度不变(TiO_2 层厚度为 47.9 nm , SiO_2 层厚度为 78.7 nm),所选取的层数为 10,整体的仿真模型示意图如图 15 所示。

通过对光栅周期 p 、占空比 o 和高度 h 的优化,得到最佳光提取效率所对应的光栅尺寸,其中:光栅的周期 p 分别选取 $500, 600, 700\text{ nm}$;高度 h 的扫描范围为 $0.1\sim 1.0\ \mu\text{m}$,步长为 $0.1\ \mu\text{m}$;占空比 o 的扫描范围为 $0.1\sim 0.7$,步长为 0.2 。考虑到占空比为 1 在实际制备中意味着将 n-GaN 层厚度整体减薄,无实际的光栅结构存在,故图 16 中其仿真结果主要用于与具有顶部光栅结构的 Micro-LED 结果进行对比,从而更好地分析顶部光栅对 Micro-LED 光提取效率的影响。最终的仿真计算结果如图 16 所示,结果表明:当光栅周期为 500 nm , o 和 h 的值分别为 0.3 和 $0.7\ \mu\text{m}$ 时, Micro-LED 达到最优光提取效率;当光栅周期为 600 nm , o 和 h 的值分别为 0.7 和 $0.3\ \mu\text{m}$ 时, Micro-LED 达到最优

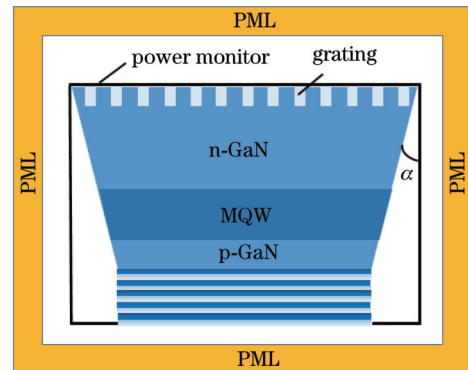


图 15 带有顶光栅的 Micro-LED 仿真结构示意图
Fig. 15 Simulation structure diagram of Micro-LED with top grating structure

光提取效率;当光栅周期为 700 nm , o 和 h 的值分别为 0.7 和 $0.3\ \mu\text{m}$ 时, Micro-LED 达到最优光提取效率。可以发现,当光栅周期较小时,宽度窄、高度高的光栅尺寸更有利于光子出射,而当光栅周期较大时,宽度宽、高度低的光栅结构更有利于 Micro-LED 光提取效率的提高。当占空比为 1 时,相应的 n-GaN 层厚度虽然减薄,使得内部材料结构本身的吸收减少,但是其对 Micro-LED 光提取效率的提升仍然有限,因为其本质上与无顶光栅结构的 Micro-LED 相同,这也进一步证明了顶光栅在 Micro-LED 光提取效率提升中所发挥

的积极作用。经过对比,最终得到所设计的最优光栅尺寸为 $p=500\text{ nm}$, $o=0.3$, $h=0.7\text{ }\mu\text{m}$, 此时光提取

效率较垂直侧壁的 Micro-LED 初始结构提高了 2.42 倍。

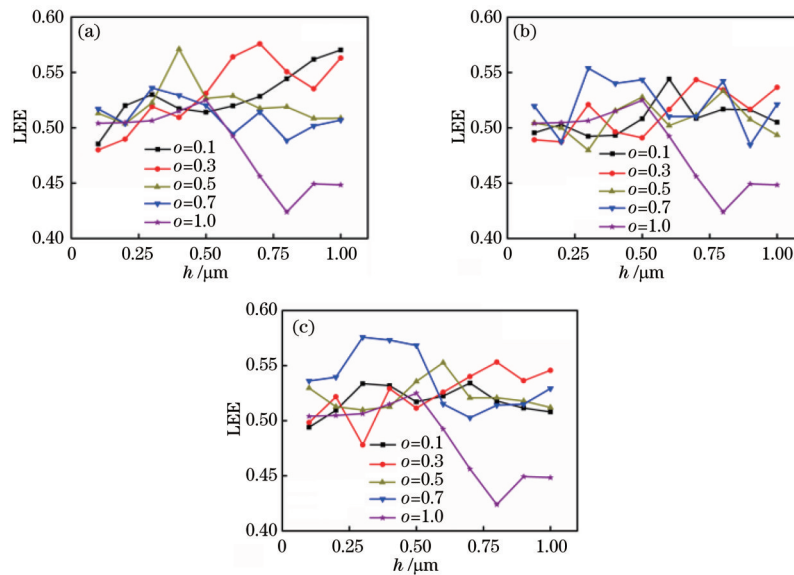


图 16 不同周期的顶光栅的高度对 Micro-LED 的 LEE 提升的影响。(a) $p=500\text{ nm}$; (b) $p=600\text{ nm}$; (c) $p=700\text{ nm}$

Fig. 16 Influence of height of top grating with different periods on LEE improvement of Micro-LED. (a) $p=500\text{ nm}$; (b) $p=600\text{ nm}$; (c) $p=700\text{ nm}$

5 结 论

基于 FDTD 方法,设计并仿真验证高光效 GaN 基 Micro-LED 的优化模型,由芯片尺寸减小所带来的侧壁效应分析出发,重点讨论包括多量子阱有源层位置、芯片外形侧壁倾角、底部反射材料和顶部光栅设计 4 个关键因素对光提取效率提升的影响。通过参数化扫描和结构参数优化设计,最终得到具有 24° 倒梯形倾斜侧壁、底部反射层为 10 层 DBR 的 Micro-LED 优化模型,其光提取效率与垂直侧壁的初始结构相比提升了 2.1 倍。进一步设计顶部透射光栅,当周期为 500 nm , 占空比为 0.3, 高度为 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 时, Micro-LED 光提取效率的提升可以进一步增加到 2.42 倍。本研究工作对设计、模拟和制备高光效 GaN 基 Micro-LED 提供了必要的理论依据,对 Micro-LED 显示应用具有重要的参考意义。

参 考 文 献

- [1] Hang S, Chuang C M, Zhang Y H, et al. A review on the low external quantum efficiency and the remedies for GaN-based micro-LEDs[J]. Journal of Physics D, 2021, 54(15): 153002.
- [2] Huang Y G, Tan G J, Gou F W, et al. Prospects and challenges of mini-LED and micro-LED displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2019, 27(7): 387-401.
- [3] 季洪雷, 张萍萍, 陈乃军, 等. Micro-LED 显示的发展现状与技术挑战[J]. 液晶与显示, 2021, 36(8): 1101-1112.

Ji H L, Zhang P P, Chen N J, et al. Micro-LED display:

recent progress and future challenges[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(8): 1101-1112.

- [4] Parbrook P J, Corbett B, Han J, et al. Micro-light emitting diode: from chips to applications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(5): 2000133.
- [5] Tian P F, McKendry J J D, Gu E D, et al. Fabrication, characterization and applications of flexible vertical InGaN micro-light emitting diode arrays[J]. Optics Express, 2016, 24(1): 699-707.
- [6] Wang Z, Shan X Y, Cui X G, et al. Characteristics and techniques of GaN-based micro-LEDs for application in next-generation display[J]. Journal of Semiconductors, 2020, 41(4): 041606.
- [7] Hsiang E L, Yang Z Y, Yang Q, et al. Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2021, 29(6): 446-465.
- [8] Zhao P, Zhao H P. Analysis of light extraction efficiency enhancement for thin-film-flip-chip InGaN quantum wells light-emitting diodes with GaN micro-domes[J]. Optics Express, 2012, 20(5): A765-A776.
- [9] 江孝伟, 赵建伟, 武华. 高光提取效率倒装发光二极管的设计与优化[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 092302.
- [10] Get R, Singh S, Goyal A K, et al. Enhancement of light extraction efficiency in InGaN/GaN vertical blue light emitting diodes by surface patterning: design and simulation[J]. Optik, 2015, 126(21): 3004-3006.

- [11] Tian M, Yu H B, Memon M H, et al. Enhanced light extraction of the deep-ultraviolet micro-LED via rational design of chip sidewall[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 4809-4812.
- [12] Liu Y B, Zhang K, Feng F, et al. The size and temperature effect of ideality factor in GaN/InGaN multiple quantum wells micro-light-emitting diodes[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(12): 948-960.
- [13] Gou F W, Hsiang E L, Tan G J, et al. Angular color shift of micro-LED displays[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): A746-A757.
- [14] 王乐然, 李富琳, 孙毅轩, 等. 基于 Micro-LED 照明的量子点颜色转换特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(23): 2325002.
Wang L R, Li F L, Sun Y X, et al. Optical properties of quantum dots color-conversion using micro-LED illumination[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(23): 2325002.
- [15] Chen E G, Lin J Y, Yang T, et al. Asymmetric quantum-dot pixelation for color-converted white balance [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(7): 2158-2165.
- [16] Bulashevich K A, Konoplev S S, Karpov S Y. Effect of die shape and size on performance of III-nitride micro-LEDs: a modeling study[J]. *Photonics*, 2018, 5(4): 41.
- [17] Hsiang E L, He Z Q, Huang Y G, et al. Improving the power efficiency of micro-LED displays with optimized LED chip sizes[J]. *Crystals*, 2020, 10(6): 494.
- [18] Wang X H, Lai P T, Choi H W. The contribution of sidewall light extraction to efficiencies of polygonal light-emitting diodes shaped with laser micromachining[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(2): 023110.
- [19] Tang X S, Han L L, Ma Z G, et al. Enhanced light extraction from AlGaInP-based red light-emitting diodes with photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5993-5999.
- [20] Lan S Y, Wan H, Zhao J, et al. Light extraction analysis of AlGaInP based red and GaN based blue/green flip-chip micro-LEDs using the Monte Carlo ray tracing method[J]. *Micromachines*, 2019, 10(12): 860.
- [21] Khaidarov E, Liu Z T, Paniagua-Domínguez R, et al. Control of LED emission with functional dielectric metasurfaces[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(1): 1900235.
- [22] 刘顺瑞, 王丽, 孙艳军, 等. 利用截头圆锥形仿生蛾眼结构提高 LED 光提取效率[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0122001.
Liu S R, Wang L, Sun Y J, et al. Enhancement of light extraction efficiency of LED by bionic moth-eye structure with frustum of a cone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0122001.
- [23] Li Y F, Li A X, Zhang Y, et al. Nanoscale characterization of surface plasmon-coupled photoluminescence enhancement in pseudo micro blue LEDs using near-field scanning optical microscopy[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(4): 751.
- [24] 汤桦, 李强, 张启凡, 等. 领结型纳米银金属阵列对氮化镓基发光二极管光提取效率的影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2123001.
Tang H, Li Q, Zhang Q F, et al. Effect of bow tie type silver metal array structure on light extraction efficiency of GaN-based light emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2123001.
- [25] Ryu H Y, Pyo J, Ryu H Y. Light extraction efficiency of GaN-based micro-scale light-emitting diodes investigated using finite-difference time-domain simulation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 1600110.
- [26] Jeong H, Salas-Montiel R, Jeong M S. Optimal length of ZnO nanorods for improving the light-extraction efficiency of blue InGaN light-emitting diodes[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23195-23207.
- [27] Laws G M, Larkins E C, Harrison I, et al. Improved refractive index formulas for the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ and $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ alloys[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 89(2): 1108-1115.
- [28] Pan J W, Tsai P J, Chang K D, et al. Light extraction efficiency analysis of GaN-based light-emitting diodes with nanopatterned sapphire substrates[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(7): 1358-1367.
- [29] Wang L, Sun J, Yan Q, et al. Issue of spatial coherence in MQW based micro-LED simulation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31520-31526.
- [30] Shen Y C, Wierer J J, Krames M R, et al. Optical cavity effects in InGaN/GaN quantum-well-heterostructure flip-chip light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(14): 2221-2223.
- [31] Benisty H, de Neve H, Weisbuch C. Impact of planar microcavity effects on light extraction-part I: basic concepts and analytical trends[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(9): 1612-1631.
- [32] 刘时彪, 王光绪, 吴小明, 等. 集成 Ag 基反射镜的 GaN 基 LED 薄膜芯片的静电失效演变[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1023001.
Liu S B, Wang G X, Wu X M, et al. Electro-static failure evolution of GaN-based LED thin film chip with Ag mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1023001.
- [33] 万颖, 吴昊, 刘昌. 原子层沉积法制备高反射率的分布式布拉格反射镜[J]. *半导体光电*, 2019, 40(4): 528-533.
Wan Y, Wu H, Liu C. Preparation of high reflectivity distributed Bragg mirrors based on atomic layer deposition [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(4): 528-533.
- [34] Ding X H, Gui C Q, Hu H P, et al. Reflectance bandwidth and efficiency improvement of light-emitting diodes with double-distributed Bragg reflector[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(15): 4375-4380.
- [35] Dang S H, Li C X, Li T B, et al. Light-extraction enhancement and directional emission control of GaN-based LED with transmission grating[J]. *Optik*, 2014, 125(14): 3623-3627.
- [36] Jin X M, Trieu S, Chavoor G J, et al. Enhancing GaN LED efficiency through nano-gratings and standing wave analysis[J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(12): 1045.

- [37] 胡永禄, 刘道柳, 王博, 等. 表面微腔光子晶体 LED 的光提取特性[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0623004.
Hu Y L, Liu D L, Wang B, et al. Characteristics of light extraction for surface-microcavity photonic crystal LED [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0623004.
- [38] Yao Y F, Lin C H, Chao C Y, et al. Coupling of a light-emitting diode with surface plasmon polariton or localized surface plasmon induced on surface silver gratings of different geometries[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 9205-9219.