

## 全介质纳米结构实现 LED 偏振光辐射准直

王淼<sup>1,2,3,4</sup>, 易觉民<sup>1,2,3,4\*</sup>, 徐科<sup>1,2,3,4\*\*</sup><sup>1</sup>中国科学技术大学苏州纳米技术与纳米仿生学院, 安徽 合肥 230026;<sup>2</sup>中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123;<sup>3</sup>江苏第三代半导体研究院有限公司, 江苏 苏州 215000;<sup>4</sup>沈阳材料科学国家研究中心, 辽宁 沈阳 110010

**摘要** 为提高偏振出光发光二极管(LED)的光场耦合效率,以一维光子晶体和亚波长介质光栅为基础,设计一种集成式全介质纳米结构组合器件。采用有限差分时域(FDTD)方法建立实现偏振光束准直功能的全介质纳米结构模型。系统研究光子晶体和介质光栅的结构参数对偏振LED出射光场调控的影响,分析光子晶体厚度、光子晶体周期、介质光栅周期、介质光栅高度和介质光栅线宽等参数影响准直特性的物理机制。设计优化的纳米结构,自上而下分别为周期为550 nm、线宽为160 nm、深度为120 nm的TiO<sub>2</sub>纳米光栅和两对Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>薄膜组成的光子晶体结构(每层厚度均为80 nm)。计算结果表明,所设计的全介质纳米结构可以将绿光波段偏振LED出光远场辐射角度控制在-6°~6°范围内,可以实现光辐射远场准直,同时出光效率大于77%。在垂直方向(远场辐射角度为0°)所设计的结构的远场辐射强度相较无结构LED辐射强度提高了6.6倍。

**关键词** 物理光学; 发光二极管; 偏振光; 辐射准直; 纳米光栅

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1926001

## Radiation Collimation of Polarized LED with All-Dielectric Nanostructures

Wang Miao<sup>1,2,3,4</sup>, Yi Juemin<sup>1,2,3,4\*</sup>, Xu Ke<sup>1,2,3,4\*\*</sup><sup>1</sup>School of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;<sup>2</sup>Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics (SINANO), Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, Jiangsu, China;<sup>3</sup>Jiangsu Institute of Advanced Semiconductors Ltd, Suzhou 215000, Jiangsu, China;<sup>4</sup>Shenyang National Laboratory for Materials Science, Shenyang 110010, Liaoning, China

**Abstract** In order to improve the light-field coupling efficiency of a polarized light emitting diode (LED), a composite device with an integrated all-dielectric nanostructure is designed based on a one-dimensional photonic crystal and a subwavelength dielectric grating. The all-dielectric nanostructure model for collimating polarized beams is established by using the finite-difference time-domain (FDTD) method. The influence of structure parameters of the photonic crystal and the dielectric grating on the light-field regulation of the polarized LED is studied systematically. The physical mechanism of collimation characteristics affected by photonic crystal thickness, photonic crystal period, dielectric grating period, dielectric grating height and dielectric grating linewidth is analyzed. The optimized nanostructures are composed of TiO<sub>2</sub> nano-gratings with a period of 550 nm, a linewidth of 160 nm and a depth of 120 nm, and a photonic crystal structure composed of two pairs of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> films (the thickness of each layer is 80 nm). Calculation results show that the designed all-dielectric nanostructure can control the divergence angle of the polarized LED within the range of -6°-6° in the green light band, and achieve the far-field collimation of the light radiation, with the light extraction efficiency greater than 77%. The far-field radiation intensity of the designed structure is 6.6 times higher than that of the bare LED in the vertical direction (with a divergence angle of 0°).

**Key words** physical optics; light emitting diode; polarized light; radiation collimation; nano-grating

收稿日期: 2022-02-25; 修回日期: 2022-04-14; 录用日期: 2022-04-22

基金项目: 中国科学院青年创新促进会

通信作者: \*jmyi2020@sinano.ac.cn; \*\*kxu2006@sinano.ac.cn

## 1 引言

氮化镓基发光二极管(LED)凭借其高光效、低损耗等优势,在照明、显示和光通信等领域中已经得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。特别是,具有偏振出光特性的LED在平板显示、三维显示、成像和机器视觉等领域中具有重要的应用价值<sup>[4-5]</sup>。实现高效偏振出光LED的研究工作:一方面研究工作是围绕如何提高LED本身的偏振出光效率开展的,如Wang等<sup>[6]</sup>通过设计具有偏振选择功能的亚波长金属光栅和底部集成具有偏振转换功能的金属超表面实现了高效的线偏振出光LED器件;另一方面通过对LED出射的偏振光束进行整形,以提高出射偏振光的利用效率。例如,在微型投影系统、三维显示、汽车照明和光通信等领域中,都需要对光源进行准直。传统的准直方法是通过体光学透镜实现的。为了耦合宽角度辐射光,透镜的抛物面需要具有较大的深度和孔径,因此会导致准直透镜体积较大,进而会降低系统的耦合效率<sup>[7]</sup>。面向未来新型显示与成像系统,研究超薄、高效且具有光场自准直功能的偏振LED有源器件更具价值。

采用微纳结构实现光场调控为上述问题的解决提供了新的思路。例如,具有等离子激元效应的金属纳米结构可以在亚波长尺度范围内实现对光的操纵,此类纳米结构又被称为光学天线或纳米天线,通过调节结构的尺寸可实现光学频率共振增强<sup>[8-9]</sup>。目前,已经有研究人员将该方法用在LED结构中,以实现出光特性的调控,例如:Okamoto等<sup>[10]</sup>通过在InGaN/GaN量子阱(QW)结构生长中增加金属薄层,引入表面等离子激元效应来提高LED的辐射与出光效率;DiMaria等<sup>[11]</sup>通过在InGaN/GaN多量子点上覆盖具有纳米光栅结构的银(Ag)薄膜,展示了光致发光条件下LED结构在蓝绿光发光波长范围内的准直特性。然而,金属固有的欧姆损耗会导致LED的外量子效率降低。另外一种方法是采用周期性介质分布组成的光子晶体(PC)来控制电磁波的传播,通过选择光子晶体波导的截止频域也可以实现定向辐射<sup>[12-13]</sup>,如Moreno等<sup>[14]</sup>通过光子晶体表面模式实现了光传输的增强和光束定向传输功能。此外,基于全电介质超构光栅也可以实现任意光场的波前整形<sup>[15-18]</sup>,其相位调制方式仅依赖于单一结构之间的相对位移量,不需要改变基元结构的结合形貌,大大降低了纳米制备工艺的难度。例如,Deng等<sup>[19]</sup>设计了一种矩形阵列的全电介质超构光栅,当横磁(TM)波入射光从底部斜入射进该矩形超构光栅时,在 $30^\circ$ 入射角下532 nm波长处实现了一级透射衍射效率达到100%,而其他衍射通道被完全抑制。当前关于采用光子晶体或者超构光栅实现偏振LED的光束准直方面的研究工作较少。

本文结合光子晶体与全电介质超构光栅的优势,基于有限差分时域(FDTD)方法提出一种由光子晶体与介质超构光栅组成的结构,并将其集成在偏振出光LED的顶部,可实现有源发光器件的准直功能。值得

注意的是,所设计的全介质纳米结构主要应用于生长在非极性面上的LED中<sup>[20-21]</sup>,此类LED的出光具有偏振特性,如Brinkley等<sup>[20]</sup>在掺杂了高含量In元素的m面辐射出光的InGaN基LED中测到520 nm波长的偏振度为0.96。由于该类LED在大功率注入电流下不会出现效率下降<sup>[22]</sup>等问题,因此在未来新型显示与大功率照明等领域中更具优势。

## 2 仿真模型和计算方法

本文提出一种全介质纳米结构,并将其集成在偏振LED出光面上,结构如图1所示,其中MQW为多量子阱。该结构主要包括由周期性堆叠 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 薄膜组成的一维光子晶体结构和集成于LED器件顶部的 $\text{TiO}_2$ 纳米光栅。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 交错沉积在P型GaN表面上,其厚度分别为 $H_1$ 和 $H_2$ 。顶部的 $\text{TiO}_2$ 纳米光栅几何参数分别为周期为 $P$ 、线宽为 $W$ 和厚度为 $H_3$ 。调节全介质纳米结构的相关尺寸参数可以实现调控偏振LED辐射出光的角度分布情况。

全介质纳米结构基于FDTD进行参数优化。计算所采用的三维坐标(XYZ)的方向和结构参数的定义已标注在图1中。其中,X、Y方向的边界采用周期性边界,沿光传播方向的Z轴的边界定义为完美吸收边界。在计算中模拟非极性面LED量子阱发光采用的是线偏振电偶极子光源,假设LED出射光的偏振方向平行于X轴且与所设计的介质光栅的线栅方向保持垂直,同时此时P型GaN的厚度为100 nm。

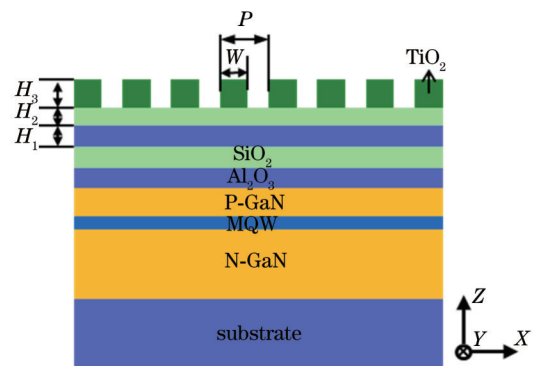


图1 集成全介质纳米结构的InGaN/GaN偏振出光LED的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of proposed polarized InGaN/GaN LED integrated with all-dielectric nanostructures

## 3 设计与性能优化

参数优化过程如图2所示。图2(a)给出的是一维光子晶体结构所包含的不同厚度的介质传输层在不同远场角度下的散射强度分布情况。为方便比较强度变化,文中优化过程中给出的远场散射强度均是将原始偏振LED在垂直方向上的远场强度进行最大值归一化后给出的相对比值结果。在计算过程中, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 和GaN的折射率分别为1.78、1.47、2.67和2.42(工作波长为533 nm)。介质传输层中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和

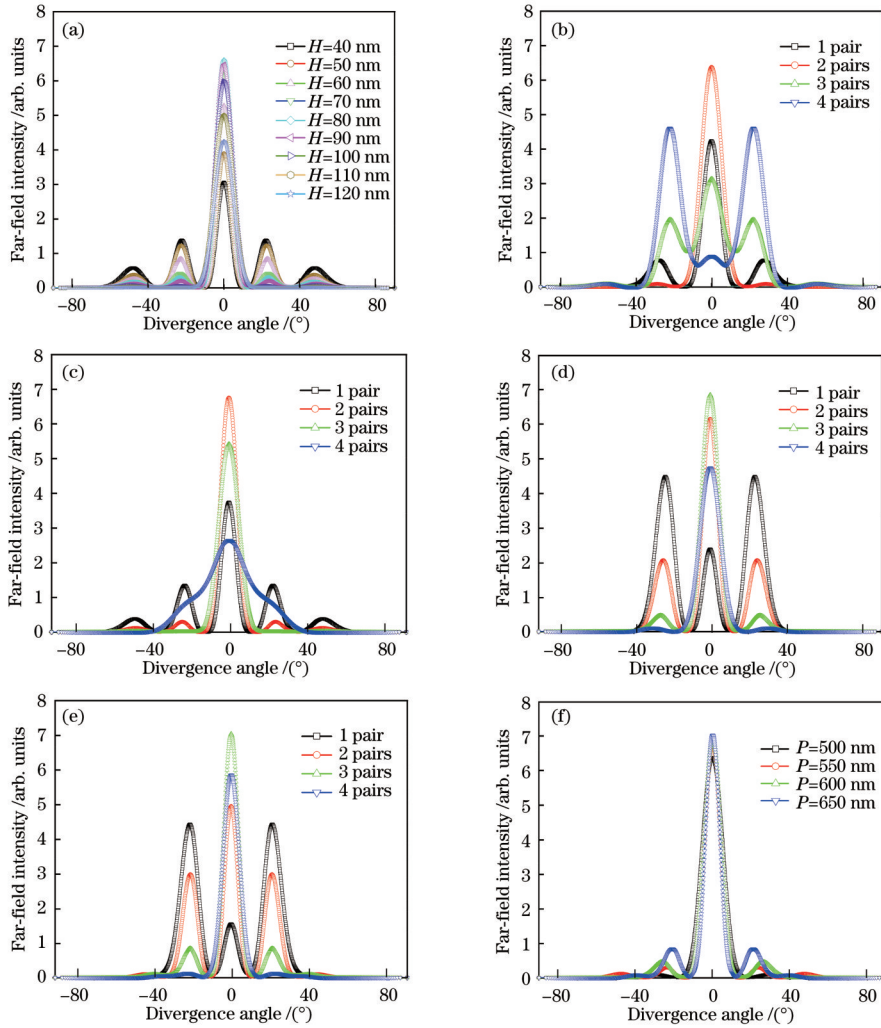


图 2 不同结构参数下远场辐射强度随角度的变化情况。(a)不同介质传输层厚度下远场辐射强度随角度的变化情况,其他参数为  $P=550\text{ nm}$ 、 $W=160\text{ nm}$ 、 $H_3=120\text{ nm}$ 、 $H=H_1=H_2$  和两对交错介质层;(b)  $P=500\text{ nm}$  时不同交错介质层对数下远场辐射强度随角度的变化情况;(c)  $P=550\text{ nm}$  时不同交错介质层对数下远场辐射强度随角度的变化情况;(d)  $P=600\text{ nm}$  时不同交错介质层对数下远场辐射强度随角度的变化情况;(e)  $P=650\text{ nm}$  时不同交错介质层对数下远场辐射强度随角度的变化情况;(f)不同周期优化结果对比,其他参数为  $W=160\text{ nm}$ 、 $H_3=120\text{ nm}$ 、 $H=H_1=H_2=80\text{ nm}$  和两对交错介质层

Fig. 2 Far-field intensity varying with angle under different structural parameters. (a) Far-field intensity varying with angle under different thicknesses of dielectric layers, other parameters are  $P=550\text{ nm}$ ,  $W=160\text{ nm}$ ,  $H_3=120\text{ nm}$ ,  $H=H_1=H_2$ , and 2 pairs of alternately dielectric layers; (b) far-field intensity varying with angle under different pairs of alternately dielectric layers when  $P=500\text{ nm}$ ; (c) far-field intensity varying with angle under different pairs of alternately dielectric layers when  $P=550\text{ nm}$ ; (d) far-field intensity varying with angle under different pairs of alternately dielectric layers when  $P=600\text{ nm}$ ; (e) far-field intensity varying with angle under different pairs of alternately dielectric layers when  $P=650\text{ nm}$ ; (f) comparison of optimization results in different periods, other parameters are  $W=160\text{ nm}$ ,  $H_3=120\text{ nm}$ ,  $H=H_1=H_2=80\text{ nm}$ , and 2 pairs of alternately dielectric layers

$\text{SiO}_2$  的厚度一致,即  $H=H_1=H_2$ 。由图 2 可以看出,不同介质层厚度中心 0 级衍射强度始终最大,且随着厚度的增大,呈现出先增大后变小的振荡现象。为获取最优值,即在保证 0 级强度较大的同时还需要次级衍射强度够小,当  $H=80\text{ nm}$  时,远场辐射大部分能量 ( $>75\%$ ) 控制在  $-10^\circ\sim 10^\circ$  内。由此可见,所提全介质纳米结构可以在垂直器件表面方向上增强出光。最终,将介质传输层厚度设定为  $H=80\text{ nm}$ 。

图 2(b)~(e) 给出的是不同周期 ( $P$ ) 的介质光栅

在不同对数的交错介质层 ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ) 下的远场辐射强度随角度的变化情况。当交错介质层只有一对时,无论周期为多少,定向辐射效应均不明显,并且在较大周期(周期大于波长)时次级衍射强度较大,当周期接近或者小于波长时,中心强度最大。对同一周期情况进行研究,随着交错介质层对数的增加,中心强度均呈现先增大后减小的趋势,这也符合法布里-珀罗 (F-P) 谐振腔变化规律。对于周期 ( $P$  为  $600\text{ nm}$  或者  $650\text{ nm}$ ) 大于波长的情况,交错介质层对数在三对以



上时才能满足中心强度最大,且次级强度较小。当交错介质层达到四层时,虽然辐射能量主要集中在中心,但是最大值却在减小。当周期( $P$ 为 550 nm 或者 500 nm)接近或小于波长时,交错介质层对数为两对时便可实现上述结果。图 2(f)是每个周期取最优值时远场随辐射角度的强度变化情况。综合考虑器件特性与工艺制备难度,最终选取周期  $P$  为 550 nm。

图 3 是在不同  $\text{TiO}_2$  介质纳米光栅高度  $H_3$  和线宽  $W$  下远场辐射的强度变化情况。图 3(a)给出的是纳米光栅高度的优化情况,中心辐射强度的变化规律与

介质传输层变化规律一致,光栅层高度可等效为一层介质过渡层,也符合 F-P 谐振腔变化规律。根据计算结果,当  $H=120$  nm 时,中心辐射强度最大且次级衍射较弱。图 3(b)是不同线宽下远场辐射强度随角度的变化情况。可以看出,线宽是影响光栅衍射级次和衍射角度的重要参量,随着线宽的增大,衍射级次在减少,次级衍射变强且衍射角度变大。当线宽在 160~200 nm 之间时,中心零级衍射强度大且次级衍射强度相对较小。因此,本文选取  $W$  为 160 nm。

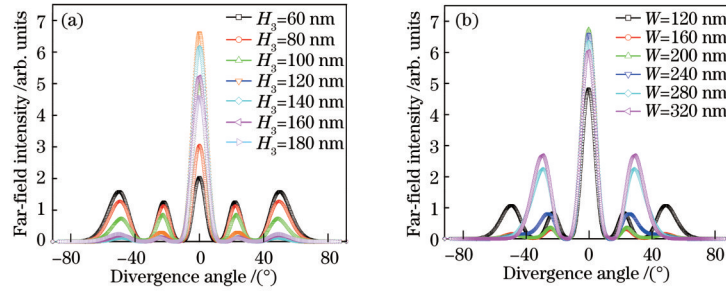


图 3  $\text{TiO}_2$  介质纳米光栅参数优化。(a)不同  $H_3$  下远场辐射强度的变化情况;(b)不同  $W$  下远场辐射强度的变化情况

Fig. 3 Parameter optimization of  $\text{TiO}_2$  dielectric nano-grating. (a) Variation of far-field intensity under different  $H_3$ ; (b) variation of far-field intensity under different  $W$

为进一步研究 LED 发光器件在有无  $\text{TiO}_2$  纳米光栅时的角谱特征,数值计算了波长为 533 nm 处电场强度的空间分布,比较了三种结构器件,即无结构 LED

器件、集成有一维光子晶体结构的 LED 器件和全介质纳米结构(纳米光栅/一维光子晶体结构)LED 器件。与图 4(a)中无结构 LED 器件的电场分布相比,当偏振

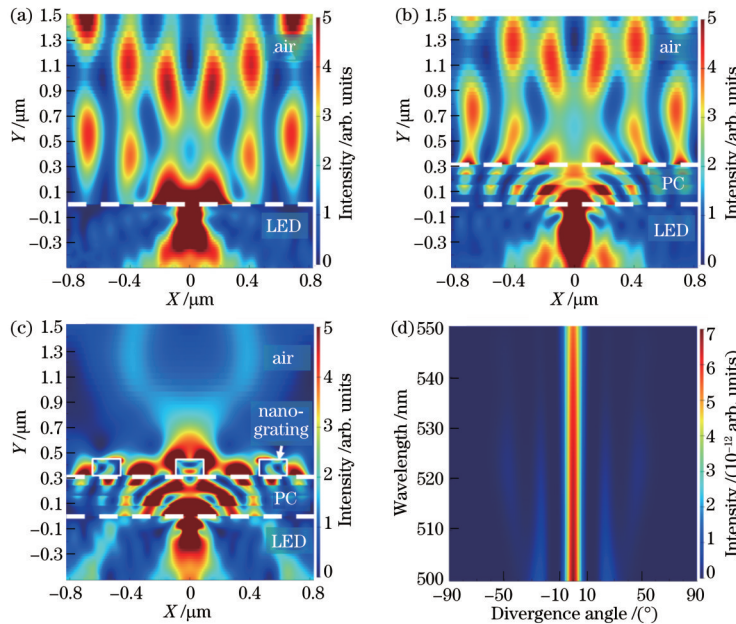


图 4 具有不同结构的偏振 LED 的电场强度空间分布。(a)原始 LED 器件的电场强度空间分布;(b)覆盖有两对介质传输层组成的光子晶体结构的 LED 器件的电场强度空间分布;(c)集成有全介质纳米结构(纳米光栅/一维光子晶体复合结构)的 LED 器件的电场强度空间分布;(d)全介质纳米结构器件在绿光波长范围(500~550 nm)内的电场强度远场空间分布情况

Fig. 4 Spatial distribution of electric field intensity of polarized LED with different structures. (a) spatial distribution of electric field intensity of bare LED device; (b) spatial distribution of electric field intensity of LED device covered with photonic crystal structure which composed of two pairs of dielectric transmission layers; (c) spatial distribution of electric field intensity of LED device with all-dielectric nanostructure (nano-grating/one-dimensional photonic crystal composite structure); (d) far-field spatial distribution of electric field intensity of all-dielectric nanostructure device in green wavelength range (500~550 nm)

LED 出射的光经过一维光子晶体结构时,在光子晶体中产生的 Bloch 波发生多重 Bragg 散射并且在界面处形成了表面波<sup>[23-24]</sup>,如图 4(b)所示。当顶部引入介质纳米光栅层时,全电介质超构光栅通过共振散射特性与光栅固有的衍射性质将光子晶体表面波耦合到多级衍射远场光的透射通道上,如图 4(c)所示。通过介质光栅纳米结构的米氏散射模式<sup>[15]</sup>对光栅各衍射级选择性增强,通过特定优化后的结构参数便可以实现高效的单级(0 级)衍射,进而实现光束的准直功能。

图 4(d)为最终优化后的全介质光栅纳米结构器件在绿光波长范围(500~550 nm)内的电场强度远场空间分布。约 77% 的光谱辐射能集中在 $-6^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 的角度范围内。采用优化结构集成的偏振出光 LED 在垂直方向上的峰值光强是初始器件的 6.6 倍,总出光效率大于 81.8%。仿真结果表明,集成有全介电纳米结构(纳米光栅/一维光子晶体)的偏振 LED 实现了准直功能。

## 4 结 论

提出一种集成在偏振 LED 顶部的全介电纳米结构,数值计算结果表明其可实现绿光宽波段光束定向辐射的功能,大大提高偏振出光 LED 的效率。所设计的全介质纳米结构主要包括一维光子晶体和亚波长介质超构光栅,通过组合的方式在理论上实现了偏振 LED 发光器件的有源集成,突破了传统光学元件“单一”的局限,实现了传统上需要偏振发光器件与光学透镜元件组合的光学系统才能够获得的有源发光器件的准直功能。计算结果表明,所设计的全介质纳米结构可以将绿光波段偏振 LED 出光远场辐射角度控制在 $-6^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 范围内,出光效率大于 77%。在垂直方向上的远场辐射峰值强度相较无结构 LED 提高了 6.6 倍。该纳米结构制备简单,工艺容差大,且具有较高的耦合效率,相关研究结果将为用于新型显示技术和成像领域中的具有准直功能的高效偏振 LED 提供理论指导和参考。

## 参 考 文 献

- [1] Pimputkar S, Speck J S, DenBaars S P, et al. Prospects for LED lighting[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(4): 180-182.
- [2] Pust P, Schmidt P J, Schnick W. A revolution in lighting[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(5): 454-458.
- [3] 曹慧, 郑喜凤, 汪洋, 等. 超高清超高分辨率大尺寸 LED 显示器[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(4): 566-574.  
Cao H, Zheng X F, Wang Y, et al. Ultra high definition ultra-high resolution large size LED display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(4): 566-574.
- [4] Zeng N, Jiang X Y, Gao Q, et al. Linear polarization difference imaging and its potential applications[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(35): 6734-6739.
- [5] Athanasiou M, Smith R M, Hou Y, et al. Enhanced polarization of (11-22) semi-polar InGa<sub>N</sub> nanorod array

- structure[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(14): 141110.
- [6] Wang M, Xu F Y, Lin Y, et al. Metasurface integrated high energy efficient and high linearly polarized InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> light emitting diode[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(26): 9104-9111.
- [7] Lozano G, Louwers D J, Rodríguez S R, et al. Plasmonics for solid-state lighting: enhanced excitation and directional emission of highly efficient light sources[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(5): e66.
- [8] Mühlischlegel P, Eisler H J, Martin O J F, et al. Resonant optical antennas[J]. *Science*, 2005, 308(5728): 1607-1609.
- [9] Yi J M, Cuche A, Devaux E, et al. Beaming visible light with a plasmonic aperture antenna[J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(4): 365-370.
- [10] Okamoto K, Niki I, Shvartser A, et al. Surface-plasmon-enhanced light emitters based on InGa<sub>N</sub> quantum wells[J]. *Nature Materials*, 2004, 3(9): 601-605.
- [11] DiMaria J, Dimakis E, Moustakas T D, et al. Plasmonic collimation and beaming from LED active materials[C]// *CLEO: 2013, June 9-14, 2013, San Jose, California*. Washington, D.C.: OSA, 2013: CF2E.2.
- [12] Li Z F, Aydin K, Ozbay E. Highly directional emission from photonic crystals with a wide bandwidth[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(12): 121105.
- [13] Kramper P, Agio M, Soukoulis C M, et al. Highly directional emission from photonic crystal waveguides of subwavelength width[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(11): 113903.
- [14] Moreno E, García-Vidal F J, Martín-Moreno L. Enhanced transmission and beaming of light via photonic crystal surface modes[J]. *Physical Review B*, 2004, 69(12): 121402.
- [15] 邓子岚, 李枫竣, 史坦, 等. 超构光栅调控衍射光场的物理及应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823011.  
Deng Z L, Li F J, Shi T, et al. Metagratings for controlling diffractive optical fields: physics and applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823011.
- [16] 张锦龙, 史帅凯, 焦宏飞, 等. 层叠亚波长光栅中的模式匹配分析法[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1205001.  
Zhang J L, Shi S K, Jiao H F, et al. Analytical mode matching in stacked subwavelength gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1205001.
- [17] 魏张帆, 胡敬佩, 张冲, 等. 基于全介质共振域光栅的偏振器件设计与制备[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1201005.  
Wei Z F, Hu J P, Zhang C, et al. Design and fabrication of polarizer based on all-dielectric resonance-domain grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1201005.
- [18] 刘萌, 郑焯, 刘文斐, 等. 基于亚波长线光栅的垂直光栅耦合器的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1705002.  
Liu M, Zheng X, Liu W F, et al. Design of vertical grating coupler based on sub-wavelength line gratings[J].

- Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1705002.
- [19] Deng Z L, Ye X, Qiu H Y, et al. Full-visible transmissive metagratings with large angle/wavelength/polarization tolerance[J]. Nanoscale, 2020, 12(40): 20604-20609.
- [20] Brinkley S E, Lin Y D, Chakraborty A, et al. Polarized spontaneous emission from blue-green *m*-plane GaN-based light emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(1): 011110.
- [21] Tsujimura H, Nakagawa S, Okamoto K, et al. Characteristics of polarized electroluminescence from *m*-plane InGaN-based light emitting diodes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(42): L1010-L1012.
- [22] Li H J, Zhang H J, Li P P, et al. Development of efficient semipolar InGaN long wavelength light-emitting diodes and blue laser diodes grown on a high quality semipolar GaN/sapphire template[J]. Journal of Physics: Photonics, 2020, 2(3): 031003.
- [23] 陈奕辛, 付秀华, 张功, 等. 基于一维光子晶体能带结构的陷波滤光片设计方法[J]. 光子学报, 2021, 50(11): 1131002.
- Chen Y X, Fu X H, Zhang G, et al. Design method of Notch filter based on one-dimensional photonic crystal band structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11): 1131002.
- [24] Morrison S K, Kivshar Y S. Engineering of directional emission from photonic-crystal waveguides[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(8): 081110.