

文章编号:1671-4229(2023)01-0063-15

AlGa_N 基紫外 LED 外延结构及其光学性能研究

程权炜¹, 郭康贤^{1*}, 庞海萍²

(1. 广州大学 物理与材料科学学院, 广东 广州 510006; 2. 宁夏荣光电节能科技实业有限公司, 宁夏 银川 750299)

摘要: 氮化铝 (AlN) 作为一种宽带隙半导体, 具有优异的物理和化学性能, 在紫外发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 领域有着广泛的应用。同样, 发展较为成熟的氮化镓 (GaN) 在该领域也有着不可替代的作用。而高性能的器件需要有良好的外延层。AlGa_N 基紫外 LED 外延层的传统制备方法是采用金属有机化学气相沉积法 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD), 但是由于该方法中存在着强烈的预反应和 Al 原子本身迁移速率慢等原因, 导致外延层中出现大量缺陷, 使得紫外 LED 器件的性能降低。此外, 由于不同材料以及材料与空气的折射率存在差异, 使得光难以逃逸到外界, 大部分光被局域在芯片内部, 从而降低光提取效率以及光强。为了提高器件的光学性能, 一种新的紫外 LED 结构被提出, 文章采用时域有限差分模拟 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 软件对该外延结构的光提取效率和出光强度进行了仿真。研究发现, 与传统的 LED 结构相比, 新型紫外 LED 结构的横磁波 (TM) 光模式和横电波 (TE) 光模式的光提取效率分别提高了 19.1% 和 29.3%, 最大出光强度分别提高了 42.78% 和 47.18%, 对器件的光学性能有着显著的改善。另外, 文章还研究了新型紫外 LED 外延层的结构参数对器件整体光学性能的影响, 在光源、物理模型尺寸和仿真条件等因素不变的情况下, 获得了光学性能最佳的结构参数。

关键词: 新型紫外 LED 结构; AlN 刻蚀层; 蓝宝石刻蚀层; 出光强度; 光提取效率

中图分类号: O 47 **文献标志码:** A

Study on epitaxial structure and optical properties of AlGa_N based ultraviolet light emitting diode

CHENG Quan-wei¹, GUO Kang-xian^{1*}, PANG Hai-ping²

(1. School of Physics and Materials Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Ningxia Rongguang Electric Energy Saving Technology Co., Ltd, Yinchuan 750299, China)

Abstract: As a wide-band gap semiconductor, Aluminum Nitride (AlN) has excellent physical and chemical properties and has been widely used in the field of Light Emitting Diode (LED). Similarly, Gallium Nitride (GaN), which is well developed, also plays an irreplaceable role in this field. High performance devices need a good epitaxial layer. The traditional preparation method of AlGa_N-based ultraviolet LED (UV LED) epitaxy layer is Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD). However, due to the strong pre-reaction and slow migration rate of Al atoms in this method, a large number of defects appear in the epitaxial layer, which reduces the performance of UV LED devices. In addition, due to the difference in the refractive index of different materials and the difference in the refractive index of materials and air, light has difficulty escaping to the outside world, and most of the light is localized in the chip, thus reducing the light extraction efficiency and light intensity. In order

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-07-07

基金项目: 广州市重点研发计划资助项目 (202103030002); 宁夏回族自治区重点研发计划资助项目 (2022BDE02012)

作者简介: 程权炜 (1998—), 男, 硕士研究生. E-mail: 2112019054@e.gzhu.edu.cn

*通信作者. E-mail: kxguo@gzhu.edu.cn

引文格式: 程权炜, 郭康贤. AlGa_N 基紫外 LED 外延结构及其光提取效率研究 [J]. 广州大学学报 (自然科学版), 2023, 22(1): 63-77.

to improve the optical performance of the device, a new UV LED structure is proposed. In this paper, Finite Difference Time Domain (FDTD) software is used to simulate the light extraction efficiency and light intensity of the epitaxial structure. It is found that compared with the traditional LED structure, the light extraction efficiency of the new UV LED structure in transverse magnetic wave (TM) mode and transverse electric wave (TE) mode is increased by 19.1% and 29.3%, respectively, and the maximum light intensity is increased by 42.78% and 47.18%, respectively, which significantly improves the optical performance of the device. In addition, the influence of the structure parameters of the epitaxial layer of the new UV LED on the overall optical properties of the device is also studied in this paper. Under the constant conditions of light source, physical model size, simulation conditions and other factors, the optimal structural parameters of the optical performance are obtained.

Key words: new UV LED structure; AlN etched layer; sapphire etched layer; light intensity; photo-extraction efficiency

通常,紫外线可分为 4 个波段,10 ~ 200 nm 为真空紫外区域,200 ~ 275 nm 为短波区域,275 ~ 320 nm 为中波区域,320 ~ 420 nm 为长波区域。对于紫外光电器件,目前集中于短波、中波和长波区域的研究,而且对于不同波段的紫外光器件,不管是在材料上还是结构上,都有着巨大的提升空间。而Ⅲ族氮化物通常是研究者重点关注的对象,其具有热导率高、电子饱和速率快、稳定性好等优点,在紫外光领域发挥着重大的作用,尤其是 Al、Ga、N 3 种元素组成的合金,即 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1$),可以通过对其组分的调制,使其带隙能量在 6.2 eV 到 3.4 eV 之间变化,对应的波长覆盖了紫外光波段范围,因此, $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ 是科研人员研究最多的材料,并且广泛应用于 LED 紫外器件中^[1]。随着 Al 组分的增大,发光波长逐渐变短,对材料的生产工艺要求明显增大,而目前的制备技术和方法难以满足高质量的需求,利用现有的技术和方法去制备 AlGa_N 材料将会导致材料中出现较多的位错和缺陷,而且随着外延层厚度的增加,位错密度可能会随之增加,裂纹可能会延伸到量子阱内部甚至到芯片的顶部,此时器件发生载流子非辐射复合的概率也会大大提高,使得器件的性能降低^[2-3]。而且,由于外延层与异质衬底之间存在晶格失配和热失配等问题,导致近紫外 LED 在外延生长过程中产生的位错密度高达 $10^8 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$,较高的位错密度会降低 LED 的电光转换效率,从而影响 LED 的整体性能^[4-6]。为了提升外延层的质量,李媛^[7]采用了 AlGa_N 插入层的方法,制备了 Al 组分别为 0.1 ~ 0.5 不同的样品来研究后续生长薄膜的裂纹情况,得出了

$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 缓冲层的应力补偿效应最好,裂纹的密度也是最低的。基于这点,本文分析了添加 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 缓冲层后对器件光学性能的影响。

吴亚林等^[8]也通过基于原子扩散技术的亲水键合和热处理的方式将蓝宝石芯片实现了键合。Utsumi 等^[9]实现了在室温下,利用表面活化直接键合的方法,成功将蓝宝石和 Al_2O_3 薄膜键合。通过以上方法,可以制备出良好的蓝宝石-AlN 衬底模板,为外延层与异质衬底之间存在的失配问题提供了一种新的解决方案。因此,本文将研究蓝宝石-AlN 衬底模板的结构参数对器件光学性能的影响。

1997 年, Khan 等^[10]成功使用 AlGa_N 材料制备出了第一个紫外 LED 器件,为后续研究 AlGa_N 基紫外 LED 打下了坚实的基础。1998 年, Han 等^[11]制备出了第一个波长为 353.6 nm 的 AlGa_N 基紫外 LED,为长波区域的紫外光器件的研究开启了新的篇章。随着紫外 LED 研究不断深入以及工艺逐渐成熟,目前已经实现了 210 ~ 400 nm 的全波段紫外 LED^[12],但是出光效率和出光强度等光学性能仍然较低。而对于 360 ~ 400 nm 的 LED 器件,外量子效率虽然达到了 46% ~ 76%^[13],但是还有一些不足之处,比如外延层的高吸收系数、不同折射率材料之间引起的界面反射、外延层与空气之间折射率差异较大所产生的界面全反射、电极的吸收、AlGa_N 材料的偏振特性等^[14],这些因素都会影响 LED 整体的光提取效率,从而进一步影响外量子效率。因此,如何改善外延层的生长质量、提高紫外 LED 器件的光提取效率以及出光强度,是目前紫外 LED 所需研究和有待解决的问题。

1 提升光提取率的方法与相关计算

影响 LED 芯片光提取效率的因素,最主要的是受到了芯片表面以及材料之间全反射的影响。为了改善全反射的问题,常用的方法有改变芯片的形状^[15-16]、表面粗化技术^[17]、光子晶体技术^[18]、蒸镀反射镜^[19]、制备纳米柱结构器件^[20]、谐振腔技术^[21-22]等。

基于已有的研究成果,本文提出了采用倒装结构和表面刻蚀相结合的方法来改变光线的方向以及减小界面反射的概率,从而降低全反射效应以及提高光提取效率和光强等光学性能。因此,本文着重介绍了倒装 LED 结构以及表面微结构的研究成果及其优点。

1.1 倒装 LED

LED 芯片有 3 种传统的结构:正装结构、倒装结构和垂直结构。倒装结构相比于其他两种结构,在光学方面具有无可比拟的优势。第一,把原本 p-GaN 面出射的光变为沿着蓝宝石一侧出射,减少了 p-GaN 对光的吸收,而且 p 型电极能够充当反射层,将底部的光更多地反射到出光面一侧,增加了光的利用率。第二,由于外延层的折射率与空气折射率差异较大,采用蓝宝石作为中间过渡层,则可以降低材料之间折射率的差异,增大全反射的临界角,同时也降低了全反射的概率,使更大角度的光线能够出射到空气中,从而提高光提取效率^[23]。

1.2 表面微结构

传统的刻蚀方法主要以正胶光刻为主,在需要刻蚀的衬底上生长二氧化硅保护材料、光刻胶、掩膜材料,然后在紫外光曝光下进行显影,从而制备出光刻图案,最后去除掩膜材料、光刻胶、二氧化硅等材料,即可完成刻蚀。Conroy 等^[24]采用刻蚀技术,对 AlN 薄膜进行刻蚀处理,发现该技术能够降低后续生长外延层的位错密度,虽然该方法提高了薄膜的质量,但是经过 AlN 薄膜的刻蚀后,对芯片光学性能的影响的相关研究较少,因此,本文对 AlN 薄膜进行特定图案的刻蚀,然后对该结构的光提取效率和出光强度进行了仿真分析。

此外,Inoue 等^[25]还通过纳米压印光刻技术制备了大面积的 AlN 纳米结构,实现了 150 mW 的

高功率紫外 LED,比传统平面型紫外 LED 的功率增加了数十倍。Liang 等^[26]通过干法光刻和湿法腐蚀技术制备了纳米透镜阵列,有效改善了器件的光提取效率和发光角度。

Zhang 等^[27]制备了基于 n-AlGa_N 纳米多孔模板的深紫外 LED,通过位错的过滤以及应力的释放,提高了外延层的生长质量。同样的,可以将该方法应用到 AlN 薄膜层中,从而实现对外延层的应力调控,改善器件的质量。为了提高光提取效率,Khan 等^[28]提出了在蓝宝石衬底上或者 AlN 层上使用纳米结构,这能够有效地对 LED 外延层进行改善以及实现更好的光输出。

因此,本文提出了一种新型的紫外 LED 结构,其特点是采用了倒装结构以及对蓝宝石、AlN 薄膜进行图案化,如图 1 所示。

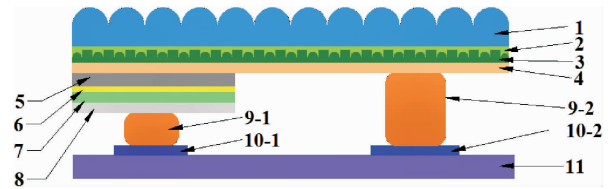


图 1 AlN/蓝宝石刻蚀型倒装紫外 LED

Fig. 1 AlN/ Sapphire etched flip UV LED

其中,1 为蓝宝石衬底,2 为 AlN 刻蚀层,3 为 Al_{0.3}Ga_{0.7}N 过渡层,4 为 n-AlGa_N 薄膜,5 为量子阱层,6 为 p-AlGa_N 薄膜,7 为 p-GaN 薄膜,8 为 p 型电极反射层,9 为焊点,10 为焊盘,11 为基板。

1.3 折射率的计算

对于 Al_xGa_{1-x}N (0 ≤ x ≤ 1) 材料,其禁带宽度与组分的关系满足^[29]:

$$E_g(x) = xE_g^{AlN} + (1-x)E_g^{GaN} - bx(1-x) \quad (1)$$

当环境温度处于室温时, $E_g^{GaN} = 3.4 \text{ eV}$, $E_g^{AlN} = 6.2 \text{ eV}$, b 为弯曲系数,其值为 1 eV。通常,Al_xGa_{1-x}N 的折射率 n 与带隙 E_g 的关系为^[30]

$$n(h\nu) = \left\{ a \left(\frac{h\nu}{E_g} \right)^{-2} \left[2 - \left(1 + \frac{h\nu}{E_g} \right)^{0.5} \right] - \left(1 - \frac{h\nu}{E_g} \right)^{0.5} \right\} + b \quad (2)$$

$$a(x) = 9.82661 - 8.21608x - 31.5902x^2 \quad (3)$$

$$b(x) = 2.73591 + 0.84249x - 6.29321x^2 \quad (4)$$

其中, $h\nu$ 为光子能量, E_g 为材料禁带宽度, $a(x)$ 和 $b(x)$ 为与组分 x 相关的拟合系数。

而对于多组分的材料,比如交替生长的 Al-

GaN/GaN 量子阱层,其折射率的计算公式如下^[31]:

$$n_{MQW} = (d_1 n_{AlGaIn} + d_2 n_{GaN}) / (d_1 + d_2) \quad (5)$$

其中, d_1 和 d_2 分别是 AlGaIn 和 GaN 层的厚度。

结合公式(1)~(5),即可求得紫外 LED 外延层中各单层材料的折射率,从而增加仿真模拟的精确性。

2 结果与讨论

2.1 新型结构与传统结构的光学性能研究

经过科研工作者近几十年的研究,AlGaIn 基紫外 LED 内量子效率基本达到 85% 左右,但是由于外量子效率较低,使得器件整体性能也随之下落,因此,本文利用 FDTD 软件对 AlGaIn 基紫外 LED 结构的光提取效率进行了仿真,研究了传统薄膜外延片、对 AlN 层进行柱状刻蚀的外延片、在 AlN 刻蚀凹槽中填充过渡层的外延片、对 AlN 层进行柱状刻蚀和 AlN 柱状体凹半圆刻蚀的外延片、对 AlN 层进行凹槽刻蚀、AlN 柱状体凹半圆刻蚀和对蓝宝石进行凸半圆刻蚀的外延片的光提取效率以及这 5 类外延片的 TE 和 TM 光模式电场强度分布,仿真结构和仿真材料的参数如图 2 和表 1^[32-35] 所示。新型紫外 LED 结构自上而下分别为蓝宝石衬底、AlN 薄膜、 $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ 过渡层、n-AlGaIn 薄膜、量子阱、p-AlGaIn 薄膜、p-GaN 薄膜、Al 电极。仿真维度为 2 维,仿真区域大小为 $5\ 150\ \text{nm} \times 5\ 150\ \text{nm}$ 。外延片四周的边界条件采用完美匹配层(Perfect Matching Layer, PML),目的是为了吸收电磁波,实现电磁波传播到无限远,因此,光不会再回到结构中,从而使仿真结果更为准确^[36-37]。该仿真采用 360 nm 的偶极子光源来模拟量子阱中载流子的复合发光。基于发光二极管的出光特点,可将光提取转换为出射光功率和光源总功率的比值来描述^[38-39],即

$$\eta_{extr} = \frac{P_{out}}{P_{source}} \quad (6)$$

其中, η_{extr} 为光提取效率, P_{out} 为光出射功率, P_{source} 为光源总功率。

外延片 A (传统薄膜型外延片): 依次包括蓝宝石衬底(未刻蚀)、AlN 薄膜(未刻蚀)、n-AlGaIn 薄膜、量子阱层、p-AlGaIn 薄膜、p-GaN 薄膜和 Al 反射电极。

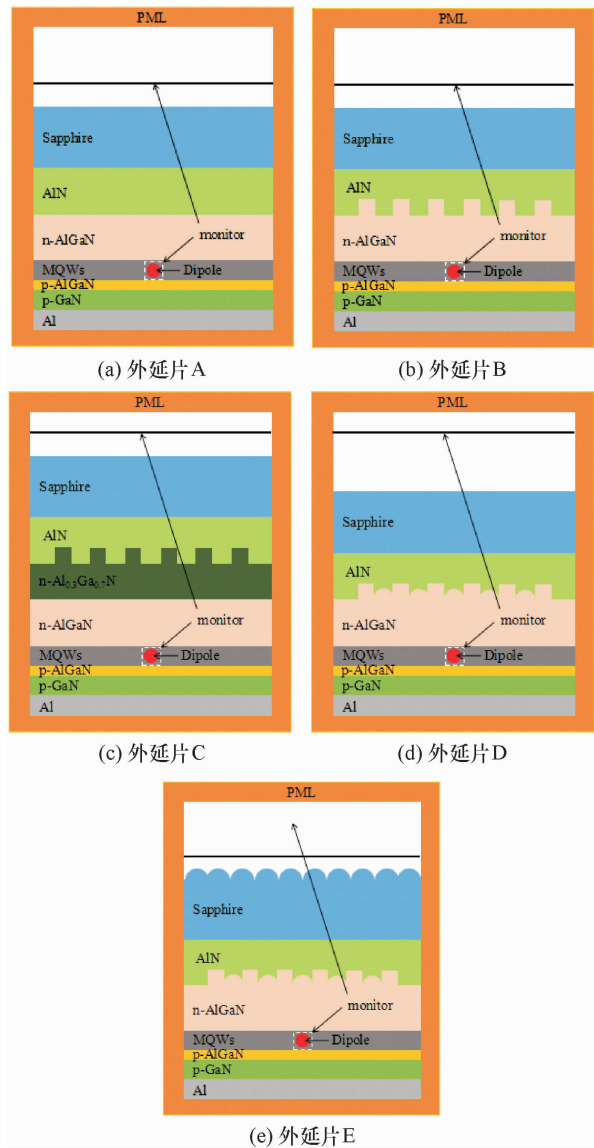


图 2 外延片 A、外延片 B、外延片 C、外延片 D 和外延片 E 结构图

Fig. 2 Structure diagram of epitaxial sheet A, epitaxial Sheet B, epitaxial sheet C, epitaxial sheet D and epitaxial sheet E

表 1 仿真模拟参数表

Table 1 Simulation parameters

材料	厚度/ d/nm	折射率/ n	消光系数/ k
Al	100	0.40	4.37
p-GaN	100	2.70	0.30
p-AlGaIn	50	2.60	0
MQWs	100	2.67	0
n-AlGaIn	1 000	2.60	0
$Al_{0.3}Ga_{0.7}N$	400	2.48	0
AlN	1 000	2.05	0
Sapphire	2 000	1.79	0

外延片 B (AlN 层凹槽型外延片):依次包括蓝宝石衬底(未刻蚀)、AlN 层凹槽、n-AlGaIn 薄膜、量子阱层、p-AlGaIn 薄膜、p-GaN 薄膜、Al 反射电极,其中 AlN 薄膜刻蚀后的 AlN 柱状体宽度 300 nm,凹槽宽度为 60 nm,深度 200 nm。同时,AlN 柱状体凹槽间隙中生长有 200 nm 的 n-AlGaIn 材料。

外延片 C (AlN 层凹槽中填充过渡层的外延片):依次包括蓝宝石衬底(未刻蚀)、AlN 薄膜凹槽、Al_{0.3}Ga_{0.7}N 过渡层、n-AlGaIn 薄膜、量子阱层、p-AlGaIn 薄膜、p-GaN 薄膜和 Al 反射电极。其中,AlN 薄膜凹槽的结构参数与外延片 B 中的相同,过渡层包括在 AlN 柱状体间隙中生长的 200 nm 的 AlGaIn 过渡层以及在 AlN 柱状体顶部生长的 200 nm 的 AlGaIn 过渡层。

外延片 D (AlN 层凹槽刻蚀和 AlN 柱状体凹半圆刻蚀型外延片):外延片 D 的 AlN 层凹槽的结构参数与外延片 B 相同,另外,在 AlN 柱状体顶部刻蚀凹半圆;凹半圆的半径为 AlN 柱状体的一半,即 150 nm。

外延片 E (AlN 层凹槽、AlN 柱状体凹半圆和蓝宝石凸半圆型外延片):外延片 E 中 AlN 层凹槽以及 AlN 柱状体凹半圆刻蚀的结构参数与外延片 D 的相同。同时,在蓝宝石与外界接触的出光面一侧刻蚀出半球形阵列结构,其中,蓝宝石凸半圆的半径为 300 nm,半圆图案中心之间的间距为 600 nm。

经 FDTD 软件仿真的结果如表 2 所示。

表 2 仿真结果
Table 2 Simulation results

外延片	TE 光 提取率 /%	TM 光 提取率 /%	TE 光最大 光度 /(V·m × 10 ⁻⁶)	TM 光最大 光度 /(V·m × 10 ⁻⁶)
A	27.80	7.27	2.67	0.82
B	30.82	8.88	2.85	0.64
C	28.18	8.13	3.31	0.90
D	29.87	8.53	3.53	0.71
E	33.11	9.40	5.04	1.04

图 3 为外延片 A ~ E 的光提取效率图,结合表 2 可见,经过对 AlN 层进行凹槽刻蚀、AlN 柱状体的凹半圆刻蚀或者蓝宝石衬底的刻蚀,新型外延片整体的出光效率以及最大出光强度比传统薄膜型外延片要高。TE 光模式提高了 1.37% ~ 19.10% 和

TM 光模式提高了 11.83% ~ 29.30%,最大出光强度分别提高了 23.86% ~ 42.78% 和 10.94% ~ 47.18%,表明新型紫外 LED 结构能够显著提升紫外器件的光学性能。

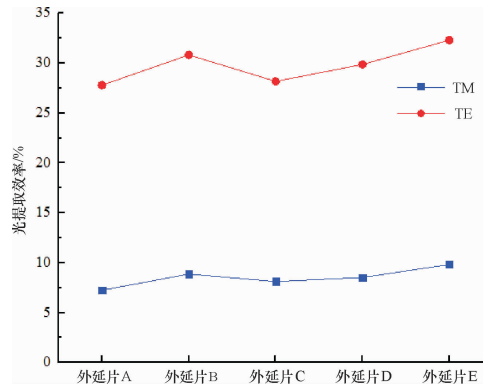
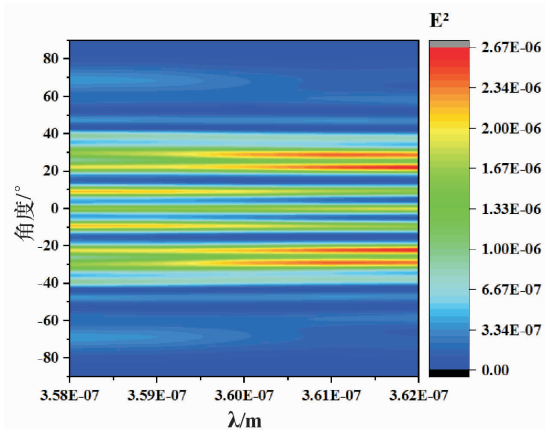


图 3 外延片 A、B、C、D、E 的光提取效率图

Fig. 3 Image of optical extraction efficiency of epitaxial slices A, B, C, D and E

如图 4(a) ~ 图 4(b)、图 5(a) ~ 图 5(b) 所示,可以看出,外延片 A 的 TE 光的发光角度主要集中于 0 ~ ±40°,而且由于光的干涉,光强最大值位于 20°和 30°的出射方向。而外延片 B 的 TE 光的发光角度相比于外延片 A 没有太大的变化,因为 TE 光模式的光主要是垂直方向出射,因此,刻蚀槽对光的传播方向并没有太大影响。而在 0°、10°、30°和 40°方向由于光的干涉,使得垂直方向的出射光强有所增加,相比于外延片 A 最大提高了 6.74%,这是因为刻蚀槽的侧面起到了对光的反射和折射作用,改变了原本 TE 光中较大角度的发射光的传播方向,使得更多的光沿同一方向出射,增加了干涉的概率,所以在 0°、10°、30°和 40°的方向上的光的电场强度比外延片 A 的要大。



(a) 外延片 A 的 TE 光模式电场强度平方分布图

(续上图)

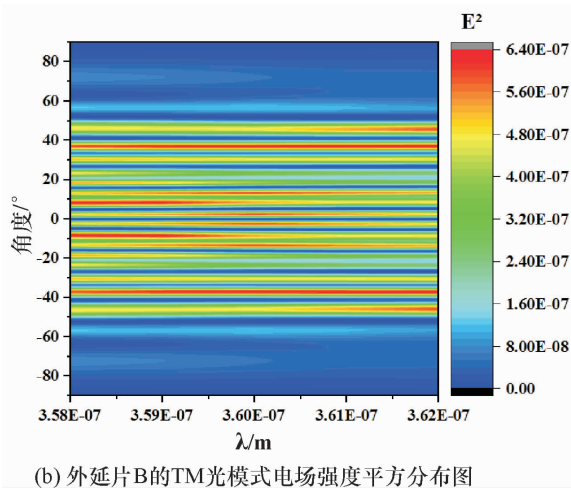


图 4 外延片 A 的 TE 和 TM 光模式电场强度平方分布图

Fig. 4 The distribution of the electric field intensity squared of TE and TM optical mode electric of epitaxial wafer A

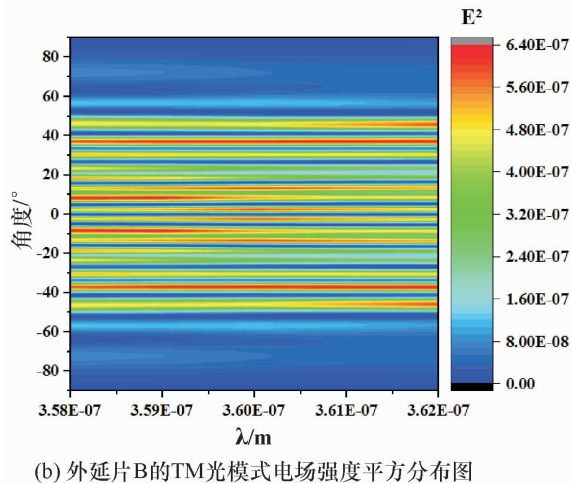
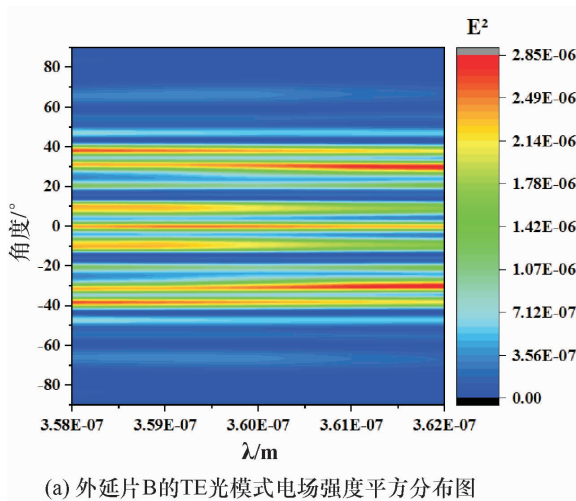


图 5 外延片 B 的 TE 和 TM 光模式电场强度平方分布图

Fig. 5 The distribution of the electric field intensity squared of TE and TM optical mode of epitaxial wafer B

两种外延片的 TM 光模式的发光范围并没有太大差别,再次表明了在此结构参数下的凹槽对发光角度并没有影响,均在 $0^\circ \pm 60^\circ$ 的范围内。

另外,原本入射角度较大的光会因为 AlN 层与 n-AlGaIn 层的水平交界面而发生全反射,但是由于刻蚀的作用,AlN 层与 n-AlGaIn 层所形成的垂直交界面,这将会使得原来入射到水平界面的较大角度入射光变成了入射到垂直界面的较小角度入射光,降低了全反射的概率,因此,到达外界的出射光更多,提高了光提取效率,而且在 10° 、 20° 、 30° 、 40° 角度,光相互干涉使得光强变大,但是从电场强度分布图中看出外延片 B 的 TM 光中的 $-2^\circ \sim -3^\circ$ 以及 $2^\circ \sim 3^\circ$ 的光的光强相比于外延片 A 有所降低,这是因为外延片 A 的 TM 光是通过外延片侧边的反射作用在出射角度为 0° 的方向达到干涉的条件,而凹槽两侧垂直交界面使得这部分光传播方向发生变化,使得干涉方向上的光线有所减少,干涉减弱,因此, $-2^\circ \sim -3^\circ$ 以及 $2^\circ \sim 3^\circ$ 中的光电场强度有所下降。但是结合 TE 和 TM 光模式的电场强度来看,外延片 B 的总体光电场强度仍然是有所提高的。

如图 4(a) ~ 图 4(b)、图 6(a) ~ 图 6(b) 所示,外延片 C 是在 AlN 柱状体之间的空隙中和 AlN 薄膜的表面生长了过渡层,无论是 TE 光模式和 TM 光模式,电场强度相比外延片 A 和外延片 B 均得到了提高,TE 光模式的最大光强分别提高了 23.97% 和 16.14%。TM 光模式的最大光强分别提高了 9.76% 和 40.63%。这是因为除了有凹槽的作用之外,还添加了一层过渡层,使得材料之间的折射率差异发生了变化,从而引起折射光线角度的变化,这将会使得更多的光沿着同一方向传播,从而增加出射光的电场强度。关于光提取效率方面,虽然过渡层能够很好匹配 AlN 薄膜和 n-AlGaIn,减少后续生长外延层的位错,但是这将会增加材料的界面,而且 3 种材料的折射率差异较大,使得全反射更加严重,因此,外延片 C 的光提取率会比外延片 B 的低,但是与外延片 A 的光提取率相比几乎相同甚至更高,这是因为 AlN 薄膜的凹槽对光的提取效率的作用大于或等于过渡层发生全反射的作用,因此,在外延片 C 的光提取效率不发生太大变化的情况下,电场强度变大,使得外延片 C 的光学性能变好。

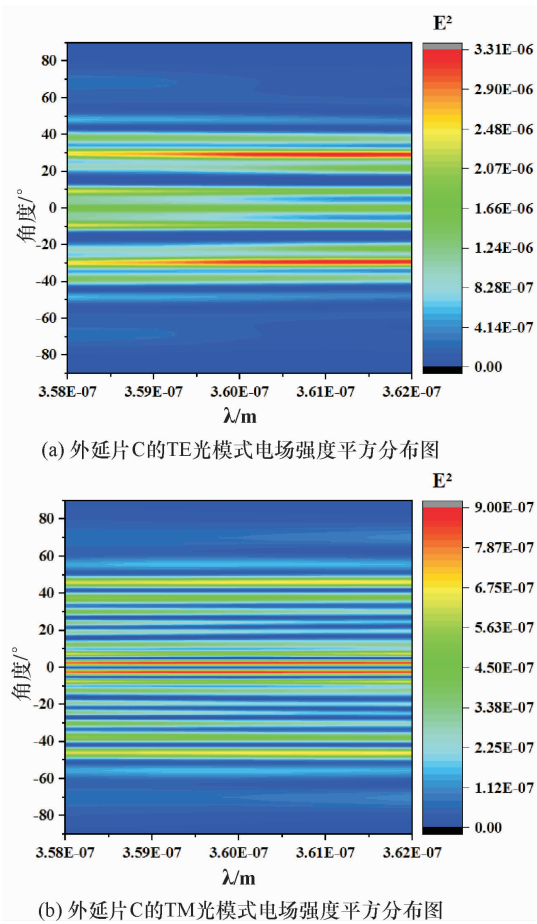


图 6 外延片 C 的 TE 和 TM 光模式电场强度平方分布图
 Fig. 6 The distribution of the electric field intensity squared of TE and TM optical mode of epitaxial wafer C

如图 4(a) ~ 图 4(b)、图 7(a) ~ 图 7(b) 所示,因为过渡层仅仅起到匹配 n-AlGaIn 薄膜和 AlN 薄膜的作用,对光提取和出光强度的影响不大,因此,外延片 D 是在外延片 B 的基础上增加了 AlN 柱状体凹半圆刻蚀这一结构,半圆结构使得 TE 光更多的汇聚到了出光角度为 30°、40° 的方向,光强有所增加,而 0°、10° 和 20° 的光会相应减小,这是由于光在不同角度的分布有所变化所导致的,因此,在该角度测量出来的光强减小。而凹半圆对 TM 光模式起到同样的效果,使得 20° ~ 50° 的光强明显增加,而相应的 0° ~ 3° 方向的光强降低,总体而言,外延片 D 虽然在一些角度的光强有所降低,但是大部分角度的光强的提高幅度比下降幅度要高,因此,外延片 D 的光强相比于外延片 A 的光强是提高的。此外,因为仅仅在半圆内生长了 n-AlGaIn 薄膜,与未刻蚀的 AlN 薄膜表面直接生长的 n-AlGaIn 的组分相同,并没有其他界面,而且有 AlN 薄膜的凹槽作用,原理和外延片 B 的 AlN 刻

蚀凹槽的作用一样,这就使得外延片 D 的光提取效率要比外延片 A 的高,但是和外延片 B 的光提取率相比几乎相同或者略小,这是因为凹半圆对光的折射角度大于水平界面所产生的折射角度,因此,部分大角度的光会被折射到更大的角度出射而不会从垂直方向出射,但是影响较小,光提取效率略微变小。由于半圆对光的汇聚作用,使得出射光强会明显提高。相比于外延片 B 而言,外延片 C 的 TE 光模式的最大电场强度提高了 23.86%,对于 TM 光模式,出射光强提高了 10.94%,因此,外延片 D 与外延片 B 在光提取效率相同的情况下,光强显著增大,因此,外延片 D 的光学性能会比外延片 A 和外延片 B 要好,表明了凹槽刻蚀和半圆刻蚀结构能显著提高光的电场强度和光提取效率。

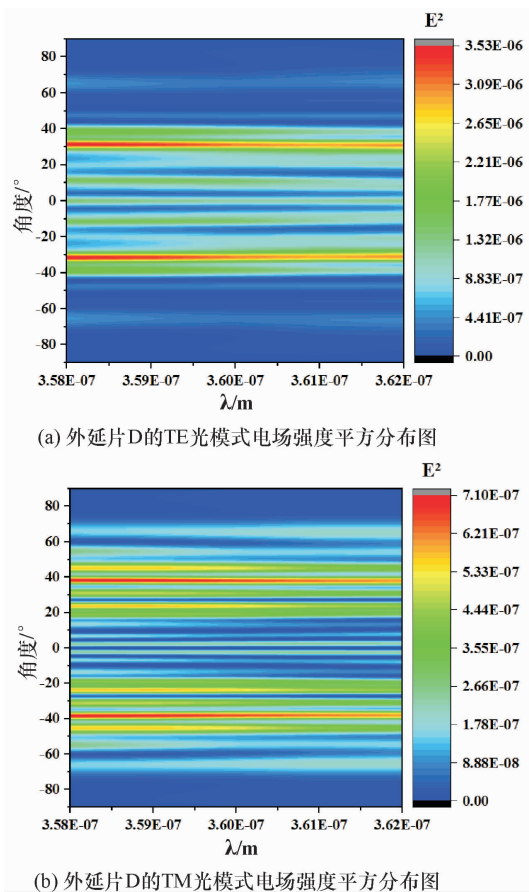


图 7 外延片 D 的 TE 和 TM 光模式电场强度平方分布图
 Fig. 7 The distribution of the electric field intensity squared of TE and TM optical mode electric of epitaxial wafer D

如图 4(a) ~ 图 4(b)、图 8(a) ~ 图 8(b) 所示,外延片 E 是在外延片 D 的基础上,增加了蓝宝

石半圆图案的刻蚀,可以看出,相比于外延片 A,外延片 E 的 TE 光在出光角度为 0° 、 30° 的方向得到了加强, 10° 、 20° 的光强减弱。而对于 TM 光在出光角度为 $20^\circ \sim 50^\circ$ 的方向明显加强, $0^\circ \sim 3^\circ$ 方向的光强降低。这是因为凹槽刻蚀、半圆刻蚀、蓝宝石半圆结构的共同作用,使干涉方向上的光线有所增加或减少,导致不同角度的光强有所变化。而且可以发现,TE 和 TM 光模式的光提取率有明显的提升,外延片 E 相比于外延片 A 的 TE 光模式的光提取效率提高了 19.10%,TM 光模式提高了 29.30%。外延片 E 相比于外延片 D 的 TE 光模式的光提取效率提高了 10.85%,TM 光模式提高了 10.20%。除了光提取效率的提高以外,出光强度也有所提高,原理和外延片 D 中的半圆结构类似,起到了聚光作用,而且蓝宝石半圆刻蚀对光学性能所起的作用要比凹槽刻蚀和半圆刻蚀的作用更大。

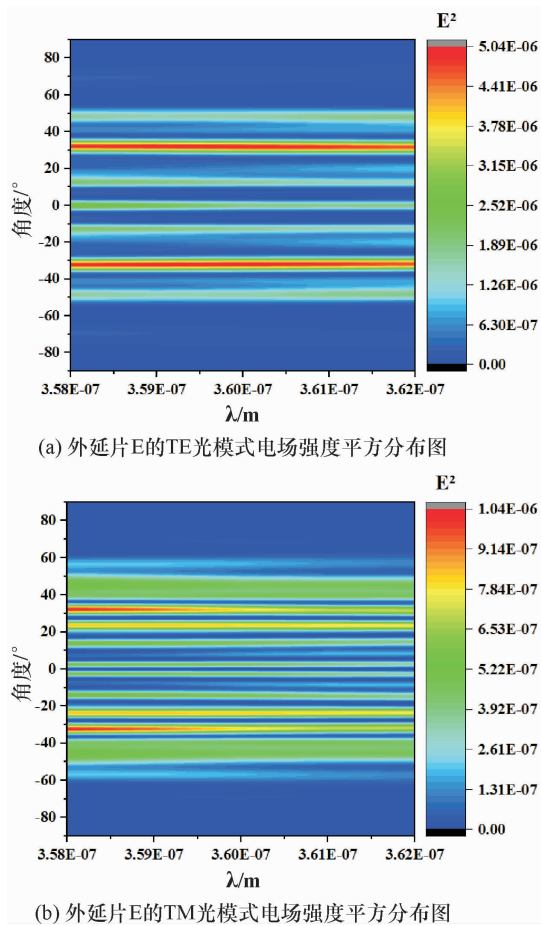


图 8 外延片 E 的 TE 和 TM 光模式电场强度平方分布图
Fig. 8 The distribution of the electric field intensity squared of TE and TM optical mode electric of epitaxial wafer E

2.2 新型结构的参数研究

通过 5 类外延片的光学性能的对比研究,可

以发现,新型外延片 E 的性能比其他外延片要更佳,表明了对结构进行 AlN 凹槽刻蚀、AlN 柱状体的凹半圆刻蚀以及蓝宝石凸半圆的刻蚀能够有效提高器件的光提取效率和出光强度。为了进一步挖掘影响器件光学性能的原因,接下来将对 AlN 刻蚀层和蓝宝石刻蚀层的结构参数进行深入研究,新型紫外 LED 的结构参数如图 9 所示。

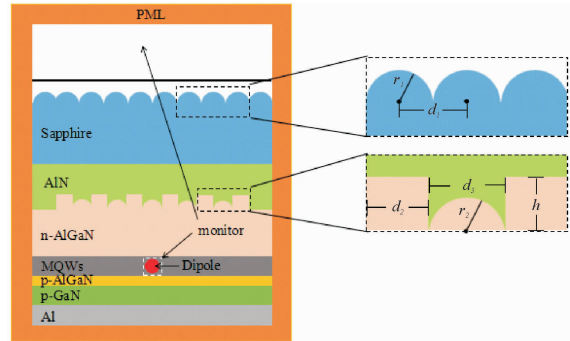


图 9 新型紫外 LED 结构参数图

Fig. 9 Structural parameter diagram of new UV LED

其中, r_1 为蓝宝石刻蚀半圆图案的半径, d_1 为相邻蓝宝石半圆图案中心点之间的距离, d_2 为 AlN 刻蚀凹槽的宽度, h 为 AlN 刻蚀凹槽的深度或者是刻蚀 AlN 薄膜后的 AlN 柱状体的高度, d_3 为 AlN 柱状体的宽度, r_2 为 AlN 柱状体表面刻蚀的半圆的半径,其值为 d_3 的一半,新型结构的其余基本参数均与表 1 所提及的数据一致,因此,在本节中,主要研究 r_1 、 d_1 、 d_2 、 h 、 d_3 的参数变化对新型紫外 LED 结构光学性能的影响。

2.2.1 AlN 刻蚀层参数变化对光学性能的影响

为了研究 AlN 刻蚀层中凹槽宽度 d_2 对器件光学性能的影响, d_3 、 h 、 r_1 和 d_1 的固定取值为 300 nm、200 nm、300 nm 和 600 nm,而 d_2 的具体结构参数值分别取 30 nm、60 nm、90 nm、120 nm、150 nm 和 180 nm。图 10 展示了器件在 TE 和 TM 光模式下的光提取效率与凹槽宽度之间的关系,能够发现,光提取效率随着凹槽宽度的增加呈先增加后减小再增加的趋势,其中 60 nm 和 180 nm 宽度的凹槽对应的光提取效率较高。这主要是因为偶极子光源的发射光在各个角度的发光均匀性不同,TE 光主要为垂直出射,小角度范围内的光更多,而 TM 光则与 TE 光相反,两侧出射光较多,通过芯片两侧的反射最终从垂直面出射。而凹槽宽度的变化,意味着凹槽的相对位置会发生变化,这将会导致发射光进入到凹槽内的光也会相应发生

改变,进入到凹槽内的光越多,越容易被凹槽的侧面所折射出去,从而导致不同的光提取效率。而 90 nm 宽度的凹槽所对应的光提取效率有所降低是由于凹槽的排列位置以及凹槽的刻蚀宽度过小,因而不足以将大部分光包含到凹槽内部,使得光提取效率下降。随着宽度逐渐增加,凹槽内的光线也同步增加,使得更多大角度的发射光因小角度入射到凹槽的侧面而被折射到垂直方向,因此,光提取效率也随之增加。

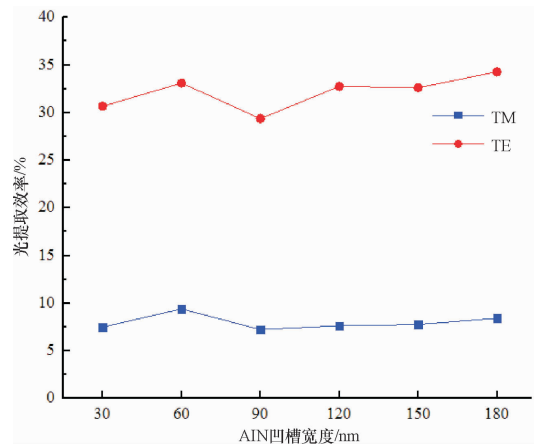


图 10 光提取效率随凹槽宽度的变化关系图

Fig. 10 Variation of light extraction efficiency with groove width

图 11(a)和图 11(b)为不同凹槽宽度所对应的 TE 光和 TM 光的电场强度平方分布图。可以发现,TE 光的出光角度主要在 0° 、 10° 、 30° 和 50° ,说明光在这些角度的传播方向上发生了干涉使得电场强度有所变化。在 30° 的出光方向上,60 nm 和 180 nm 的凹槽宽度对应的光强达到了最大值,说明较多的光在该结构参数下出射到外界且沿着同一方向发生干涉,相应的,在 0° 、 10° 和 50° 的方向上的光强明显减小,这是因为凹槽的相对位置以及柱状体刻蚀半圆的相对位置均发生了改变,导致光的传播方向改变,从而使得该方向上的光有所减少,干涉的强度减弱,因此,电场强度略微下降。

而 TM 光的出光角度主要在 22.5° 、 32.5° 和 45° 以及 60 nm 和 180 nm 的凹槽宽度对应的光强达到了最大值,随着宽度的增加,电场强度和光提取效率有着相似的规律,光强随之增加。但凹槽宽度在 120 nm 以上时,且在 $0 \sim 15^\circ$ 的小角度内出现了光强增加的现象,这是因为凹槽对光的反射或折射作用,使光在 $0 \sim 15^\circ$ 方向上传播,从而使电场强度有所增强。无论是 TE 光还是 TM 光,虽然

90 nm 凹槽宽度的光提取效率较低,但是其电场强度并不是很低,这是因为能够出射的光当中,较多的光均集中于同一出射方向,发生相干干涉,使得其电场强度变高。

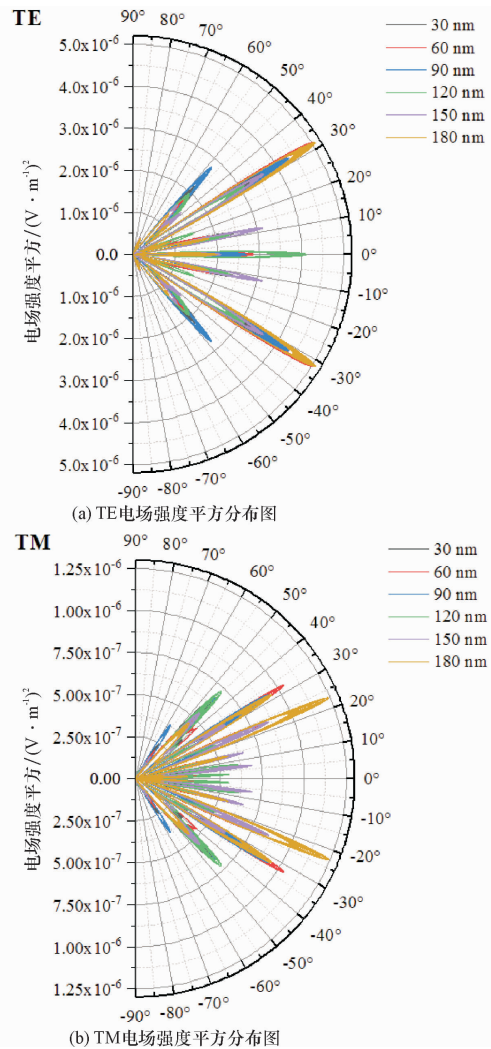


图 11 AlN 凹槽宽度分别为 30 nm、60 nm、90 nm、120 nm、150 nm 和 180 nm 时的 TE 和 TM 电场强度平方分布图

Fig. 11 Distribution diagram of TE and TM electric field intensity squared when AlN groove width is 30 nm, 60 nm, 90 nm, 120 nm, 150 nm and 180 nm respectively

研究 AlN 刻蚀层中柱状体宽度 d_3 对器件光学性能的影响, d_2 、 h 、 r_1 和 d_1 固定取值为 60 nm、200 nm、300 nm 和 600 nm,而 d_3 的具体结构参数值分别取 100 nm、150 nm、200 nm、250 nm、300 nm 和 350 nm。图 12 显示了器件在 TE 和 TM 光模式下的光提取效率与 AlN 柱状体宽度之间的关系,能够发现,在柱状体宽度为 300 nm、凹半圆刻蚀半

径为 150 nm 时,光提取效率提升的幅度最大,虽然其余宽度的光提取效率相比于传统博模型结构有所提高,但是也没能超过 300 nm 宽度所对应的光提取效率,影响因素主要有两个,一是随着宽度的增加,其凹半圆的半径也会越大,使更多的光透过凹半圆,从而增加光线通过 AlN/n-AlGaIn 界面的比例,因此,从宽度 100 nm 增加到 200 nm,光提取效率逐渐增加,而且凹半圆可充当凸透镜结构,使光更加聚集,使得光更多地往垂直方向出射;二是随着宽度的增加,凹槽的位置也会相应变化,而 TE 光和 TM 光是在固定的出射方向发射光线,凹槽位置的变化也会影响凹槽内部光线的多少,从而影响光的折射与反射效果,最终影响光提取效率,虽然 250 nm 和 350 nm 宽度的半圆半径较大,但是受到凹槽位置的影响更大,进入凹槽的光线较少,或者是凹槽越偏离光源中心点位置,大角度的光就更容易被折射到垂直方向上,所以,光提取效率会相对较低。因此,选择合适的柱状体宽度以及凹半圆的半径尤为重要。

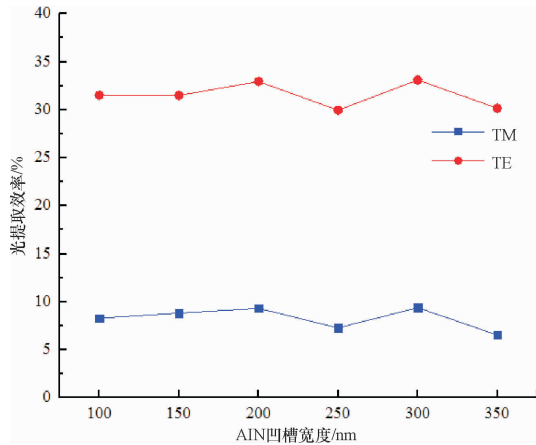


图 12 光提取效率随 AlN 柱状体宽度的变化关系图

Fig. 12 Relationship between light extraction efficiency and AlN column width

图 13(a) 和图 13(b) 为不同 AlN 柱状体宽度所对应的 TE 光和 TM 光的电场强度平方分布图。可以发现,TE 光在出射方向 30° 处,宽度为 300 nm 和 350 nm 的光强达到了最大值,宽度越大,其电场强度越强,这主要是凹半圆的作用,使得更多的光汇聚于同一方向,使得该方向上的电场强度得以加强。TM 光在出射方向 32.5° 处,宽度为 150 nm 和 300 nm 的光强达到了最大值,而且由于 200 nm 和 300 nm 宽度的 AlN 柱状体对 TM 光的折射作用,使得小角度范围出射的光的光强也得到了提

高。此外,可以观察到,无论是 TE 光还是 TM 光,柱状体宽度的改变几乎不影响出射角度,而是影响电场强度的大小。

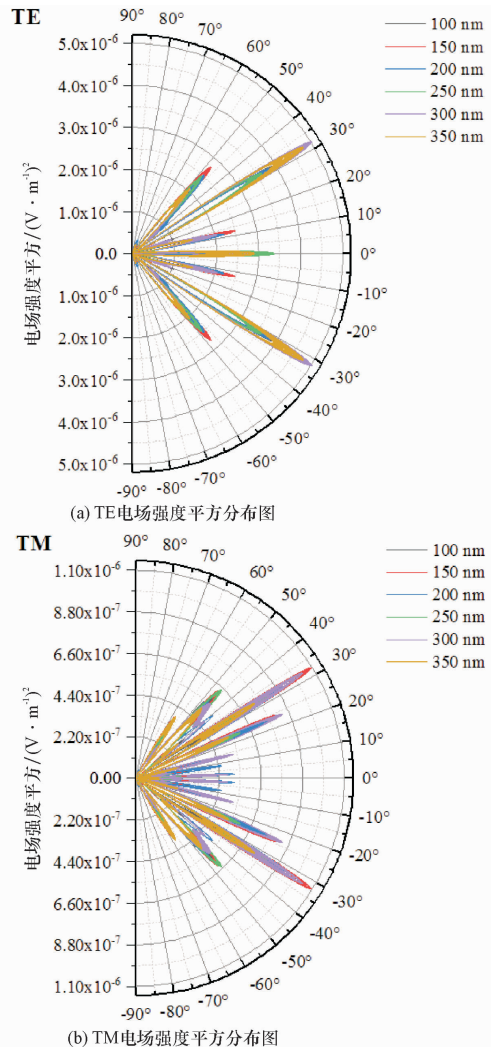


图 13 AlN 柱状体宽度分别为 100 nm、150 nm、200 nm、250 nm、300 nm 和 350 nm 时的 TE 和 TM 电场强度平方分布图

Fig. 13 Electric field intensity squared distribution of TE and TM when the width of AlN column is 100 nm, 150 nm, 200 nm, 250 nm, 300 nm and 350 nm respectively

最后,研究了 AlN 刻蚀层中凹槽高度 h 对器件光学性能的影响, d_2 、 d_3 、 r_1 和 d_1 固定取值为 60 nm、300 nm、300 nm 和 600 nm,而 d_2 的具体结构参数值分别取 50 nm、100 nm、150 nm、200 nm、250 nm 和 300 nm。图 14 展现了器件在 TE 光和 TM 光模式下的光提取效率与凹槽高度之间的关系,不难发现,光提取效率随着凹槽高度的增大呈先上升后下降的趋势。并且在凹槽高度与柱状体中

凹半圆的半径相等时,得到了最大的光提取效率。当高度小于 150 nm 时,随着高度的增加,到达凹槽内部侧面的光就会越多,部分大角度的光通过侧面的折射向垂直方向传播,提高了 TE 光和 TM 光的光提取效率;当高度大于 150 nm 时,随着高度的增加,光提取效率反而减小,这是因为凹半圆和凹槽之间会存在一定的间隙,当一部分光通过凹半圆到达 AlN 材料中时,由于受到凹槽的影响,部分光线从折射率较小的 AlN 层穿透到填充折射率较大的 n-AlGaIn 材料的凹槽中,使得较大角度的发射光会因为折射,改变了光的传播方向,偏离了原本传播的方向,更偏向于从两侧出射,因此,降低了结构顶部的光提取效率,高度越高,则对光的折射越多,光提取效率逐渐变低。

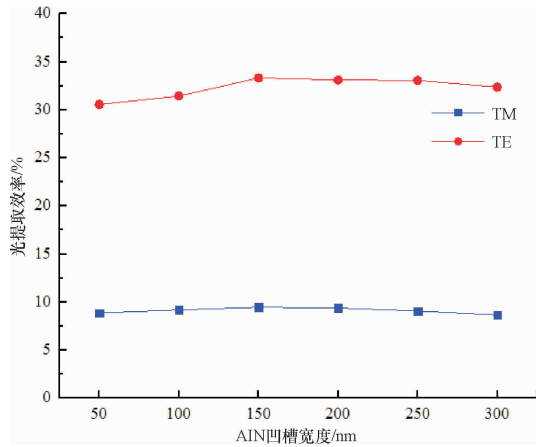


图 14 光提取效率随凹槽高度的变化关系图

Fig. 14 Variation of light extraction efficiency with groove height

图 15(a) 和图 15(b) 为不同 AlN 凹槽高度所对应的 TE 光和 TM 光的电场强度平方分布图。可以发现,对于 TE 光模式,原本 TE 光中大角度的发射光会因为凹槽深度的增加,使得这部分光到达凹槽侧面的几率更大,因此,在出射方向为 30° 的光强会随之增强,而 TE 光中角度较小的光会因为凹槽高度越高,使得光更容易被凹槽侧面折射和反射,从而偏离了垂直方向,因此,在 10° 和 50° 的出光方向上的光强会随着刻蚀凹槽的深度的增加而减小。对于 TM 光模式,仍然可以观察到同样的现象,TM 光中较大角度的发射光在 22.5° 和 32.5° 的出射方向上发生相长干涉,使得电场强度逐渐增加,而较小角度的 TM 光则会受到凹槽折射和反射的影响,使得部分 TM 光从结构的侧面出射,降低了顶部的光输出,光强在出光方向为 15°、

45°、55° 的出光方向随高度增加而减小,而且虽然 TM 光和 TE 光的出射光强有所差异,但是两者的出光角度几乎相同,在 ±5° 的范围内变化,表明在本文设定的仿真参数下,凹槽高度的改变分别对 TE 光和 TM 光的传播方向以及光强的变化有着相似的作用。

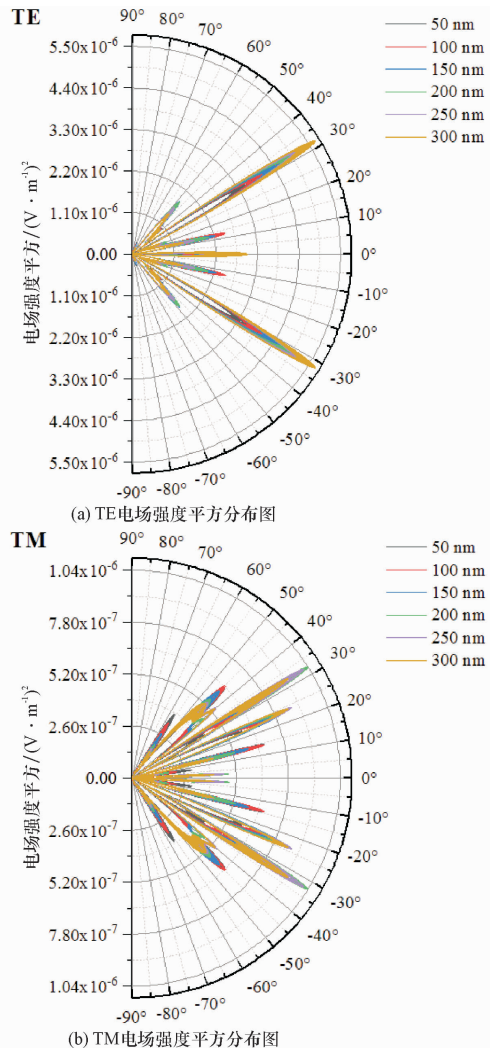


图 15 AlN 凹槽高度分别为 50 nm、100 nm、150 nm、200 nm、250 nm 和 300 nm 时的 TE 和 TM 电场强度平方分布图

Fig. 15 Distribution diagram of TE and TM electric field intensity squared when AlN groove height is 50 nm, 100 nm, 150 nm, 200 nm, 250 nm and 300 nm respectively

2.2.2 蓝宝石刻蚀层参数变化对光学性能的影响

为了研究蓝宝石刻蚀层中刻蚀图案的半径 r_1 对器件光学性能的影响, d_2 、 d_3 、 h 和 d_1 固定取值为 60 nm、300 nm、200 nm 和 600 nm, 而 r_1 的具体结构参数值分别取 50 nm、100 nm、150 nm、200

nm、250 nm 和 300 nm。图 16 为器件在 TE 和 TM 光模式下的光提取效率与蓝宝石半圆半径之间的关系,可以发现,光提取效率随着蓝宝石半圆半径的增大呈先上升后下降的趋势,而且 TE 光模式和 TM 光模式的光提取效率分别在半圆半径为 250 nm 和 200 nm 的结构中达到最大值。这主要是因为半圆图案的间距不变,随着半圆半径的增加,图案与图案之间的水平界面变小,从而降低了全反射的概率,同时使得更多的光进入到半圆中,从而使得光被汇聚和折射到空气当中,提高了光提取效率,但是随着半径的增加,半圆的曲率半径也随之增加,对光的聚焦和折射能力减弱,因此,当半径增加到一定程度时,较大角度的发射光几乎不被折射到垂直方向上,从而降低了光提取效率,而且由于 TM 光模式下的较大角度发射光较多,因此,在大于 200 nm 的半圆半径的作用下,难以改变其传播方向,最终大部分的光从两侧发出,而 TE 光中大角度的发射光较少,因此,在大于 250 nm 的半圆半径作用下,光提取效率逐渐降低。

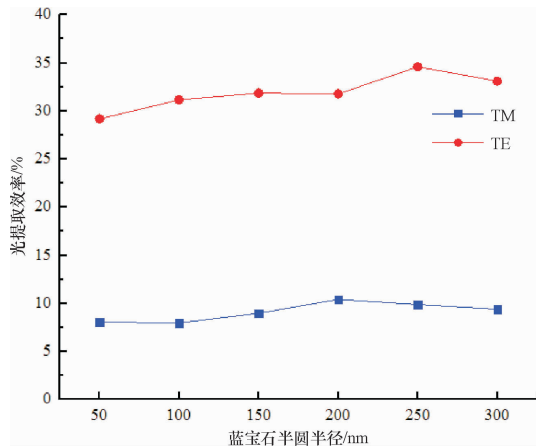


图 16 光提取效率随蓝宝石半圆半径的变化关系图

Fig. 16 Variation of light extraction efficiency with sapphire semicircle radius

图 17(a)和图 17(b)为不同蓝宝石半圆半径所对应的 TE 和 TM 光的电场强度平方分布图。可以发现,对于 TE 光,半圆半径为 250 nm 和 300 nm 的结构在 30° 的出射方向上达到了最大值,因此,半径越大,对该方向上的光强影响也越大,使得光更多地聚集到了该方向上,从而增强了电场强度。而且随着半径的增加,出光方向角度有所偏移,偏移幅度在 2.5° ~ 5.0° 之间,表明在 TE 光模式下,蓝宝石半圆半径的改变对光的传播方向影响较大,其次,在半圆半径为 150 nm 和 200 nm

的结构中,且在 0 ~ 50° 的出光范围内,电场强度差异不大,因此,选择合适的半圆半径对发光均匀性起着至关重要的作用。对于 TM 光模式,随着半径的增大,电场强度在 25°、32.5° 方向上大幅提升,电场强度较大的出光方向出现了角度的偏移,因此,蓝宝石半圆半径的改变同样会对 TM 光的传播有着一定的影响,虽然出光强度得到了加强,但是电场强度差异逐渐变大,TM 光的发光均匀性有所降低。

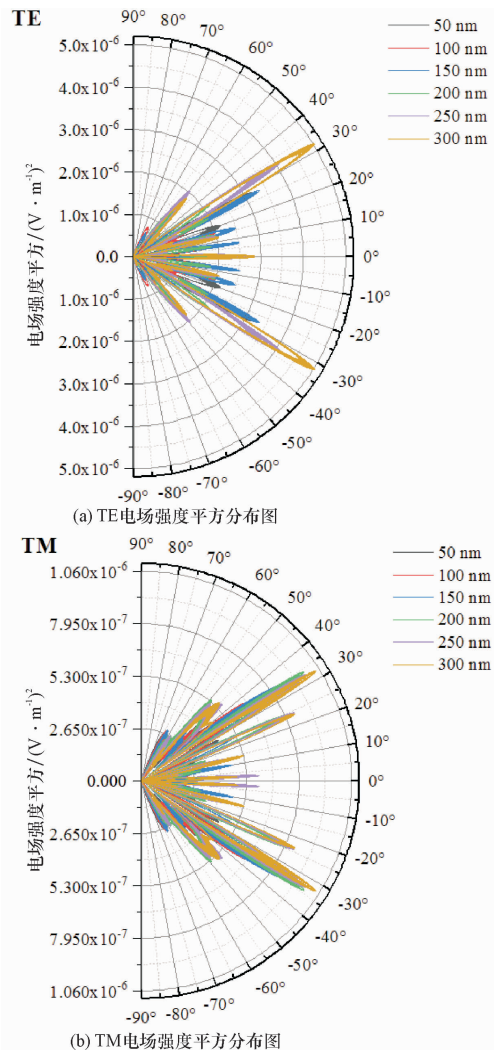


图 17 蓝宝石半圆半径分别为 50 nm、100 nm、150 nm、200 nm、250 nm 和 300 nm 时的 TE 和 TM 电场强度平方分布图

Fig. 17 Electric field intensity squared distribution of TE and TM when the radius of sapphire semicircle is 50 nm, 100 nm, 150 nm, 200 nm, 250 nm and 300 nm respectively

其次,研究了蓝宝石刻蚀层中相邻刻蚀图案

的间距 d_1 对器件光学性能的影响, d_2 、 d_3 、 h 和 r_1 固定取值为 60 nm、300 nm、200 nm 和 200 nm, 而 d_1 的具体结构参数值分别取 450 nm、480 nm、510 nm、540 nm、570 nm 和 600 nm。图 18 为器件在 TE 和 TM 光模式下的光提取效率与蓝宝石半圆间距之间的关系, 可以发现, 对于 TE 光, 光提取效率随蓝宝石半圆间距增大而呈先下降后上升的趋势, 这是由于间距发生变化, 图案的相对位置也会发生变化, 使得进入到图案内的光线发生改变, 因此, 光提取效率会有所变化。而大于 510 nm 时的光提取效率逐渐提高是因为半圆的位置移动到了出光角度较大的位置, 使得大角度出射光得以折射到空气中, 进而使得光提取效率提高, 而达到 570 nm 以上时, 光提取效率并没有太大变化, 包含在图案中的光线达到饱和, 此时改变间距对器件的光提取效率并没有太大影响, 因此, 变化较小。而对于 TM 光, 由于大角度的光线较多, 因此, 间距的增大有利于使更多大角度的发射光透过半圆, 改变间距对 TM 光的光提取效率的影响更大。

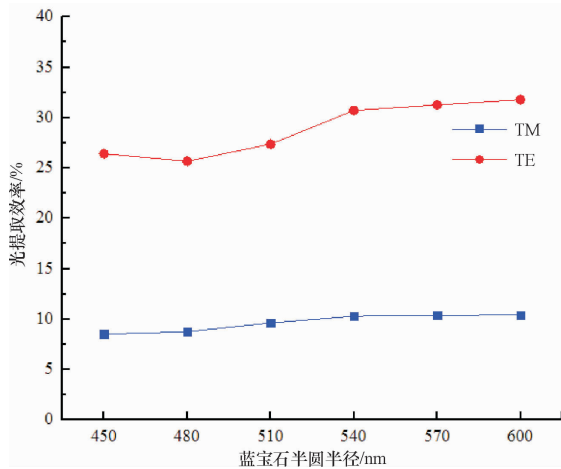


图 18 光提取效率随蓝宝石半圆间距的变化关系图

Fig. 18 Variation of light extraction efficiency with sapphire semicircle spacing

图 19(a) 和图 19(b) 为不同蓝宝石半圆间距所对应的 TE 光和 TM 光的电场强度分布图。可以观察到, TE 光的电场强度随着间距的增大而呈现出先增加后减小再增加的趋势, 虽然光提取效率会随着间距的增加而增加, 但是图案位置的不同则会影响光线的传播方向, 使得出射光在 0° 、 15° 、 20° 和 35° 处会因为间距的变化而产生电场强度的变化, 其中, 间距为 540 nm 和 570 nm 的结构

的电场强度取得了最大值, 而且 450 nm、480 nm 和 600 nm 的凸半圆结构, 在这些角度上的电场强度变化较小, 发光均匀性有所提高。对于 TM 光, 间距的增加对光提取效率有明显的提升作用, 而在电场强度图中, 同样能发现类似的规律, 540 nm、570 nm 和 600 nm 的凸半圆结构在 25° 和 35° 方向的光强明显增加, 表明选取大间距的蓝宝石结构对 TM 光的电场强度有显著的提升作用。

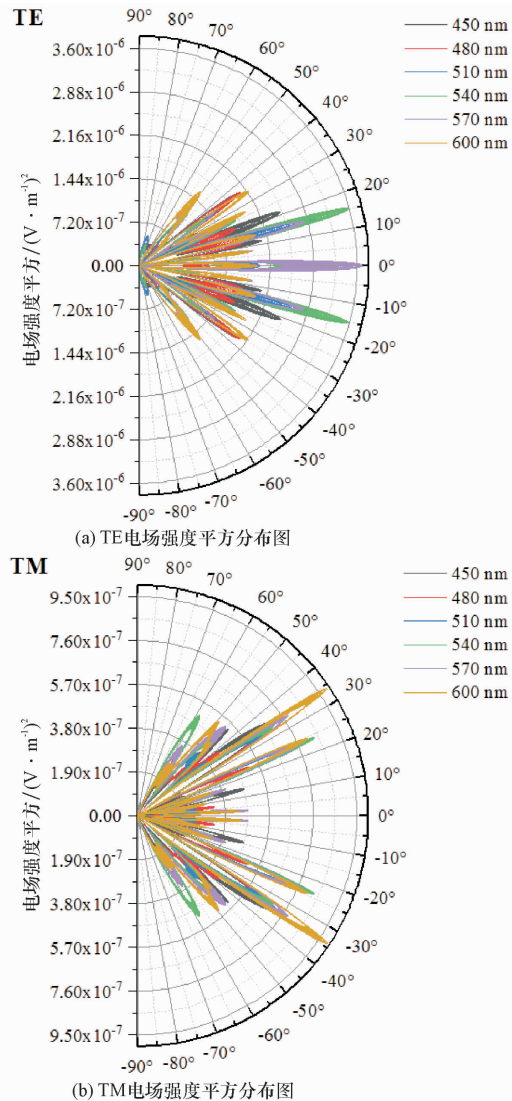


图 19 蓝宝石半圆间距分别为 450 nm、480 nm、510 nm、540 nm、570 nm 和 600 nm 时的 TE 和 TM 电场强度平方分布图

Fig. 19 Electric field intensity squared distribution of TE and TM when the spacing of sapphire semicircle is 450 nm, 480 nm, 510 nm, 540 nm, 570 nm and 600 nm respectively

3 总 结

目前,紫外 LED 器件普遍存在出光效率低等问题,因此,本文提出了一种新型 AlGaIn 基紫外 LED 外延结构,通过 FDTD 软件仿真得出了新型紫外 LED 结构能够有效提高器件光学性能的结论,对比了 5 类外延片的出光效率与出光强度,其中新型结构的 TE 光模式的光提取效率提高了 1.4% ~ 19.1%,TM 光模式光提取效率提高了 11.8% ~ 29.3%,TE 光模式的最高出光强度提高

了 23.86% ~ 42.78%,TM 光模式的最高出光强度提高了 10.94% ~ 47.18%,这主要利用了凹槽侧面对光的折射、半圆结构对光的折射与汇聚等原理,对器件的光学性能有着明显的改善。为了进一步研究该结构的参数设置对光提取效率和出光强度的影响,本文研究了新型外延片中结构参数对器件光学性能的影响,其中,AlN 凹槽宽度为 180 nm、AlN 柱状体高度为 300 nm、AlN 凹槽高度为 150 nm、蓝宝石半圆半径为 300 nm、蓝宝石图案间距为 570 nm 的结构的光学性能最佳。

参考文献:

- [1] 苏孟玮. AlGaIn 基深紫外发光二极管的可靠性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [2] 闫大为. 宽禁带 III 族氮化物半导体器件输运与界面特性研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [3] 杨文献. 用于紫外发光器件的 AlGaIn 材料的生长及物性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [4] Zhang M, Cai D, Zhang Y, et al. Investigation of the properties and formation process of a peculiar V-pit in HVPE-grown GaN film[J]. *Materials Letters*, 2017, 198: 12-15.
- [5] Kong J, Feng M, Cai J, et al. GaN grown on nano-patterned sapphire substrates[J]. *Journal of Semiconductors*, 2015(4): 30-33.
- [6] Cao X A, Teetsov J A, Shahedipour-Sandvik F, et al. Microstructural origin of leakage current in GaN/InGaIn light-emitting diodes[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 264(1-3): 172-177.
- [7] 李媛. Si 衬底上 GaIn 基近紫外 LED 的缺陷控制及能带调控[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [8] 吴亚林, 王世宁, 曹永海, 等. 基于原子扩散的蓝宝石芯片键合技术研究[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2016, 11(2): 178-181.
- [9] Utsumi J, Takigawa R. Surface activated bonding of aluminum oxide films at room temperature[J]. *Scripta Materialia*, 2021, 191: 215-218.
- [10] Khan M A, Chen Q, Yang J, et al. UV, blue and green light emitting diodes based on GaIn-InGaIn multiple quantum wells over sapphire and (111) spinel substrates[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 1997, 43(1): 265-268.
- [11] Han J, Crawford M H, Shul R J, et al. AlGaIn/GaN quantum well ultraviolet light emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(12): 1688-1690.
- [12] Taniyasu Y, Kasu M, Makimoto T. An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres[J]. *Nature*, 2006, 441: 325-328.
- [13] Kneissl M, Seong T Y, Han J, et al. The emergence and prospects of deep-ultraviolet light-emitting diode technologies[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(4): 233-244.
- [14] Li J, Wang J, Yi X, et al. III-Nitrides light emitting diodes: Technology and applications[M]. Berlin: Springer, 2020.
- [15] 蒋振宇, 陈顺利, 莫庆伟. 一种 LED 倒装芯片及其制备方法: 中国, 201610505677. X[P]. 2016-10-12.
- [16] Guo Y, Zhang Y, Yan J, et al. Enhancement of light extraction on AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes using a sidewall reflection method[C] // 2016 13th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS). Piscataway: IEEE, 2016: 127-130.
- [17] Lin T H, Wang S J, Tu Y C, et al. Improving the performance of power GaIn-based thin-film flip-chip LEDs through a two-fold roughened surface[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2016, 45: 69-75.
- [18] Kashima Y, Maeda N, Matsuura E, et al. High external quantum efficiency (10%) AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes achieved by using highly reflective photonic crystal on p-AlGaIn contact layer[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 11(1): 012101.
- [19] Liu X, Zhou S, Gao Y, et al. Numerical simulation and experimental investigation of GaIn-based flip-chip LEDs and top-e-

- mitting LEDs[J]. *Applied Optics*, 2017, 56: 9502-9509.
- [20] Zhang L, Guo Y, Yan J, et al. Deep ultraviolet light-emitting diodes based on a well-ordered AlGa_N nanorod array[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 6-12.
- [21] Ding Q A, Li K, Kong F, et al. Improving the vertical light extraction efficiency of GaN-based thin-film flip-chip LED with double embedded photonic crystals[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, 51(2): 1-9.
- [22] Zhu P, Tansu N. Resonant cavity effect optimization of III-nitride thin-film flip-chip light-emitting diodes with microsphere arrays[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(20): 6305-6312.
- [23] 李梦恬. 倒装 LED 器件共晶焊接制备及性能研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2019.
- [24] Conroy M, Zubialevich V Z, Li H, et al. Epitaxial lateral overgrowth of AlN on self-assembled patterned nanorods[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(2): 431-437.
- [25] Inoue S, Tamari N, Taniguchi M. 150 mW deep-ultraviolet light-emitting diodes with large-area AlN nanophotonic light-extraction structure emitting at 265 nm[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(14): 141106.
- [26] Liang R, Dai J, Xu L, et al. High light extraction efficiency of deep ultraviolet LEDs enhanced using nanolens arrays[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(6): 2498-2503.
- [27] Zhang L, Guo Y N, Yan J C, et al. Deep ultraviolet light-emitting diodes with improved performance via nanoporous AlGa_N template[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4917-4926.
- [28] Khan M A, Matsumoto T, Maeda N, et al. Improved external quantum efficiency of 293 nm AlGa_N UVB LED grown on an AlN template[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 58(SA): SAAF01.
- [29] 盛彬彬, 王玲, 许金通, 等. 利用 AlGa_N 薄膜透射谱提取材料参数的研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 152-159.
- [30] Liu Z, Wang K, Luo X, et al. Precise optical modeling of blue light-emitting diodes by Monte Carlo ray-tracing[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9398-9412.
- [31] 颜才满. 平面型近紫外 LED 器件光效提升及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [32] Schubert E F. Refractive index and extinction coefficient of materials[EB/OL]. (2017-12-23) [2022-02-23]. <https://max.book118.com/html/2017/1222/145452229.shtm>.
- [33] Laws G M, Larkins E C, Harrison I, et al. Improved refractive index formulas for the Al_xGa_{1-x}N and In_yGa_{1-y}N alloys[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(2): 1108-1115.
- [34] Yu G, Wang G, Ishikawa H, et al. Optical properties of wurtzite structure GaN on sapphire around fundamental absorption edge (0.78–4.77 eV) by spectroscopic ellipsometry and the optical transmission method[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(24): 3209-3211.
- [35] Brunner D, Angerer H, Bustarret E, et al. Optical constants of epitaxial AlGa_N films and their temperature dependence[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 82(10): 5090-5096.
- [36] Zhang Y, Meng R, Zhang Z H, et al. Effects of inclined sidewall structure with bottom metal air cavity on the light extraction efficiency for AlGa_N-based deep ultraviolet light-emitting diodes[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1-9.
- [37] Zhang Y, Zhang J, Zheng Y, et al. The effect of sapphire substrates on omni-directional reflector design for flip-chip near-ultraviolet light-emitting diodes[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 1-9.
- [38] 王晓民, 李康, 孔凡敏, 等. 纳米半球微镜阵列结构对 GaN 基 LED 光提取效率的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 227-233.
- [39] Zheng Y, Zhang Y, Zhang J, et al. Effects of meshed p-type contact structure on the light extraction effect for deep ultraviolet flip-chip light-emitting diodes[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(1): 1-9.

【责任编辑: 陈 钢】