

文章编号: 1000-7032(2025)02-0326-08

基于集成氮化硅超表面 VCSEL 的涡旋光输出

牛 昊^{1,2,3}, 王永丽³, 姜增璇³, 李川川³, 魏志鹏^{1*}, 宋国峰^{3*}

(1. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 中山研究院, 广东 中山 528437;

3. 中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室, 北京 100083)

摘要: 集成光子器件技术的最新进展充分满足了市场对于紧凑型、高效光电系统的需求, 同时也有力地促进了光学超表面技术的发展。其中, 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 与超表面的集成, 可生成具有特定波前的矢量光束, 极大地增强光电系统的功能性和灵活性。本文设计了基于 Si_3N_4 纳米天线阵列超表面的 850 nm VCSEL, 通过对纳米天线结构参数的调控, 实现了超过 2π 的相位覆盖, 并采用 1 阶和 2 阶涡旋相位板, 成功产生了不同阶数的涡旋光束。这一成果为光学超表面调控 VCSEL 光场技术提供了新思路。

关键词: 超表面; 涡旋光束; 垂直腔面发射激光器; 集成光子器件

中图分类号: O436; TN248.4 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240300 CSTR: 32170.14.CJL.20240300

Vortex Light Output Based on Integrated Silicon Nitride Metasurface VCSEL

NIU Hao^{1,2,3}, WANG Yongli³, JIANG Zengxuan³, LI Chuanchuan³,

WEI Zhipeng^{1*}, SONG Guofeng^{3*}

(1. State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528437, China;

3. Laboratory of Nano-Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zpweicust@126.com; sgf@semi.ac.cn

Abstract: The latest development of integrated photonic device technology fully meets the market demand for compact and efficient optoelectronic systems, and also effectively promotes the development of optical metasurface technology. Among them, the integration of vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) and metasurface can generate vector beams with specific wavefronts, which greatly enhances the functionality and flexibility of optoelectronic systems. In this paper, an 850 nm VCSEL based on Si_3N_4 nanoantenna array metasurface is designed. By adjusting the structural parameters of the nanoantenna, more than 2π phase coverage is achieved, and vortex beams of different orders are successfully generated by using first-order and second-order vortex phase plates. This result provides a new idea for the optical metasurface control of VCSEL light field technology.

Key words: metasurface; vortex beam; vertical cavity surface emitting laser; integrated photonic devices

收稿日期: 2024-11-14; 修订日期: 2024-12-02

基金项目: 中华人民共和国科学技术部(2023YFB4604400); 国家自然科学基金(12074045, 62027820, 61904017); 吉林省自然科学基金(20230101352JC); 国家“111”计划项目(D17017)

Supported by Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China(2023YFB4604400); National Natural Science Foundation of China(12074045, 62027820, 61904017); Natural Science Foundation of Jilin Province(20230101352JC); the “111” Project of China(D17017)

1 引言

随着对光学集成度需求的提升,传统光学元件已无法满足现代应用的性能要求。光学超表面技术通过在亚波长尺度上运用微纳结构单元对电磁波进行高效调控,展现了其轻薄、高集成度和设计灵活等优势。该技术能够实现成像、光束控制、偏振控制及滤波等关键功能,为光学系统的设计和制造带来了革命性的变革^[1-6]。光学超表面的这些优势不仅满足了对高性能光电系统的需求,而且为光电集成技术的未来发展指明了方向,预示着在光通信、传感、成像等多个领域存在巨大的应用潜力。

近年来,垂直腔面发射激光器(VCSEL)因其低阈值电流、高温稳定性以及易于构建二维激光阵列等独特优势,在集成光子学领域受到广泛关注^[7-11]。VCSEL的法向发射特性赋予了其高度的可扩展性,并且与晶圆级制造工艺的兼容性良好,这使得VCSEL在大规模生产时成本较低,从而加速了集成光子器件的商业化进程^[12]。

VCSEL与特定超表面集成后,其发出的圆对称光束可均匀地照射到集成的螺旋相位板(SPPs)上,进而有效地生成携带轨道角动量(OAM)的涡旋光束^[13-14],并可以在亚波长空间分辨率调制光的相位、振幅和偏振^[15]。涡旋光束展现出诸多显著优势,其OAM状态具有正交性且拓扑电荷数无限,能够极大地提升光通信系统的容量和频谱效率^[16-17];同时,高纯度和精确的相位控制为量子计算和量子密钥分发等应用提供了理想的光子态,显著提高了光数据存储的存储密度^[18-23]。因此,这些研究结果可以作为VCSEL波前结构的一种通用方案,在振幅、相位和极化状态上具有完全的综合可控性。

本文利用光学超表面技术与VCSEL集成,实现了从 $0 \sim 2\pi$ 的相位覆盖,成功生成携带轨道角动量的涡旋光束,为光通信和量子计算等领域提供了创新的解决方案。在本研究中,我们运用时域有限差分法(finite difference time-domain, FDTD)进行模拟计算。通过对 Si_3N_4 超表面的纳米天线单元结构进行扫描和优化,成功地实现了 $0 \sim 2\pi$ 的相位覆盖。基于这一结果,我们设计了1阶和2阶涡旋相位调制超表面。随后,我们将设计的涡旋相位调制超表面与工作在850 nm波段的砷化镓(GaAs)基VCSEL相结合,成功开发出一

种新型集成光电子器件。通过这种集成,成功产生了1阶和2阶涡旋光束,并展示了VCSEL与超表面集成技术的巨大潜力。这一成果不仅证明了本文技术路线的可行性,也为未来集成光子器件的设计和开发提供了新的思路和方向。

2 理论分析

2.1 斯涅尔定律

法国科学家 Pierre de Fermat 于 1662 年首次提出费马原理。该原理表明,光线在传播过程中会选取耗时最短的路径,且这些路径所用时间相同,光程相等^[24]:

$$\partial L = \partial \int_A^B n(x) dx = 0, \quad (1)$$

其中,光线在均匀介质中的传播距离为 L ;路径的坐标参量为 x ,在 x 点处的折射率为 $n(x)$ 。

图1为狭义斯涅尔定律的光路图,可借助其解释反射定律与折射定律。

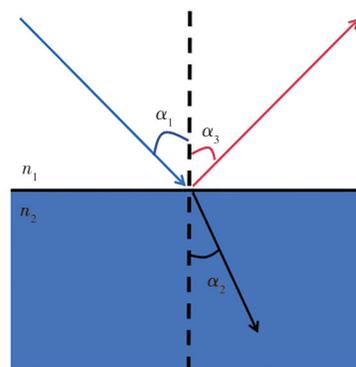


图1 狭义斯涅尔定律的光路图

Fig. 1 Optical path diagram of Snell's law in a narrow sense

由光的反射定律可知:

$$\alpha_1 = \alpha_3, \quad (2)$$

费马原理能够推导出斯涅尔定律的狭义形式(即折射定律):

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2, \quad (3)$$

斯涅尔定律对光线在不同折射率介质间传播时路径的偏转现象进行了描述。然而,由于超表面的介质折射率存在差异,会在界面处产生相位突变,这一现象无法通过传统斯涅尔定律进行充分解释。基于此,Capasso研究小组Yu等首次提出了广义斯涅尔定律,并对超表面的相位调控机制进行了阐释,如图2所示^[25]。

图2中,上、下介质的折射率分别为 n_1 和 n_2 。从A点出发的光线,沿着两条不同的路径抵达B点。依据费马原理,这两条路径的传播时间相同。

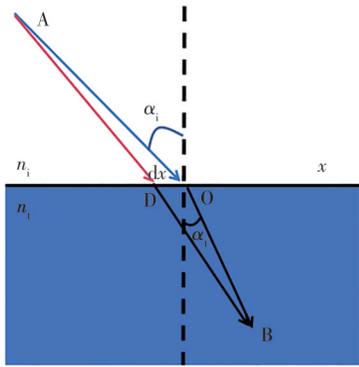


图2 广义斯涅尔定律的光路图

Fig. 2 Optical path diagram of generalized Snell's law

因此,路径 AOB 与路径 ADB 的光程长度相等,相位变化一致。由此可推导出以下公式:

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} n_i \sin \alpha_i dx + \phi + d\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_i \sin \alpha_i dx + \phi, \quad (4)$$

其中, $\frac{2\pi}{\lambda_0}$ 代表真空中的波矢值, λ_0 是光在真空中的波长, dx 表示在界面上两个无限接近的入射点之间的距离,这两条光路在分界面处的相位突变分别为 ϕ 和 $\phi + d\phi$ 。基于这些参数,可以推导出广义斯涅尔定律的公式为:

$$n_i \sin \alpha_i - n_i \sin \alpha_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\phi}{dx}, \quad (5)$$

依据公式(5),只需赋予一个恰当的相位梯度 $\frac{d\phi}{dx}$, 即可实现对折射光线方向的精确控制^[26]。

2.2 传播相位法

超表面生成涡旋光束的关键在于如何有效地引入螺旋相位因子 $e^{il\theta}$, 其中 l 是拓扑电荷, θ 是方位角。根据超表面的相位控制理论,主要的控制方法包括传播相位控制和几何相位控制。在具体操作中,形成涡旋光束的常见技术途径包括几何相位法、传播相位法以及结合二者的混合相位法^[27]。

本项研究专注于传播相位法的研究,其基本原理是通过操控电磁波在传播过程中的光程差,实现对光波相位的精确控制^[28]。依据电磁波理论,在光线于均匀介质中传播的情况下,设该均匀介质的折射率为 n , 入射波长为 λ , 光线在该均匀介质中的传播距离为 d , 波矢为 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 。电磁波的传播相位为:

$$\varphi = nk_0 d, \quad (6)$$

对公式(6)进行分析可知,电磁波的传播相位能够通过调整传播距离或改变介质的折射率来控制。在传统光学元件当中,由于光学材料的折射率相对较低,若要实现较大的相位差,通常需要较厚的

材料厚度 d , 所以通过改变传播距离来操控相位。然而,对于大多数超表面而言,为了减小光学元件的尺寸,主要采取的策略是调整介质的折射率,通过直接或间接的方式改变等效折射率来实现相位控制。这种方法不但大幅减小了器件的厚度,还为灵活调控电磁波相位提供了可能。

2.3 等效介质理论

等效介质理论模型主要用于阐释复合材料的整体特性,通过计算各个构成部分来确定复合材料的性质^[29]。运用这一理论,能够对纳米结构、基底以及包覆层的材料特性进行预测,进而确定整个复合结构的综合特性。

根据等效介质理论,纳米天线单元的等效折射率与其占空比、高度和周期等参数密切相关。根据公式(6),如果超表面的其他关键参数保持不变,那么相位的突变将主要取决于介质的有效折射率。将结构的包覆层假定为空气($n_{\text{air}} = 1$)。基于此,可以推导出一阶等效折射率的公式:

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{(1-D)n_{\text{cladding}}^2 + Dn_{\text{substrate}}^2}, \quad (7)$$

其中, D 表示占空比因子, n_{eff} 表示介质的等效折射率, $n_{\text{substrate}}$ 为基底折射率, n_{cladding} 是包覆层介质折射率。通过分析纳米天线单元的基底和包覆层的占空比因子,能够计算出纳米天线单元的折射率,并确定相位。以圆柱形纳米天线单元为例,若仅考虑材料的等效折射率,可以推导出如下公式:

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{(\pi R^2 n_{\text{substrate}}^2 + (p^2 - \pi R^2) n_{\text{cladding}}^2) / p^2}, \quad (8)$$

其中, p 代表晶格周期, R 为纳米天线单元的半径。依据公式(8),若材料的晶格周期 p 保持不变,等效折射率 n_{eff} 仅与半径 R 相关联。因此,通过调整半径 R 以改变等效介电常数,能够直接操控单周期纳米结构的相位^[30]。

3 Si₃N₄超表面设计及 VCSEL 集成

3.1 纳米天线单元设计

本文所设计的光电子器件工作于近红外波段 850 nm, 在这一波段, Si₃N₄ 材料展现了折射率可调节、低损耗的传输特性,并且拥有出色的热稳定性以及易于加工等诸多优势^[31]。研究中使用了时域有限差分法(Finite difference time-domain, FDTD)仿真软件进行模拟计算,并在 X、Y、Z 三个方向上应用了完美匹配层(PML层)^[32]。模拟中所用的纳米天线单元结构如图 3(a)所示,为了确保传播相位范围能够覆盖 0~2 π 的范围,设计了上层为

900 nm 高的 Si₃N₄ 纳米天线柱, 下层为 200 nm 厚的 Si₃N₄ 衬底。图 3 (b) 展示了在 X 线偏振光 (XPL) 照射下, 单个纳米天线单元的电磁散射特

性, 通过改变纳米天线单元的长 a 和宽 b 的参数, 得到了相位变化的数据。参数化扫描的范围为 10 ~ 590 nm, 步长为 10 nm, 周期 $p=600$ nm。

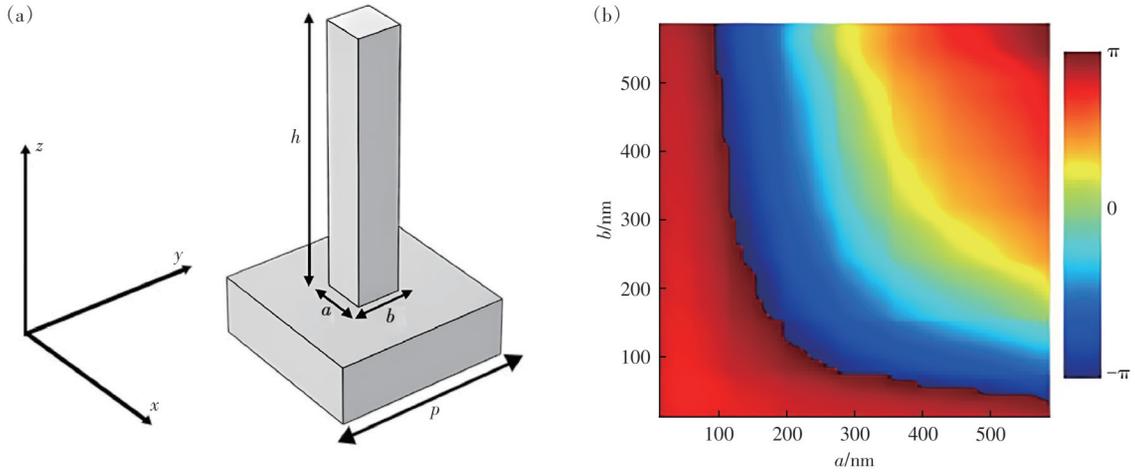


图 3 (a) Si₃N₄ 纳米天线柱三维图; (b) 单个纳米天线柱散射相位随 a 、 b 变化

Fig.3 (a) Three-dimensional figure of Si₃N₄ nano-antenna pillar. (b) The change of scattering phase of nano-antenna column with a and b

依据图 3 (b), 我们可以获取不同参数 (a, b) 对应的出射光相位信息。为了确保设计的涡旋相位板能够成功地应用于 VCSEL 激光器, 必须确保纳米天线柱的边长相等, 以实现偏振无关的特性, 即在 XLP 与 YLP 入射时出射相位相同。

如图 4 (a) 所示, 首先选取 8 个天线对 2π 相位突变进行覆盖, 相邻天线的相位差间隔约为 $\pi/4$, 以此实现 1 阶涡旋光束。其中各纳米天线柱的边长分别为 $A_1=140$ nm, $A_2=190$ nm, $A_3=240$ nm, $A_4=270$ nm, $A_5=310$ nm, $A_6=350$ nm, $A_7=410$ nm, $A_8=500$ nm。如图 4 (b) 所示, 为达成 2 阶涡旋光束, 选取 A_2, A_4, A_6, A_8 4 个天线单元, 它们之间的相邻相位差约为 $\pi/2$ 。利用这一组天线实现了 2π 相位突变, 并重复利用以实现另一组 2π 相位突变。为了验证结果是否正确, 再次模拟计算了它们的相位分布, 如图 4 (c) 所示。可以看出, 它们的相位确实覆盖了 2π , 符合超表面的设计原理。

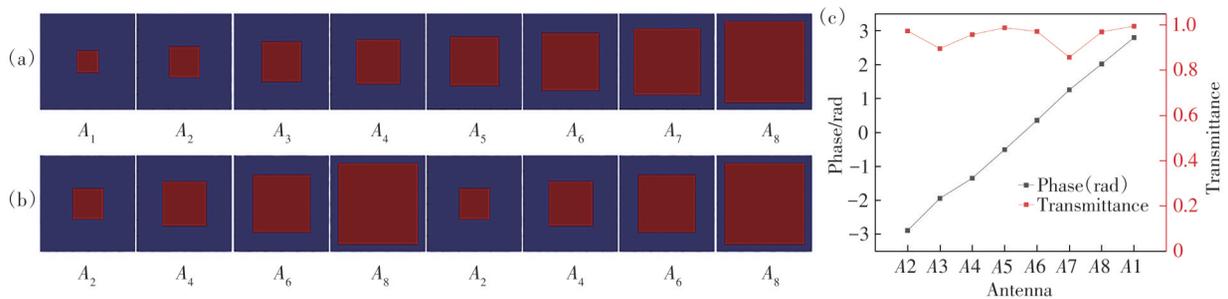


图 4 (a) 1 阶涡旋光束相位阵列; (b) 2 阶涡旋光束相位阵列; (c) 纳米天线柱相位-透射率图

Fig.4 (a) 1st-order vortex beam phase array. (b) 2nd-order vortex beam phase array. (c) Nano-antenna column phase-transmittance diagram

3.2 涡旋相位板设计

涡旋光束凭借其独特的涡旋波阵面以及携带的轨道角动量 (OAM), 在光通信及多个相关领域中展现出极为显著的优势。理论上, 涡旋光束的相位由轨道角动量因子 $e^{il\theta}$ 所控制, 其中 l 代表 OAM 状态的拓扑电荷, θ 是方位角^[33-34]。当 $l = 1$

时, 在一个波长的传输距离上, 波前环绕中心旋转一周, 相位改变 2π 。如图 5 (a) 所示, 涡旋相位板面积为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$, 天线单元为 12×12 个。将整个相位板沿角向分为 8 个象限, 将图 4 (a) 中的天线 $A_1 \sim A_8$ 逆时针排布, 相邻两个象限相位差为 $\pi/4$ 。当 $l = 2$ 时, 按照图 4 (b) 中的天线排

布,相邻两个天线相位差为 $\pi/2$,如图 5(d)所示。用 850 nm 的 XPL 入射到涡旋相位板中,模拟得到的涡旋光出光面及远场(5λ)处的相位分布如

图 5(b)~(c)、5(e)~(f)所示。其中,5(b)~(c)、5(e)~(f)分别为 1 阶和 2 阶对应的相位分布图。

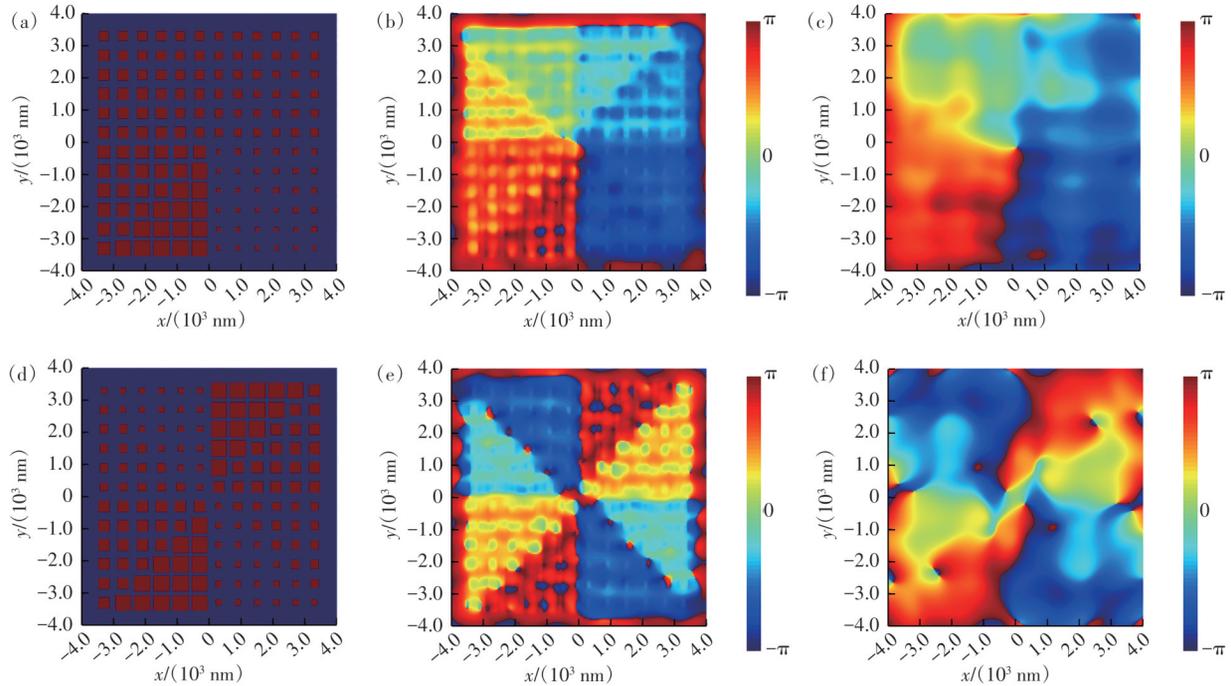


图 5 (a)拓扑荷 $l = 1$ 下的涡旋相位板;(b)拓扑荷 $l = 1$ 下的出光面相位分布;(c)拓扑荷 $l = 1$ 下的远场涡旋相位;(d)拓扑荷 $l = 2$ 下的涡旋相位板;(e)拓扑荷 $l = 2$ 下的出光面相位分布;(f)拓扑荷 $l = 2$ 下的远场涡旋相位

Fig. 5 (a) Vortex phase plate under topological charge $l = 1$. (b) Phase distribution of output light surface under topological charge $l = 1$. (c) Vortex phase of far field under topological charge $l = 1$. (d) Vortex phase plate under topological charge $l = 2$. (e) Phase distribution of output light surface under topological charge $l = 2$. (f) Vortex phase of far field under topological charge $l = 2$

3.3 集成 Si_3N_4 超表面 VCSEL 设计与分析

本研究中所使用的 VCSEL 激光器由以下部分组成:底部分布式布拉格反射镜(n-DBRs),该部分由 40 对交替堆叠的 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 和 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 层构成;一个包含量子阱的有源区;半径为 $3\ \mu\text{m}$ 的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 氧化层;以及顶部(p-DBRs),由半径为 $8\ \mu\text{m}$ 的 22 对 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 和 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 层材料组成。此外,在顶部 DBRs 区

域,通过将涡旋相位板(图 5(a)、(d))与 VCSEL 激光器相结合,形成了一种能够产生涡旋光束的特殊结构,其 FDTD 仿真结构如图 6 所示。

该 VCSEL 激光器通过集成涡旋相位板,具备了发射携带轨道角动量(OAM)的涡旋光束的能力。利用 FDTD 模拟方法,我们成功获得了其在远场区域(5λ)处的电场分布和相位特性,这些结果在图 7 中得到了清晰的展示。

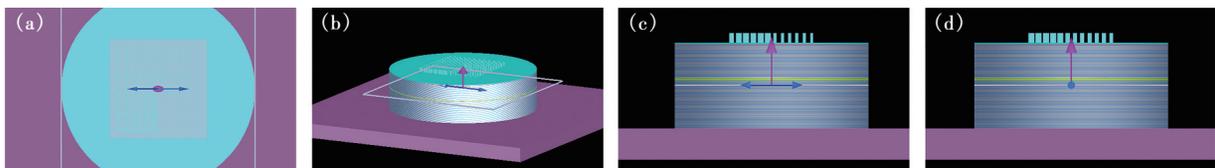


图 6 (a)XY 视图;(b)透视图;(c)XZ 视图;(d)YZ 视图

Fig. 6 (a) XY view. (b) Perspective view. (c) XZ view. (d) YZ view

本文所采用的 VCSEL 通过精心设计的涡旋相位板(图 5(a)、(d)),成功实现了发射携带轨道角动量的涡旋光束。如图 7 所示,电场分布图(图 7(a)、(c))揭示了光束的强度模式,其中心区域呈现出明显的

暗场,即涡旋的中心强度为零,表明光束在此处的光强最低。相位图(图 7(b)、(d))则直观地展示了光束的涡旋相位结构,这是涡旋光束特有的相位分布,其拓扑荷数直接关联着光束携带的轨道角动量。特别

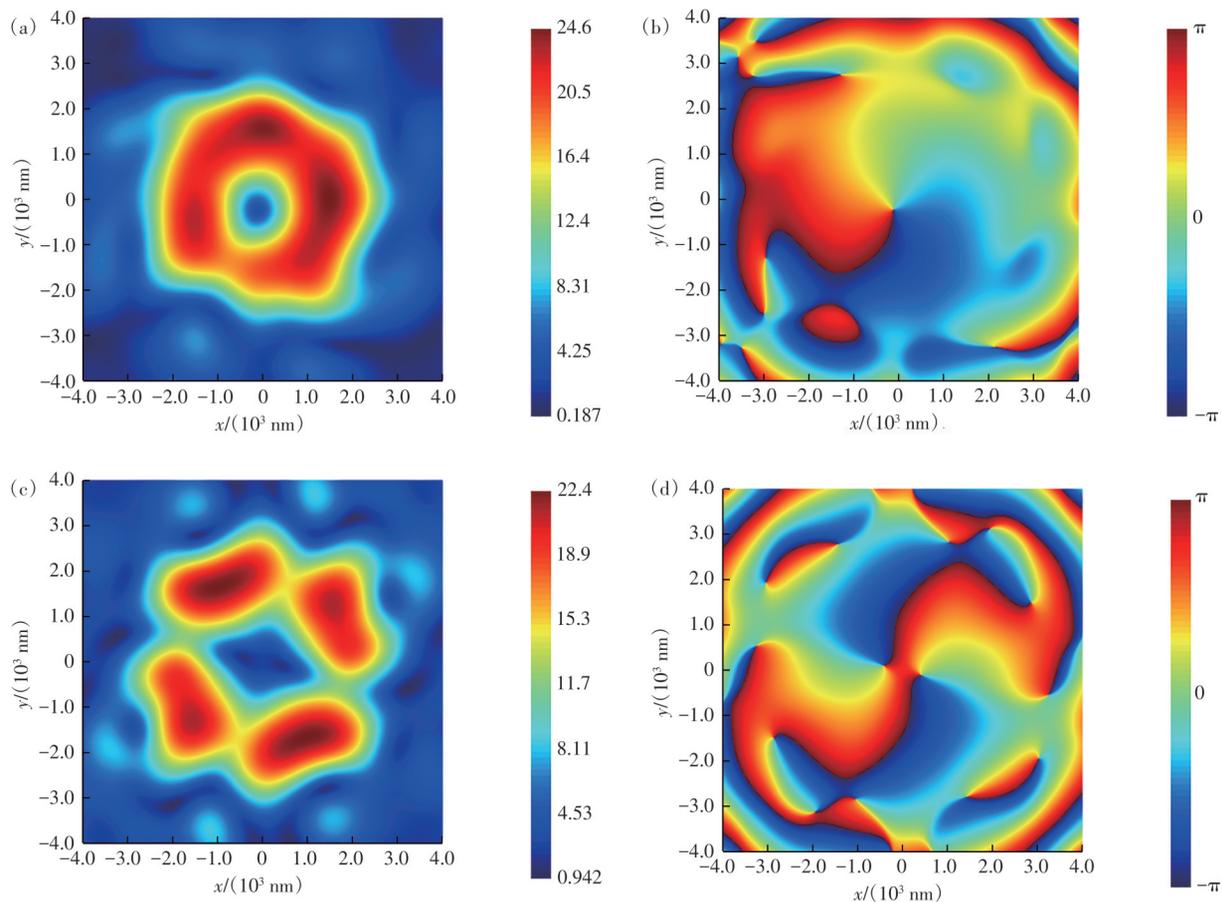


图7 (a)拓扑荷 $l = 1$ 下的远场电场图;(b)拓扑荷 $l = 1$ 下的远场涡旋相位;(c)拓扑荷 $l = 2$ 下的远场电场图;(d)拓扑荷 $l = 2$ 下的远场涡旋相位

Fig. 7 (a)The far-field electric field with topological charge $l = 1$. (b)The far-field vortex phase with topological charge $l = 1$. (c)The far-field electric field with topological charge $l = 2$. (d)The far-field vortex phase with topological charge $l = 2$

是对于2阶涡旋光束,我们注意到其光斑尺寸相较于1阶光斑更大,且相位分布的旋转中心发生了分离,这可能是由于2阶光束阵列的非连续性所致。

4 结 论

本研究提出了一种创新方案,利用方柱形 Si_3N_4 天线阵列超表面,通过调整天线尺寸,实现了 $0 \sim 2\pi$ 以及 $0 \sim 4\pi$ 的相位覆盖。并针对拓扑荷 l 分别为1和2的情况,设计了相应的1阶和2阶涡旋相位板,将这些相位板与垂直腔面发射激光器(VCSEL)相结合,成功产生了1阶和2阶的

涡旋光束。通过精细调整相位板的设计参数,可以精确控制光束的轨道角动量,以满足特定应用场景的需求。这些模拟数据为实验中的光束整形和优化提供了指导,有助于实现更高质量的光束和更强的光束稳定性。我们预见,这种设计将为量子通信、高密度数据存储、生物医学成像以及光学微操控等领域提供有力的技术支持。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240300>

参 考 文 献:

- [1] 王波, 张岩. 太赫兹超材料和超表面器件的研发与应用 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(1): 1-12.
 WANG B, ZHANG Y. Design and applications of THz metamaterials and metasurfaces [J]. *J. Terahertz Sci. Electron. Inf. Technol.*, 2015, 13(1): 1-12. (in Chinese)
- [2] CHEN H T, TAYLOR A J, YU N F. A review of metasurfaces: physics and applications [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2016,

- 79(7): 076401.
- [3] KIM D U, PARK Y J, KIM D Y, *et al.* Programmable photonic arrays based on microelectromechanical elements with femtowatt-level standby power consumption [J]. *Nat. Photonics*, 2023, 17(12): 1089-1096.
- [4] HE T, MA H, WANG Z, *et al.* On-chip optoelectronic logic gates operating in the telecom band [J]. *Nat. Photonics*, 2024, 18(1): 60-67.
- [5] CHEN Y T, NAZHAMAITI M, XU H, *et al.* All-analog photoelectronic chip for high-speed vision tasks [J]. *Nature*, 2023, 623(7985): 48-57.
- [6] XIAO Z A, LIU W X, XU S Y, *et al.* Recent progress in silicon-based photonic integrated circuits and emerging applications [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(20): 2301028.
- [7] QIU P P, WU B, FU P, *et al.* Fabrication and characterization of low-threshold single fundamental mode VCSELs with dielectric DBR mirror [J]. *IEEE Photonics J.*, 2021, 13(4): 1500106.
- [8] MOON S, YUN Y, KWON O, *et al.* High-performance thin-film VCSELs integrated with a copper-plated heatsink [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2023, 10(18): 2300191.
- [9] LARSSON A. Advances in VCSELs for communication and sensing [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, 17(6): 1552-1567.
- [10] 赵英杰, 李轶华, 李林, 等. VCSEL的研究进展及应用前景 [J]. 长春理工大学学报, 2005, 28(1): 23-26.
ZHAO Y J, LI Y H, LI L, *et al.* The research progress on VCSELs and their possible applications [J]. *J. Changchun Univ. Sci. Technol.*, 2005, 28(1): 23-26. (in Chinese)
- [11] DONG Y B, PAN G Z, XUN M, *et al.* Nanoprinted diffractive layer integrated vertical-cavity surface-emitting vortex lasers with scalable topological charge [J]. *Nano Lett.*, 2023, 23(19): 9096-9104.
- [12] GU M, DONG Y B, YU H Y, *et al.* Perspective on 3D vertically-integrated photonic neural networks based on VCSEL arrays [J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(5): 827-832.
- [13] PAN G Z, XUN M, ZHOU X L, *et al.* Harnessing the capabilities of VCSELs: unlocking the potential for advanced integrated photonic devices and systems [J]. *Light Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 229.
- [14] LI H L, PHILLIPS D B, WANG X Y, *et al.* Orbital angular momentum vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Optica*, 2015, 2(6): 547-552.
- [15] NI P N, FU P, CHEN P P, *et al.* Spin-decoupling of vertical cavity surface-emitting lasers with complete phase modulation using on-chip integrated Jones matrix metasurfaces [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 7795.
- [16] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. *Adv. Opt. Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [17] DONG X W, BO X M, RU J H, *et al.* Arbitrary topological charge vortex beams from carbon dots random lasers [J]. *Rare Met.*, 2024, 43(8): 3844-3853.
- [18] WILLNER A E, PANG K, SONG H, *et al.* Orbital angular momentum of light for communications [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2021, 8(4): 041312.
- [19] FANG X Y, REN H R, GU M. Orbital angular momentum holography for high-security encryption [J]. *Nat. Photonics*, 2020, 14(2): 102-108.
- [20] REN H R, FANG X Y, JANG J, *et al.* Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2020, 15(11): 948-955.
- [21] OUYANG X, XU Y, XIAN M C, *et al.* Synthetic helical dichroism for six-dimensional optical orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nat. Photonics*, 2021, 15(12): 901-907.
- [22] WANG H T, WANG H, RUAN Q F, *et al.* Coloured vortex beams with incoherent white light illumination [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2023, 18(3): 264-272.
- [23] LIU S L, WANG X H, NI J C, *et al.* Optical encryption in the photonic orbital angular momentum dimension *via* direct-laser-writing 3D chiral metahelices [J]. *Nano Lett.*, 2023, 23(6): 2304-2311.
- [24] 李加莲. 光线寻优算法的研究及改进 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
LI J L. *Research and Improvement of Light Ray Optimization Algorithm* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [25] RAGUIN D H. *Subwavelength Structured Surfaces: Theory and Applications* [D]. Rochester: University of Rochester,

- Rochester, 1993.
- [26] 巴鹏飞. 相位调控型超表面自动化设计技术与研究 [D]. 荆州: 长江大学, 2022.
BA P F. *Design Technology and Research of Phase Regulated Meta-Surface Automation* [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2022. (in Chinese)
- [27] SHELBY R A, SMITH D R, NEMAT-NASSER S C, *et al.* Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(4): 489-491.
- [28] ZHANG B Y, HENDRICKSON J, NADER N, *et al.* Metasurface optical antireflection coating [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105(24): 241113.
- [29] SMITH D R, SCHULTZ S, MARKOŠ P, *et al.* Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, 65(19): 195104.
- [30] 白雨池. 基于全介质超表面的涡旋光光子器件设计与研究 [D]. 西安: 西安邮电大学, 2023.
BAI Y C. *Design and Study of Vortex Optical Photonic devices Based on All-Dielectric Metasurfaces* [D]. Xi'an: Xi'an University of Posts & Telecommunications, 2023. (in Chinese)
- [31] 丛庆宇, 李赵一, 周敬杰, 等. 8英寸晶圆低损耗厚氮化硅波导的工艺开发 [J]. *光子学报*, 2024, 53(9): 0913002.
CONG Q Y, LI Z Y, ZHOU J J, *et al.* Process development of low-loss thick silicon nitride waveguide on 8-inch wafer [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2024, 53(9): 0913002. (in Chinese)
- [32] 李瑶, 莫伟成, 杨振刚, 等. 利用超表面天线阵列产生太赫兹涡旋光束 [J]. *激光技术*, 2017, 41(5): 644-648.
LI Y, MO W C, YANG Z G, *et al.* Generation of terahertz vortex beams base on metasurface antenna array [J]. *Laser Technol.*, 2017, 41(5): 644-648. (in Chinese)
- [33] SHEN Y J, WANG X J, XIE Z W, *et al.* Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities [J]. *Light Sci. Appl.*, 2019, 8(1): 90.
- [34] HE C, SHEN Y J, FORBES A. Towards higher-dimensional structured light [J]. *Light Sci. Appl.*, 2022, 11(1): 205.



牛昊(2001-),男,山西临汾人,硕士研究生,2022年于长春理工大学获得学士学位,主要从事半导体激光器的微纳结构设计及其光场模式调控的研究。
E-mail: 1210592042@qq.com



宋国峰(1965-),男,吉林长春人,博士,正高级工程师,博士生导师,2000年和2001年分别于北京理工大学和中国科学院国家天文台获得博士学位,主要从事半导体光电材料及器件的研究。
E-mail: sgf@semi.ac.cn



魏志鹏(1978-),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体光电子器件研制及转化方面的研究。
E-mail: zpweicust@126.com