

# 激光与光电子学进展

## 光学微腔产生涡旋光束的特性分析及其研究进展

晏庆玉, 苗玉, 宋秋阳, 许明珠, 王冠学, 高秀敏\*

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

**摘要** 近些年来, 涡旋光束特有的相位结构和携带轨道角动量(OAM)特性, 使其在光通信、光操纵、成像、传感到量子信息等领域具有广泛的应用前景。但这些应用都必须依赖于高质量涡旋光束的产生, 因此光学微腔凭借自身结构紧凑、品质因子高、元件体积小等优点, 研制出的新型集成光学器件能够发射出高质量涡旋光束, 在现代光电子器件制造中占据十分重要的地位。综述了光学微腔产生 OAM 光束的原理、研究进展、设计方案以及实验生成, 同时对已有的 OAM 激光器性能进行分析, 最后对集成光学器件应用领域面临的挑战和进一步改进方向进行展望。

**关键词** 集成光学; 集成光学器件; 涡旋光束; 轨道角动量; 回音壁模式微腔; 光子晶体微腔

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0100002

### Characteristic Analysis and Research Progress of Vortex Beam Produced by Optical Microcavity

Yan Qingyu, Miao Yu, Song Qiuyang, Xu Mingzhu, Wang Guanxue, Gao Xiumin\*

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,  
Shanghai 200093, China

**Abstract** In recent years, vortex beams have been widely used in optical communication, optical manipulation, imaging, sensing quantum information, and other fields owing to their unique phase structure and the characteristic of carrying orbital angular momentum (OAM). However, these applications must rely on the generation of high-quality vortex beams so that the optical microcavity occupies a very important position in the modern optoelectronic device manufacturing because of its compact structure, high quality factor, small element size, and other advantages. The developed new integrated optical device can emit high-quality vortex beam. The principle, research progress, design schemes, and experimental generation of optical microcavities to generate OAM beams are discussed in this paper. Simultaneously, the performance of existing OAM lasers is analyzed. Finally, the challenges faced by the applications of integrated optical devices and the directions for further improvement are considered.

**Key words** integrated optics; integrated optical device; vortex beam; orbital angular momentum; whispering gallery mode microcavity; photonic crystal microcavity

## 1 引 言

随着社会经济和科学技术的进步发展, 人们对物质世界的认识和探索越来越深入, 光学作为一门

有着悠久发展历史的古老学科, 尤其是在激光产生后, 人类对光的认识和利用进入到一个全新的局面。具有螺旋波前的涡旋光束因携带轨道角动量(OAM)的独特性质<sup>[1]</sup>, 被称为 OAM 光束。科研人

收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-03-29; 录用日期: 2021-04-16

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0503102)

通信作者: \*gxm@usst.edu.cn

员主要针对涡旋光束的振幅、相位及偏振态等进行研究,取得了诸多丰硕的成果,使其在许多领域都具有较高的应用价值,成为近些年来国内外光学领域的研究热点之一。

过去的十几年,人们提出了各种各样的方案来实现 OAM 光束的产生或测量。随着对 OAM 光束的深入研究,如何稳定、高效、低成本地产生或测量 OAM 光束依旧是一个棘手的问题。目前相关研究和应用中采纳最多、最为成熟的方法是使用空间光调制器(SLM)<sup>[2-3]</sup>对光场振幅或相位进行直接调控,进而实现 OAM 光束的产生和测量。尽管这种方法灵活性高、可实时动态调整 OAM 光束,但是器件价格昂贵,且大多数都是非集成方案,采用离散的体光学器件搭建系统,使得其在体积、稳定性和成本上面临着严峻的挑战。因此,与具有同等功能的体光学器件相比,光学微腔凭借结构紧凑、品质因子高、元件体积小等优点脱颖而出。利用光学微腔对光场相位、偏振态进行调控,进而产生高质量 OAM 光束的方法迅速引起了人们的高度重视,紧接着与微纳加工技术结合推出了各种集成光学器件,例如滤波器<sup>[4-6]</sup>、延时器<sup>[7-8]</sup>、调制器<sup>[9-10]</sup>、光开关<sup>[11-13]</sup>、激光器<sup>[14-15]</sup>、门电路<sup>[16-18]</sup>、传感器<sup>[19-22]</sup>等。这些集成光学器件成本低、实用性强、发射效率高、鲁棒性好,在光通信、光学操作、片上电路、成像、生物医学以及量子信息处理等领域具有良好的应用价值。

本文将对光学微腔产生涡旋光束的原理进行分析,总结利用光学微腔产生涡旋光束的设计方案、实验产生以及应用前景,同时对已有器件性能进行分析,最后对应用领域面临的挑战以及进一步改进方向进行展望,为后续研究提供相关基础。

## 2 基于光学微腔产生涡旋光束原理分析

光学微腔是一种通过循环谐振把光场限制在一个很小体积内的结构<sup>[23]</sup>,类型包括法布里-珀罗微腔、回音壁模式(WGM)微腔及光子晶体微腔。回音壁模式微腔包括微环腔、微盘腔、微环芯腔、微球腔、微泡腔等<sup>[24]</sup>。光子晶体微腔有一维、二维、三维三种结构。对比法布里-珀罗微腔,回音壁模式微腔和光子晶体微腔结构更多元化,因此研究人员更多采用回音壁模式微腔或者光子晶体微腔来产生涡旋光束。

### 2.1 回音壁模式微腔产生涡旋光束的原理

近些年来,随着材料科学、微纳加工技术以及芯片制备工艺的发展,回音壁模式微腔逐渐走向片上可集成化的发展道路,这得益于它结构多样化,且具有超高的品质因子 $Q$ 、更小的模式体积 $V$ 以及更有效的模式调控等优势。基于这些特殊优势,它在片上光子集成的涡旋光束产生或测量器件中扮演一个重要角色,尤其是基于微环谐振腔产生涡旋光束最为突出。

微环谐振腔由直波导和微环腔组合而成。入射光从直波导输入后,通过倏逝波耦合到微环谐振腔,微环谐振腔中的回音壁模式本身携带高阶 OAM,但由于腔内的束缚模式,在纵向传播方向上的净传播系数为零。如果将腔内的 OAM 模式提取出来,使其具有纵向的动量分量而形成辐射模式,则可获得涡旋光束。经过长期探索,研究人员发现通过将角光栅结构嵌入微环谐振腔中,在方位角上对折射率进行周期性调制,可实现涡旋光束的发射。

在角光栅中,导波被光栅元件集体散射,相当大一部分功率被转移到某个方向 $\Phi$ ,并在该方向发生相长干涉。辐射光的波前是一个以 $\Phi$ 角倾斜的平面,通过惠更斯原理,带有光栅的波导被弯曲形成一个环,使得辐射光束的波前在方位角方向上偏斜并转变成螺旋,这表明产生了携带 OAM 的光束,即涡旋光束。光束的偏振态由每个光栅元件上散射的局部光场的偏振态决定,所携带的 OAM 与拓扑电荷数 $l$ 分不开。当满足角相位匹配条件时,角光栅将限制在第 $p$ 阶回音壁模式中的光发射到自由空间光束中,相位匹配条件表达式为

$$l = p - gq, \quad (1)$$

式中: $p$ 是 WGM 的方位角阶数或者谐振腔周围的光学周期数; $q$ 是谐振腔上蚀刻光栅元件数, $q = \frac{2\pi R}{T}$ , $T$ 是光栅周期, $R$ 是微环腔半径; $g$ 是衍射级,它是一个整数。

$$(n_{\text{eff}} - 1) \cdot \frac{2\pi R}{q\lambda} < g < (n_{\text{eff}} + 1) \cdot \frac{2\pi R}{q\lambda}, \quad (2)$$

式中: $n_{\text{eff}}$ 是材料的有效折射率; $\lambda$ 是入射光波长。

通过将注入的激光波长调谐到各种腔共振,或者通过改变腔的温度来改变有效折射率,相对于固定的注入波长调谐腔共振,能产生可变的 OAM 光束。

## 2.2 光子晶体微腔产生涡旋光束的原理

自 Yablonovitch<sup>[25]</sup>和 John<sup>[26]</sup>于 1987 年首次提出光子晶体这一概念以来,作为一种能够自由控制光子的微结构,彻底引发了学术界和产业界的轰动。1999 年,Painter 等<sup>[27]</sup>在光子晶体周期结构中挖掉了一个空气孔,引入了点缺陷,首次形成了光子晶体微腔。此后科研人员对光子晶体微腔的特性分析及其应用研究进入了一个全新的高度。光子晶体缺陷结构不仅具有波长选择性,还能通过调节结构参数控制光场的空间分布,进而制造多种集成光学器件,例如激光器<sup>[27]</sup>、传感器<sup>[28]</sup>、滤波器<sup>[29]</sup>、光开关<sup>[30]</sup>等,具有十分重要的研究价值。

光子晶体可分为一维、二维、三维三种结构,目前研究最多的是二维光子晶体。另外光子晶体具有光子禁带和光子局域效应两大特性,落入禁带中的光会被禁止传播,光子晶体被自发辐射。如果将缺陷引入光子晶体结构中,依据光子晶体微腔共振模的特点,满足缺陷态频率的光子被局域在缺陷处,一旦发生偏离缺陷的情况,光就会迅

速衰减。因此,科研人员利用这两大特性,通过设计不同的晶格结构或是引入不同的缺陷状态,实现对光传输过程的控制,进一步制造出低阈值、高发射效率光子晶体激光器。图 1 为带有点缺陷的光子晶体微腔结构示意图<sup>[31]</sup>。从微腔模场分布可以看出,耦合到腔内的光场被局限在微腔中,构成微腔共振模。点缺陷微腔中的共振模为一对正交偏振分布的光场。如果让光子晶体含多个缺陷微腔,缺陷呈现对称分布,那么从缺陷散射出的远场为

$$E_j(x, y, z) = \frac{A_j(x_0, y_0, 0) \exp(ikR')}{R'}, j=1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

式中:  $E_j(x_0, y_0, 0)$  是第  $j$  个缺陷处的振幅;  $A_j(x_0, y_0, 0) \propto E_j(x_0, y_0, 0) \mu_j$ ,  $\mu_j$  是单位矢量大小;  $k$  代表波数;  $R' = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}}$ ;  $N$  是缺陷数。所散射出的光场经过叠加后将具有矢量特性,譬如径向偏振态、角向偏振态。

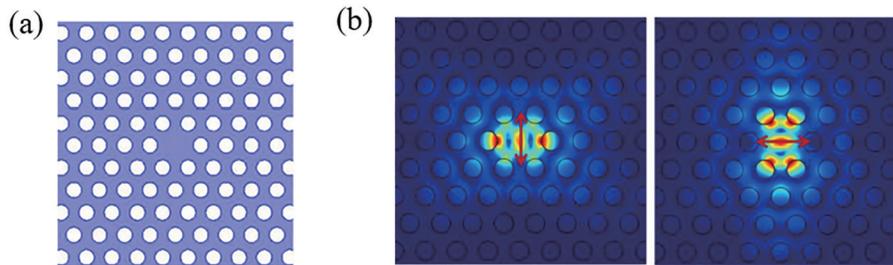


图 1 光子晶体微腔<sup>[31]</sup>。(a)点缺陷结构;(b)模场分布

Fig. 1 Photonic crystal microcavity<sup>[31]</sup>. (a) Point defect structure; (b) mode field distribution

## 3 基于光学微腔产生涡旋光束的方法

具有螺旋波前的涡旋光束因携带 OAM 的独特性质<sup>[1]</sup>,因此被称为 OAM 光束。目前,研究人员在利用光学微腔产生单模、多模、叠加态 OAM 光束方面取得了诸多丰硕的研究成果,这进一步推动光电子器件不断向前发展。

### 3.1 单模 OAM 光束产生

1939 年,光学回音壁模式的概念被 Richtmyer<sup>[32]</sup>首次提出,由于当时受到材料科学、加工技术的限制,回音壁模式微腔的发展一直停留在理论阶段。直到 20 世纪 60 年代,贝尔实验室的 Garrett 等<sup>[33]</sup>制备出  $\text{CaF}_2$  谐振腔,首次在微波波段输出具有回音壁模式的单模激光,这迅速掀起了人们

对单模激光的研究热潮。1992 年,McCall 等<sup>[34]</sup>成功实现了基于回音壁模式的微盘激光器,该激光器发射  $1.3 \mu\text{m}$  和  $1.5 \mu\text{m}$  波长的单模激光,且阈值泵浦功率低于  $100 \mu\text{W}$ 。1993 年,Levi 等<sup>[35]</sup>设计出一个半径为  $0.8 \mu\text{m}$ ,厚度为  $0.18 \mu\text{m}$  的微盘激光器,用波长  $0.85 \mu\text{m}$  的光进行泵浦,实现室温下波长为  $1542 \text{ nm}$  的单模 OAM 光束输出。尽管产生单模 OAM 光束的激光器已初见雏形,但将其应用于集成光学器件上时使用效果还是不理想。

考虑到集成光学器件的发射效率和鲁棒性,Miao 等<sup>[36]</sup>基于微环谐振腔结构,如图 2 所示,以 InP 为基底,上面覆盖  $500 \text{ nm}$  厚的 InGaAsP 多量子阱。通过在 InGaAsP 顶部沿方位角方向放置周期性交替的单层 Ge 和双层 Cr/Ge 结构,实现对称性破坏,成功研制出产生单模 OAM 涡旋激光的微环激光

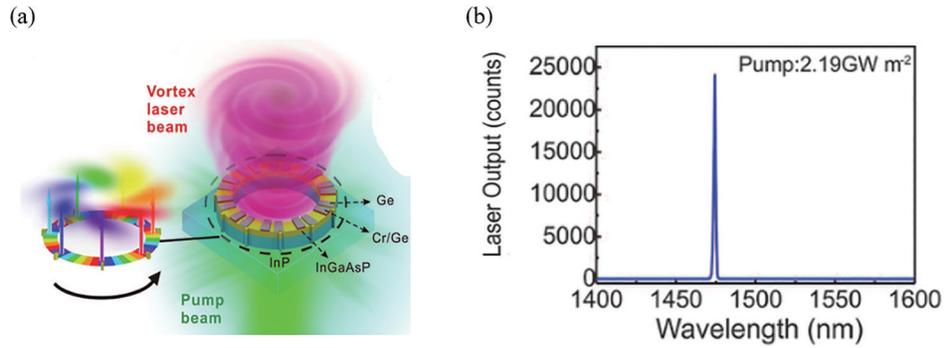


图 2 单模涡旋光束激光器设计<sup>[36]</sup>。(a)器件结构示意图;(b)激光发射光谱

Fig. 2 Design of single-mode vortex beam laser<sup>[36]</sup>. (a) Device structure diagram; (b) laser emission spectrum

器。周期性交替的单层 Ge 和双层 Cr/Ge 结构建立独立的增益区和损耗区,能引入折射率调制形成异常点(EP),实现单向功率循环,当泵浦光功率密度为  $2.19 \text{ GW} \cdot \text{m}^{-2}$  时,在 1474 nm 处发射出高效稳定的径向单模激光。

几乎是同一时间,华中科技大学马翔课题组<sup>[37]</sup>也设计出一款基于微圆柱腔的单模表面发射激光器。通过在微环腔的顶部和外壁蚀刻二阶光栅,光栅周期等于微圆柱腔 WGM 的方位角数,实现光束垂直发射和模式选择。之后,基于此结构该课题组

通过改变蚀刻光栅尺寸,成功实现了第一个电泵浦下高速直调圆柱矢量 OAM 光束激光器<sup>[38]</sup>,如图 3 所示。优化后的三角形侧光栅能够获得具有高侧模抑制比的单模激光,通过在顶部蚀刻的二阶矩形光栅散射微环中选择具有单驻波模式的径向极化电场,激光器输出功率大于 1 mW,边模抑制比为 50 dB。相比较之前的设计,该激光器发射效率高、调制速度快、体积小、紧凑性高,不需要外部直接调制激光器作为种子光源,满足了日益增长的高速光通信需求。

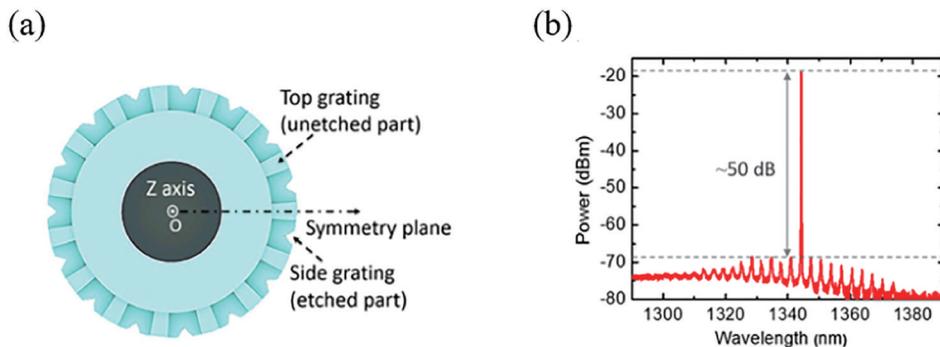


图 3 高速直调径向圆柱矢量 OAM 光束激光器<sup>[38]</sup>。(a)器件结构设计;(b)输出功率

Fig. 3 High-speed direct-tuning radial cylindrical vector OAM beam laser<sup>[38]</sup>. (a) Device structure design; (b) output power

除此之外,科研人员利用光子晶体微腔设计激光器产生涡旋光束的方法也有很多,目前研究最多的光子晶体激光器有两类结构:一类是基于环形光子晶体微腔结构的激光器;另一类是基于中心缺陷微腔结构的激光器,通过改变中心空气孔的尺寸大小或者挖掉中心空气孔,实现涡旋光束发射。由于中心缺陷结构尺寸灵活、可调性更高,这意味着具有中心缺陷的微腔结构的激光器更适合各种新型片上集成器件的制造。

早在 1999 年,美国加州理工首次报道可在室温下工作且正常运转的 1550 nm 二维光子晶体缺陷单

模激光器<sup>[27]</sup>,如图 4 所示。2006 年, Miyai 等<sup>[39]</sup>通过设计多种晶格移位形式,成功制作出一种光子晶体激光器,该激光器能够按需产生各种光束图案,同时在室温下保持稳定的单模振荡,最大输出功率超过 45 mW,晶格移位这种结构设计为后续光子晶体激光器发展奠定了基础。

2000 年, Hwang 等<sup>[40]</sup>设计了二维平板光子带隙激光器,用占空比 10% 的光泵浦,室温下在 1.54  $\mu\text{m}$  处出现单模脉冲激光,但激光器阈值功率不太理想。由于激光器由晶片熔合制成,这保证了良好的导热性和机械强度,有望为有源二维光子带

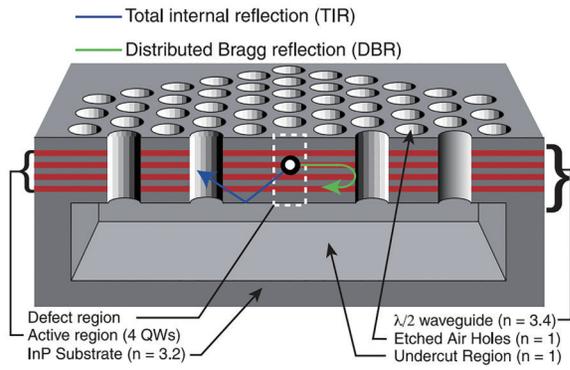


图 4 1550 nm 光子晶体激光器<sup>[27]</sup>

Fig. 4 1550-nm photonic crystal laser<sup>[27]</sup>

隙器件的研究开辟一个新的领域。受到 Hwang 等的启发, Abe 等<sup>[41]</sup>制作出低阈值二维平板光子晶体微腔激光器, 如图 5 所示, 当激光发射时, 激光器单模峰值的强度比自发辐射水平高 30 dB 以上 (最大 40 dB)。另外由于光子晶体微腔的高品质因子  $Q$ , 耦合出的光信号波长范围非常窄, 特别在增加纳米粒子后, 半峰全宽缩小至 0.3 nm, 光谱形状的均匀

性也得到显著改善, 实现高分辨率的频率滤波。

熊志刚<sup>[42]</sup>利用二维平板光子晶体微腔的本征模和连续单色点光源之间的模式叠加来产生 OAM 光束。该方法的优势在于无需改变光子晶体结构参数, 只通过调节点光源的位置就可以产生拓扑电荷为 +1 或 -1 的 OAM 光束, 这更利于实现片上集成, 极大地推动基于 OAM 模的集成光学器件的制造向前发展。但想要得到纯度更高的 OAM 光束及其他拓扑电荷, 仍需要进一步优化二维平板光子晶体微腔的参数, 如膜厚、占空比、材料介电常数、微腔结构等。

### 3.2 多模 OAM 光束产生

随着单模 OAM 激光器的出现, 自然而然多模 OAM 激光器的思想也得到推广。2002 年, 国外学者 Fujita 等<sup>[43]</sup>设计出一种由微盘和旋转对称布拉格光栅组成的微激光器, 发射功率阈值为 17  $\mu$ W 的多模激光, 实验测试结果表明, 附加布拉格光栅可以提高 WGM 腔的品质因数  $Q$ , 同时改变光栅蚀刻深度和数量级, 能够选择发射不同激光模式。

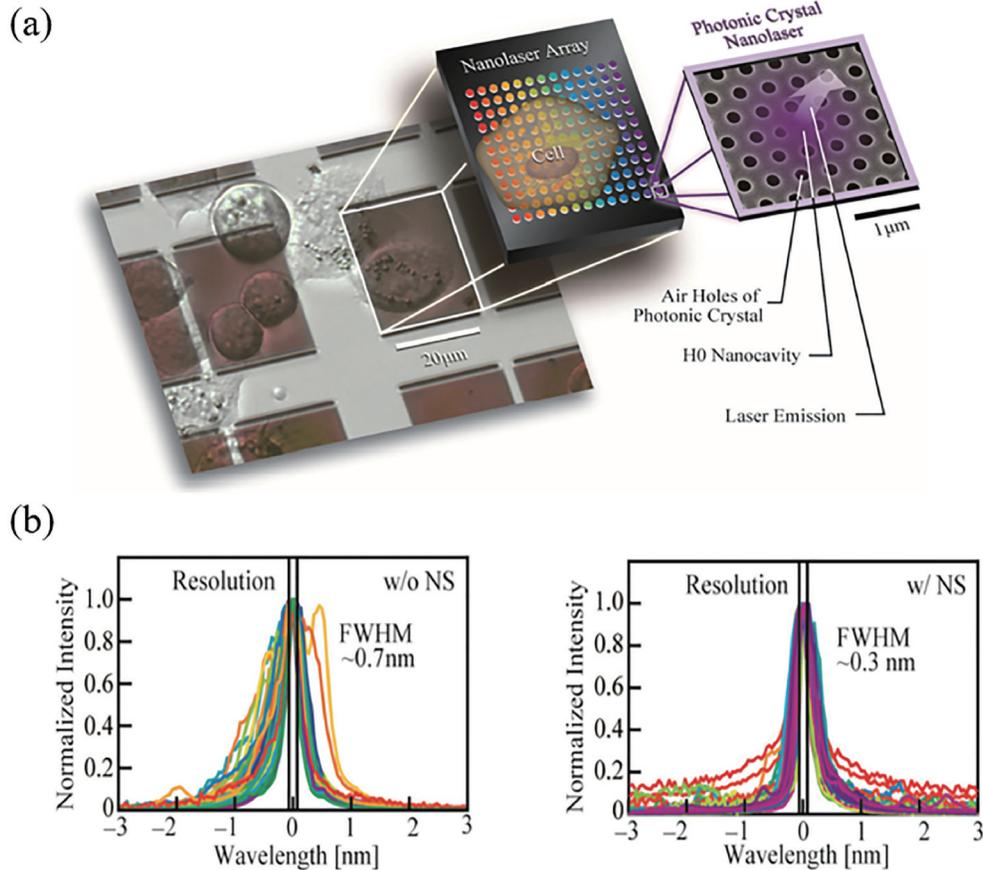


图 5 二维平板光子晶体微腔激光器<sup>[41]</sup>。(a) 纳米激光阵列; (b) 有无纳米粒子激光器的激光光谱

Fig. 5 Two-dimensional flat photonic crystal microcavity laser<sup>[41]</sup>. (a) Nanometer laser array; (b) laser spectra of lasers with and without nanoparticles

受此启发,2012年中山大学Cai等<sup>[44]</sup>提出一种由微环谐振腔改进的、更加集成化的、微米量级的OAM光束产生器,如图6所示。该微环谐振腔的最小半径为 $3.9\ \mu\text{m}$ ,厄米-高斯光束从硅波导输入,首先通过倏逝场耦合到环形谐振腔中。环形谐振腔内的回音壁模式具有螺旋型的相位分布,通过在其侧壁上引入周期性角向光栅结构,调控角向光栅的周期数和回音壁模式的阶数,选择调谐发射不同拓扑电荷的OAM光束。2014年,该课题组基于此结构制作出一种快速可调谐集成OAM电路<sup>[45]</sup>。通过在波导上集成电阻加热元件,以 $10\ \mu\text{s}$ 的记录速率和 $20\ \mu\text{s}$ 的切换速率快速切换两个不同OAM光束

的发射。2015年,他们还演示了一个OAM发射器和一个3 dB耦合器组成的OAM集成功能器件<sup>[46]</sup>,如图7所示,由于微环腔内两个传播方向的光交叉耦合,故在 $1545\ \text{nm}$ 处发射光谱出现模式分裂。另外基于二阶布拉格光栅反射,在 $l=0$ 处存在最强的耦合,因此从 $l=0$ 开始在较短或较长的波长范围内,每次共振都会发射一对拓扑电荷相反的OAM光束。通过在与波导集成的移相器上施加电压,在芯片上调制两个OAM光束之间的相对相位,相位表征以两个OAM光束之间的干涉图案的旋转呈现。这种设计方案可广泛应用于片上电路、通信和传感等领域。

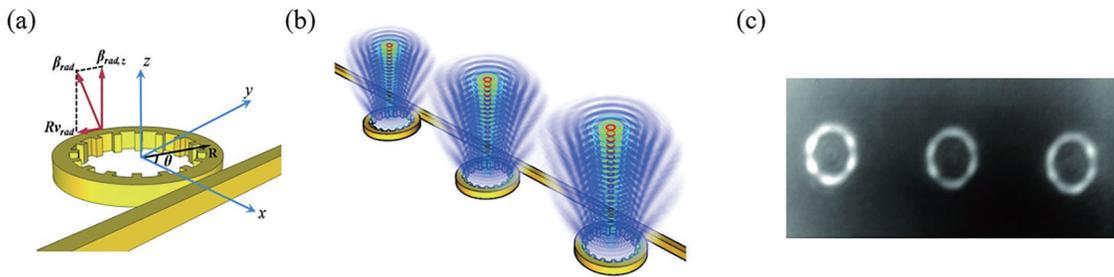


图6 微环谐振腔OAM光束发射器<sup>[44]</sup>。(a)内部附有角光栅的微环谐振腔;(b)发射器阵列结构;(c)阵列发射的近场模式强度  
Fig. 6 Microring resonator OAM beam transmitter<sup>[44]</sup>. (a) Microring resonator with angle grating; (b) transmitter array structure; (c) near-field mode intensity emitted by the array

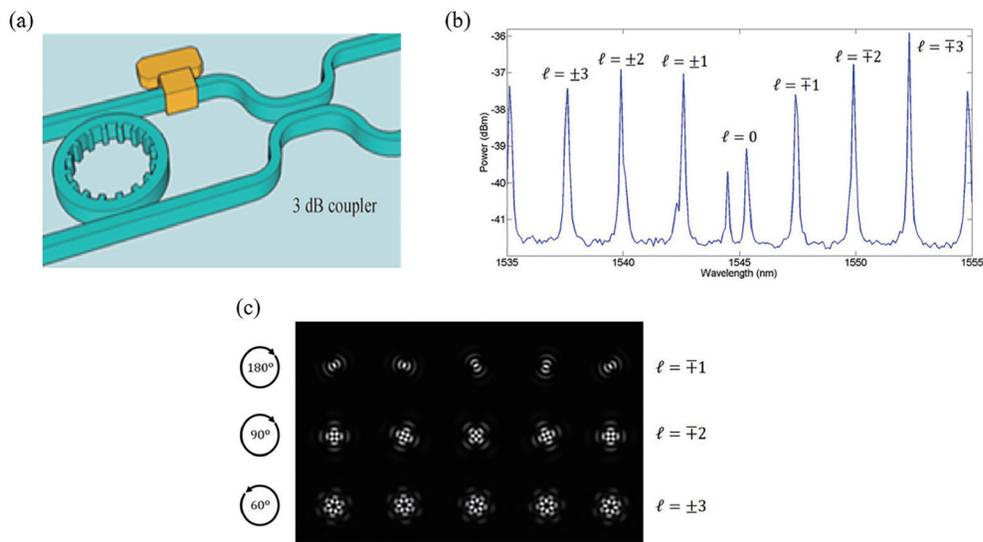


图7 片上调制OAM光束<sup>[46]</sup>。(a)OAM集成器件示意图;(b)发射光谱;(c)不同模态相移条件下OAM强度分布  
Fig. 7 On-chip modulated OAM beam<sup>[46]</sup>. (a) Schematic of OAM integrated device; (b) emission spectrum; (c) OAM intensity distribution under different modal phase shift conditions

基于Miao等<sup>[36]</sup>在微环谐振腔上引入适当间距的增益和损耗区,引入异常点,从而实现对称破坏和一个OAM阶的单模激发。然而,这种方法本质上在谐振腔建立独立的增益区和损耗区,需要在环上沉积异质材料,这使得可伸缩性和与其他组件的

集成变得复杂,对激光器阈值也会有影响。因此Mock等<sup>[47]</sup>利用时空调制微环谐振腔,通过在微腔外围蚀刻结构光栅,垂直发射可调谐OAM光束。这种OAM微激光器适用于工作波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的光通信系统,调制的微环腔品质因子超过20000,成

为实现电泵浦连续 OAM 激光发射器件的代表。

目前集成的发射多模 OAM 光束的器件大都是基于微环谐振腔的,设计微环谐振腔时强加了一个单一的、非定制的波前手性(即顺时针或逆时针涡旋)。经过长期探索,科研人员又提出了一种新型集成微激光器,利用光学控制波前的手性,基于微腔中的时间反转对称性,可以将此激光器推广到不同的结构中,从而为实现手性可调的新一代 OAM 微激光器铺平了道路<sup>[48]</sup>。

2020 年,美国宾夕法尼亚大学 Zhang 等<sup>[49]</sup>利用总动量守恒、横向自旋和光学非厄米对称性破坏来精确操纵微环激光器中的手性光态,实现可调拓扑电荷涡旋激光发射。在 200 nm 厚 InGaAsP 多量子阱层的 III-V 半导体平台上,微激光器由一个主微环谐振腔与外部反馈环耦合而成,从而实现微环中两个循环模式之间的单向耦合,在微环的内侧壁上蚀刻角光栅来产生可变拓扑电荷的涡旋激光。破坏非厄米对称性有助于可控方式提升两个自旋-轨道耦合态之间的简并性,产生具有所需手性的 OAM 态激光。此

外,该涡旋微激光器证明了同一波长下,在自旋-轨道转换中总角动量守恒的 OAM 光束的可调谐性。

同年,Cognée 等<sup>[50]</sup>将天线阵列与微盘谐振腔相结合,当每个天线同时发射右旋和左旋圆极化时,两个通道中的一个被相消干扰抵消,而另一个被增强了。因此,这种设计可以产生单偏振态纯 OAM 光束,产生光束通过使用干涉偏振分辨焦平面成像得到验证。该设计策略对在片上产生 OAM 光束有一定的指导意义。

借鉴 Miyai 等<sup>[39]</sup>设计单模 OAM 激光器的思想,日本京都大学 Iwahashi 课题组<sup>[51]</sup>设计三种具有不同对称性的空腔模式的晶格结构,如图 8(b)所示,由于晶格空间中存在基波,每组基波所具有的不同对称性很大程度上决定相应的光学特性(如光子带结构、电磁场分布和光束偏振)。为了每个结构能获得相同的激光波长,晶格常数  $a$  的值等于基波的幅度值。经过实验得出,每一个光子晶体激光器获得发散角约为  $1^\circ$  的高阶涡旋光束,这极大地推动高分辨率显微术、激光处理和光学捕获等应用的发展。

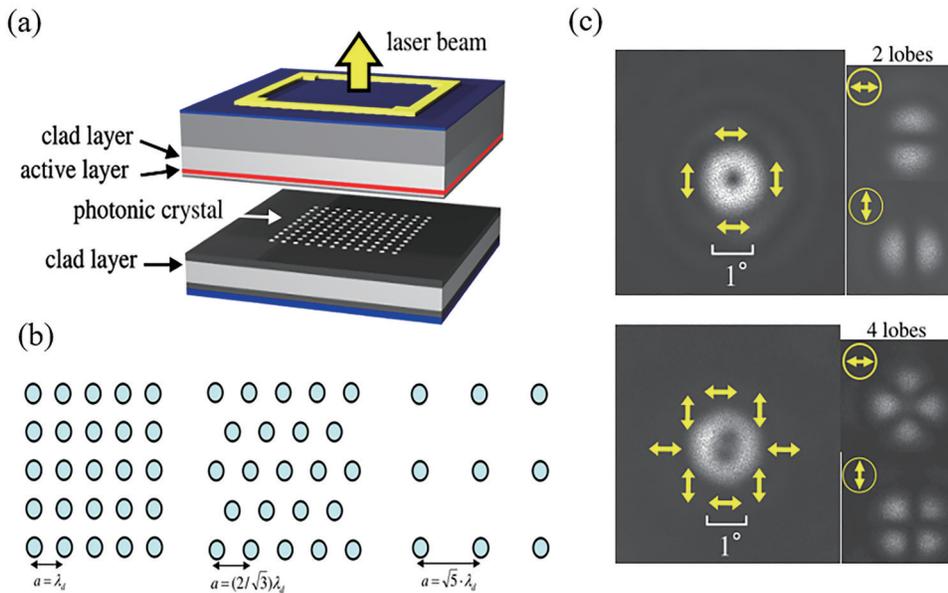


图 8 发射涡旋光束装置<sup>[51]</sup>。(a)结构示意图;(b)三种类型的晶格结构;(c)生成光束

Fig. 8 Vortex beam emitting device<sup>[51]</sup>. (a) Structure diagram; (b) three types of lattice structures; (c) generated beam

香港大学和浙江大学合作<sup>[52]</sup>,在三维光子晶体中叠加点缺陷产生携带电磁波的 OAM 光束,如图 9 所示,线缺陷中的导波与点缺陷中的局域模耦合,通过圆孔向外辐射,同时激发两个具有正交振动模的缺陷态,发射出携带 OAM 的混合旋转模。研究还发现,通过不断增加缺陷的半径或介电常数,可以产生更高阶的 OAM 光束,这一研究对利用三维

光子晶体微腔产生多模 OAM 光束的后续发展具有重大意义。

### 3.3 叠加态 OAM 光束产生

叠加态 OAM 光束是具有不同拓扑电荷的 OAM 光束的线性叠加。随着移动互联网的普及,社会高速信息化,信息系统容量持续扩展,考虑到光学操作和量子通信的应用,研究人员瞄准叠加态

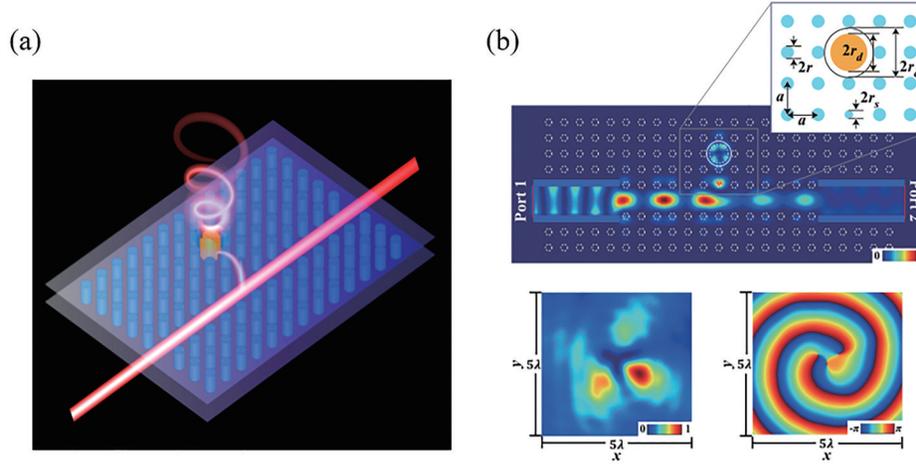


图 9 三维光子晶体叠加点缺陷产生涡旋光束<sup>[52]</sup>。(a)结构示意图;(b)生成二阶 OAM 光束

Fig. 9 Three-dimensional photonic crystal superimposes point defects to produce vortex beam<sup>[52]</sup>. (a) Structure diagram; (b) generated two-order OAM beam

OAM 光束数据传输的潜在性质, 开拓出新的通信容量资源, 并研究其充分利用的方法。加拿大渥太华大学 Schulz 等<sup>[53]</sup>将总线波导和微环谐振腔置于不同的平面, 发射叠加态 OAM 光束<sup>[54]</sup>, 如图 10 所示, 他们将几个同心微环谐振腔组合起来, 通过不同的总线波导寻址, 从图 10(b)看出, 组合的三个谐

振腔在 1542 nm 处谐振重合, 产生叠加态。图 10(c)中虚线和实线分别对应内环谐振腔和外环谐振腔的接入波导的输出光束功率, 当  $l=1$  和  $l=2$  光束叠加时, 在 1542 nm 出现一个清晰的共振峰, 首次实现以集成方式产生和动态控制 OAM 叠加态, 对探索量子通信有重大意义。

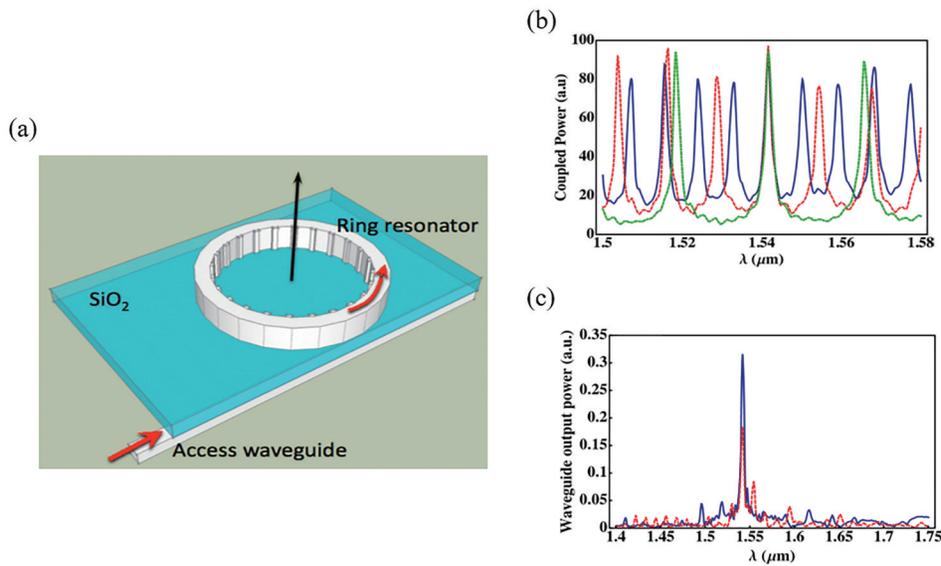


图 10 动态控制 OAM 叠加态器件<sup>[53]</sup>。(a)器件结构示意图;(b)同心微环谐振腔耦合功率;(c)叠加态光束输出功率

Fig. 10 Dynamic control of OAM superposition state device<sup>[53]</sup>. (a) Device structure diagram; (b) coupling power of concentric microring cavity; (c) output power of superposition state beam

Hayenga 等<sup>[55]</sup>使用一个封闭的 S 形波导, 如图 11 所示, S 形波导的两端呈绝热锥形, 以确保能量耗散(辐射损耗)和可忽略的功率反射。S 形弯曲在两种反向传播模式之间提供了不对称的损耗/耦合, 在微环谐振腔中实现异常点, 产生叠加态 OAM

光束。光束的拓扑电荷由光栅结构和温度调谐来操纵。对比之前 Miao 等<sup>[36]</sup>研发的单模 OAM 微环激光器, 这一突破首次在完全集成的 III-V 半导体平台上实现可调谐, 叠加态 OAM 激光器为操纵和产生原子轨道运动光束开辟新的途径, 同时在传感、

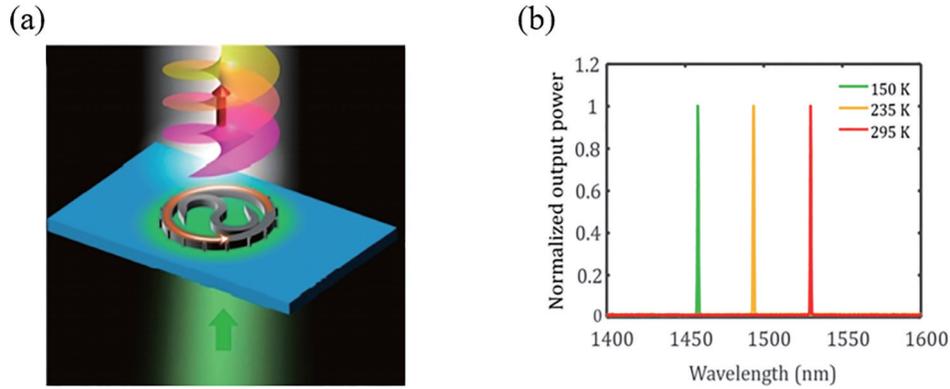


图 11 可调 OAM 激光器<sup>[55]</sup>。(a)结构示意图;(b)输出功率

Fig. 11 Tunable OAM laser<sup>[55]</sup>. (a) Structure diagram; (b) output power

光通信和量子信息科学中得到应用。

与此同时国内许多课题组也取得了不错的研究成果。2012年清华大学 Zhang 等<sup>[56]</sup>将微环谐振腔和 8 个下载波导集成,8 个下载波导等距离地连接到环上,并围绕圆周等距离分布,呈八重旋转对称。通过改变材料折射率,调谐发射不同拓扑电荷 OAM 光束,经过实验测试发现,当使用 0, 1, 2, 3 阶 OAM 光束来编码和解码数据时,能够实现增加两倍的数据密度,这极大促进了自由空间光通信、量子通信的发展。之后该课题组再次提出一种 OAM 光束叠加的片上集成装置。该装置由一个可变振幅分配器 (VAS) 和一个基于微环谐振腔的 OAM 发射器组成。在 VAS 中,入射光束首先被分为两束,通过改

变硅的折射率,可以调节这两束光的相对振幅。两束光会聚到发射器后会被光栅元件散射到自由空间中,在一定的共振波长下,通过外部施加电压,可以调整拓扑电荷值相同但符号相反的两个 OAM 光束分量的比例,实现同轴叠加态 OAM 光束的产生<sup>[57]</sup>。

在微环谐振腔中蚀刻角光栅,入射光被角光栅散射到自由空间后,通过调谐共振波长或是改变折射率可实现 OAM 光束的发射。因此肖庆生课题组<sup>[58]</sup>通过在一个硅微环谐振腔中集成两个叠加的角光栅实现 OAM 模式叠加,如图 12 所示。嵌入在微谐振腔中的角光栅与自由空间传播 OAM 模式耦合,两个叠加光栅数值差决定生成 OAM 叠加态之间的拓扑电荷差。此外实验中还发现,通过改变原

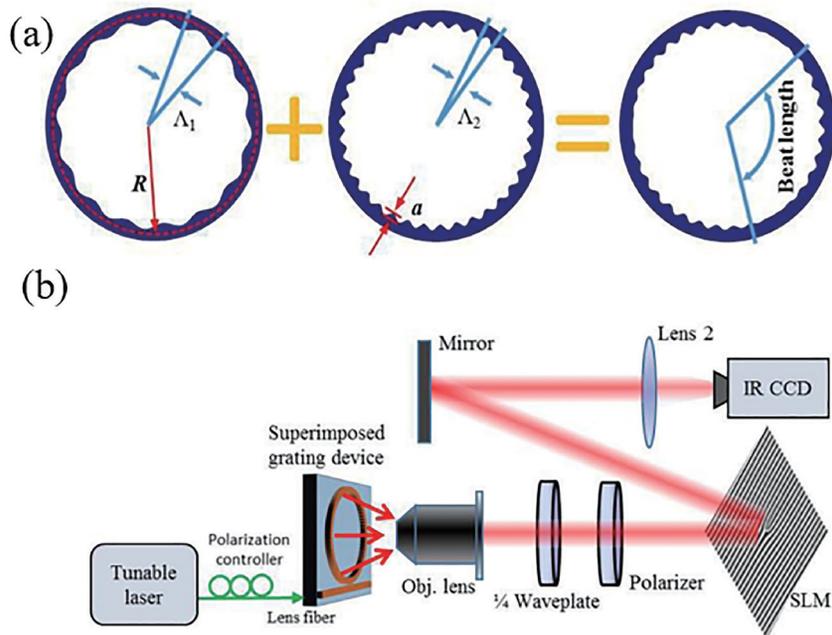


图 12 微环谐振腔叠加光栅发射涡旋光束<sup>[58]</sup>。(a)叠加光栅结构;(b)实验装置

Fig. 12 Microring cavity superimposed grating emitting vortex beam<sup>[58]</sup>. (a) Superimposed grating structure; (b) experimental setup

始角光栅的大小能改变 OAM 态的相对权重。基于这种方法携带的叠加 OAM 光束在光通信领域具有潜在应用。

### 3.4 集成 OAM 激光器性能分析

在任何实际应用中,集成 OAM 激光器产生 OAM 光束的模式纯度以及器件发射效率都是衡量该器件质量好坏的参考标准。通过科研人员的不懈努力,发现通过优化角光栅的尺寸和占空比<sup>[59]</sup>,改变微环谐振腔圆环半径,或者减少光在环内的后向散射<sup>[60]</sup>,均可从不同程度提高 OAM 光束模式纯度。而器件的发射效率与微环谐振腔和输入直波导之间的耦合有关,当二者耦合比到达临界耦合点

时,可以使发射效率最大化<sup>[61]</sup>。

#### 3.4.1 产生 OAM 光束模式纯度分析

2018年,北京大学邵曾恺课题组<sup>[62]</sup>将浅蚀刻周期性角光栅放置在硅微环谐振腔的顶部,如图 13 所示。通过切换输入光的偏振和波长,调谐发射具有明确带宽的 OAM 径向偏振和方位角偏振矢量光束,该装置类似于一种集成矢量涡旋光束开关。此外,他们发现通过改变蚀刻角光栅的中心线位置  $d$ ,能够使产生的 OAM 光束具有更高纯度的偏振。由于  $d$  会影响蚀刻角光栅的尺寸,角光栅散射系数变高,就会破坏腔共振,进而影响 OAM 光束偏振纯度。从图 13(c) 看出,当  $d=60\text{ nm}$  时,OAM 光束纯度最高。

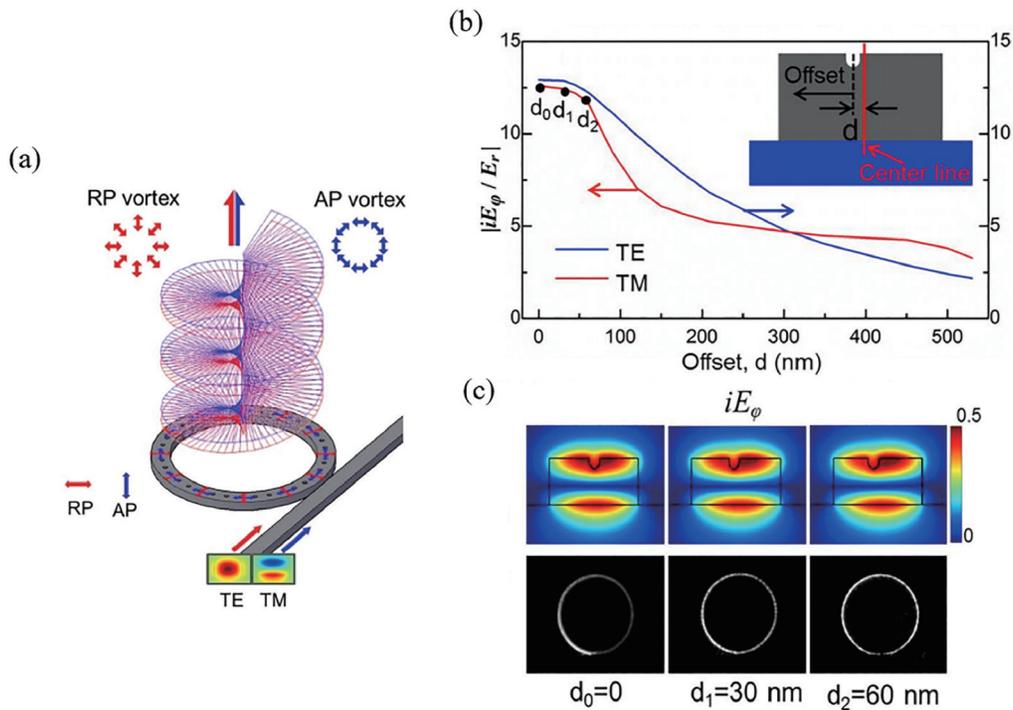


图 13 发射涡旋光束装置<sup>[62]</sup>。(a)结构示意图;(b)TE和TM模式下相关参数的计算曲线,插图为蚀刻光栅中心线偏移量示意图;(c)发射光束近场强度和偏振纯度

Fig. 13 Vortex beam emitting device<sup>[62]</sup>. (a) Structure diagram; (b) calculation curves of related parameters in TE mode and TM mode, inset is schematic of the center line offset of the etching grating; (c) near-field intensity and polarization purity of emitted beam

2020年,Zheng等<sup>[63]</sup>在Ma等<sup>[38]</sup>提出的结构基础上,发现顶部蚀刻光栅的长度对光束发射纯度有影响。该器件由两个基于InP平台的光栅辅助同心微腔组成,设计并优化两个具有不同角度光栅的微腔,用于径向和方位角偏振圆柱矢量光束高速发射。如图 14(a)所示,当顶部光栅的长度为  $1.5\text{ }\mu\text{m}$ ,深度为  $0.4\text{ }\mu\text{m}$  时,反对称模式的品质因数最高,成为激光模式。在  $1340\text{ nm}$  处和  $1337\text{ nm}$  处模拟近场分布,结果如图 14(b)所示。经过实验验证该器件可实现波分复用和模分复用技术兼容,这标志着微

腔激光器在经典通信和量子通信领域迈出重要一步。

清华大学 Zhang 等<sup>[64]</sup>通过在 InP 外延晶片上集成光学涡流发射器和分布式反馈激光器,在电信波长下,电泵浦集成发射 OAM 光束,OAM 光束模式纯度高于 0.8,使其在光纤通信、量子信息领域彰显巨大的应用潜力。Li 等<sup>[65]</sup>提出一种浅脊硅微环 OAM 光束发射器,改变蚀刻光栅元件数量和半径,直波导与微环腔之间的耦合间距,实验与理论结合,最终发射器发射的 OAM 光束纯度高达 0.98,器

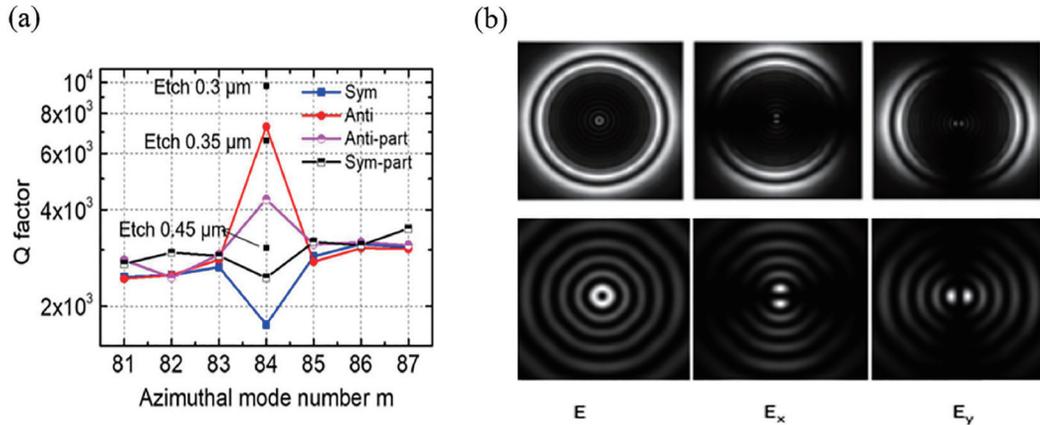


图 14 高速发射圆柱矢量光束激光器<sup>[63]</sup>。(a)WGMs的Q与方位角模数关系;(b)光束近场和远场分布  
Fig. 14 High-speed emission cylindrical vector beam laser<sup>[63]</sup>. (a) Relationship between Q and azimuth modulus of WGMs; (b) near-field and far-field distribution of beams

件发射效率达到49%，耦合系数为0.87。

### 3.4.2 器件发射效率分析

中山大学Li等<sup>[66]</sup>设计了一种基于硅微环谐振腔与金属反射镜集成的OAM光束发射器。如图15所示,引入了弯曲波导以增加输入光与微环的有效耦合长度,当反射镜将向下发射到基底的光反射回

空气时,器件的发射效率得到提高,最终发射器能够以高达37%的发射效率在不同的波长处选择性地产生各种拓扑电荷的矢量OAM光束,且OAM光束具有小发散角。由于器件尺寸小、操作灵活,很容易与其他芯片上的组件集成,如调制器和激光器,进而形成光子集成电路。

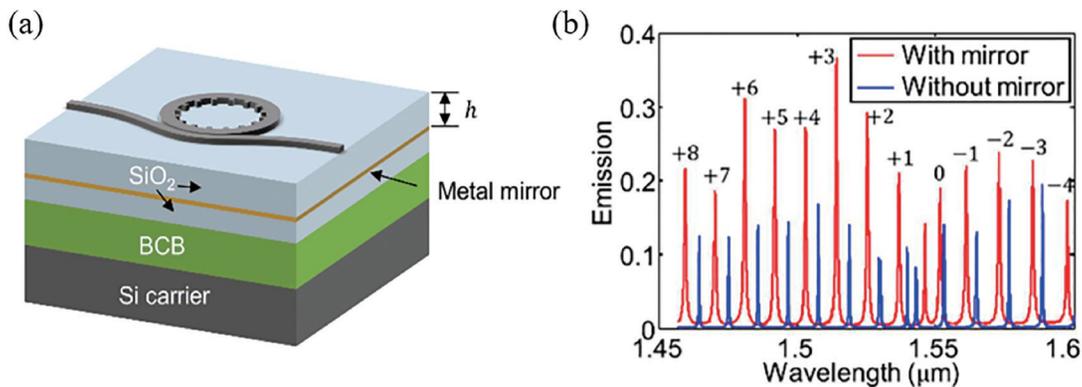


图 15 微环谐振腔与金属反射镜集成涡旋光束发射器<sup>[66]</sup>。(a)结构示意图;(b)发射效率  
Fig. 15 Vortex beam transmitter integrated by microring resonator and metal mirror<sup>[66]</sup>. (a) Structure diagram; (b) emission efficiency

研究人员还发现微腔结构的设计对光子晶体激光器的特性有较大影响,譬如晶格孔的形状和晶格结构。晶格孔形状决定了输出光束模式,例如,圆孔产生环形光束,三角形孔产生单叶光束。此外,晶格孔的深度也会极大地影响激光器发射效率。2012年,Iwahashi课题组<sup>[67]</sup>从理论和实验两方面综合研究了中心矩形点阵光子晶体的微腔特性,包括正方形和三角晶格结构,由于输出光束方向依赖于晶格孔之间的角度 $\psi$ ,相较于之前的工作,制造出的器件以 $10^\circ$ 为步长,能够高效率垂直

发射 $40^\circ\sim 90^\circ$ 方向的OAM光束,实现了自由度的扩展。

西北工业大学Zhao等<sup>[31]</sup>提出了一种在含有多漏孔缺陷的平面光子晶体腔中产生矢量涡旋光束的新方法。通过模拟腔内的共振模式,观察到每个缺陷中的光场具有不同的相位和偏振态分布。研究发现改变缺陷周围的气孔半径,如图16(b)红色区域所示,这种扰动没有破坏微腔模式的对称性,器件发射效率从1.83%提高到8.82%,且品质因数Q没有明显下降,光束近场分布效果较好。

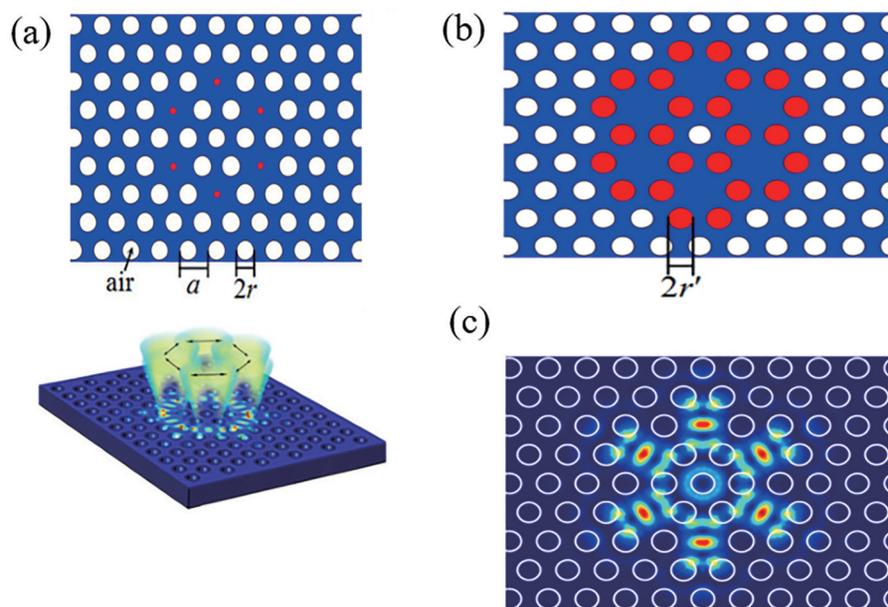


图 16 多点缺陷光子晶体微腔激光器<sup>[31]</sup>。(a)多点缺陷产生矢量涡旋光束；(b)扩大缺陷周围气孔半径示意图；(c)近场强度分布图(扩大缺陷周围气孔半径后)

Fig. 16 Multi-point defect photonic crystal microcavity laser<sup>[31]</sup>. (a) Multi-point defects produce vector vortex beams; (b) schematic of enlarged pore radius around the defect; (c) near-field intensity distribution(after enlarging the pore radius around the defect)

## 4 总结与展望

涡旋光束的理论、生成和应用研究在近些年来一直都是国内外光学领域的研究热点。目前研究人员利用光学微腔结构紧凑、品质因子高、元件体积小等优良特性,研制出各种新型集成光电子器件,发射携带 OAM 的涡旋光束,相较于早期用空间光调制器产生 OAM 光束,前者很好地解决了成本、体积、稳定性方面的难题。从光学微腔产生涡旋光束的研究背景出发,分析基于回音壁模式微腔和光子晶体微腔产生涡旋光束的基本原理,然后综述近年来利用回音壁模式微腔和光子晶体微腔生成 OAM 光束的相关研究进展,同时对 OAM 激光器的性能进行分析,发现这些集成器件发射出的 OAM 光束在光通信、光计算、成像和传感等方面发挥愈来愈重要的作用。尽管片上光子集成的 OAM 光束产生或测量器件在诸多领域都取得了丰硕的研究成果,但在一些方面仍旧存在机遇和挑战。在实际应用中,光子集成器件产生 OAM 光束的模式纯度、器件的发射效率、速度调制自始至终都是大家普遍关心的问题。因此在未来的研究中,如何在空间、成本、能耗等资源内满足实际应用的需求,还需要更深入细致的探索,相信各种基于光学微腔产生

OAM 光束的集成器件会很快走入社会生产生活的更多领域,给人们提供更便利的生活方式。

## 参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Wang X L, Chen J, Li Y N, et al. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(25): 253602.
- [3] Liu S, Li P, Peng T, et al. Generation of arbitrary spatially variant polarization beams with a trapezoid Sagnac interferometer[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21715-21721.
- [4] Jiang X, Chen Y, Vienne G, et al. All-fiber add-drop filters based on microfiber knot resonators[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(12): 1710-1712.
- [5] Chen Y, Ma Z, Yang Q, et al. Compact optical short-pass filters based on microfibers[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(21): 2565-2567.
- [6] Wu Y, Zeng X, Hou C L, et al. A tunable all-fiber filter based on microfiber loop resonator[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(19): 191112.
- [7] Poon J K S, Scheuer J, Xu Y, et al. Designing

- coupled-resonator optical waveguide delay lines[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(9): 1665-1673.
- [8] Melloni A, Morichetti F, Ferrari C, et al. Continuously tunable 1 byte delay in coupled-resonator optical waveguides[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(20): 2389-2391.
- [9] Rabiei P, Steier W H, Zhang C, et al. Polymer micro-ring filters and modulators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(11): 1968-1975.
- [10] Tazawa H, Kuo Y H, Dunayevskiy I, et al. Ring resonator-based electrooptic polymer traveling-wave modulator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(9): 3514-3519.
- [11] Almeida V R, Lipson M. Optical bistability on a silicon chip[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(20): 2387-2389.
- [12] Dumeige Y, Féron P. Dispersive tristability in microring resonators[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, 72(6): 066609.
- [13] Först M, Niehusmann J, Plötzing T, et al. High-speed all-optical switching in ion-implanted silicon-on-insulator microring resonators[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(14): 2046-2048.
- [14] Wen Q, Qin J H, Zhou H, et al. Controllable excitation of whispering gallery mode micro-rod resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1919001.  
温钦, 秦晋辉, 周恒, 等. 回音壁模式光学微腔的激发模式控制[J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1919001.
- [15] Jia Z N, Zhang T T, Li Z H, et al. Fabrication of Fabry-Pérot optical microcavity array based on CO<sub>2</sub> laser processing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 231404.  
贾卓楠, 张婷婷, 栗正华, 等. 基于 CO<sub>2</sub> 激光加工的法布里-珀罗光学微腔阵列的制备[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 231404.
- [16] Ibrahim T A, Amarnath K, Kuo L C, et al. Photonic logic NOR gate based on two symmetric microring resonators[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(23): 2779-2781.
- [17] Xu Q F, Lipson M. All-optical logic based on silicon micro-ring resonators[J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 924-929.
- [18] Caulfield H J, Soref R A, Vikram C S. Universal reconfigurable optical logic with silicon-on-insulator resonant structures[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2007, 5(1): 14-20.
- [19] Yalcin A, Popat K C, Aldridge J C, et al. Optical sensing of biomolecules using microring resonators[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(1): 148-155.
- [20] de Vos K, Bartolozzi I, Schacht E, et al. Silicon-on-insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing[J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7610-7615.
- [21] Wang Y P, Wang X H, Wang P. Identifying single cell types via whispering gallery mode optical microcavities[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207028.  
王亚平, 王秀翔, 王璞. 回音壁模式光学微腔识别细胞类型[J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207028.
- [22] Chao C Y, Fung W, Guo L J. Polymer microring resonators for biochemical sensing applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(1): 134-142.
- [23] Vahala K J. Optical microcavities[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 839-846.
- [24] Zou C L, Dong C H, Cui J M, et al. Whispering gallery mode optical micro-resonator: foundation and application[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2012, 42(11): 1155-1175.  
邹长铃, 董春华, 崔金明, 等. 回音壁模式光学微腔: 基础与应用[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2012, 42(11): 1155-1175.
- [25] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [26] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [27] Painter O, Lee R K, Scherer A, et al. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser[J]. *Science*, 1999, 284(5421): 1819-1821.
- [28] Sun S, Kim H, Solomon G S, et al. Strain tuning of a quantum dot strongly coupled to a photonic crystal cavity[C]//*CLEO: QELS Fundamental Science 2014*, June 8-13, 2014, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2014: FF1K.7.
- [29] Robinson S, Nakkeeran R. Investigation on two dimensional photonic crystal resonant cavity based bandpass filter[J]. *Optik*, 2012, 123(5): 451-457.
- [30] Mahmoud M Y, Bassou G, Taalbi A, et al. Optical channel drop filters based on photonic crystal ring resonators[J]. *Optics Communications*, 2012, 285

- (3): 368-372.
- [31] Zhao C Y, Gan X T, Liu S, et al. Generation of vector beams in planar photonic crystal cavities with multiple missing-hole defects[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9360-9367.
- [32] Richtmyer R D. Dielectric resonators[J]. *Journal of Applied Physics*, 1939, 10(6): 391-398.
- [33] Garrett C G B, Kaiser W, Bond W L. Stimulated emission into optical whispering modes of spheres[J]. *Physical Review*, 1961, 124(6): 1807-1809.
- [34] McCall S L, Levi A F J, Slusher R E, et al. Whispering-gallery mode microdisk lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 60(3): 289-291.
- [35] Levi A F J, McCall S L, Pearton S J, et al. Room temperature operation of submicrometre radius disk laser[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(18): 1666-1667.
- [36] Miao P, Zhang Z F, Sun J B, et al. Orbital angular momentum microlaser[J]. *Science*, 2016, 353(6298): 464-467.
- [37] Ma X, Chen Q A, Lu Q Y, et al. Grating-assisted microcylinder surface-emitting laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(21): 4999-5006.
- [38] Ma X, Zheng S, Chen Q A, et al. High-speed directly modulated cylindrical vector beam lasers[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(12): 3261-3270.
- [39] Miyai E, Sakai K, Okano T, et al. Lasers producing tailored beams[J]. *Nature*, 2006, 441(7096): 946.
- [40] Hwang J K, Ryu H Y, Song D S, et al. Room-temperature triangular-lattice two-dimensional photonic band gap lasers operating at 1.54  $\mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(21): 2982-2984.
- [41] Abe H, Narimatsu M, Watanabe T, et al. Living-cell imaging using a photonic crystal nanolaser array[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17056-17066.
- [42] Xiong Z G. Generation and modulation of OAM modes based on photonic crystal microcavity[J]. *Journal of Nanjing Xiaozhuang University*, 2019, 35(6): 14-17.  
熊志刚. 基于光子晶体微腔的 OAM 模产生和调控[J]. *南京晓庄学院学报*, 2019, 35(6): 14-17.
- [43] Fujita M, Baba T. Microgear laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(12): 2051-2053.
- [44] Cai X L, Wang J W, Strain M J, et al. Integrated compact optical vortex beam emitters[J]. *Science*, 2012, 338(6105): 363-366.
- [45] Strain M J, Cai X L, Wang J W, et al. Fast electrical switching of orbital angular momentum modes using ultra-compact integrated vortex emitters[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4856.
- [46] Li H L, Strain M J, Meriggi L, et al. Pattern manipulation via on-chip phase modulation between orbital angular momentum beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(5): 051102.
- [47] Mock A, Sounas D, Alù A. Tunable orbital angular momentum radiation from angular-momentum-biased microcavities[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(10): 103901.
- [48] Zambon N C, St-Jean P, Milićević M, et al. Optically controlling the emission chirality of microlasers[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(4): 283-288.
- [49] Zhang Z F, Qiao X D, Midya B, et al. Tunable topological charge vortex microlaser[J]. *Science*, 2020, 368(6492): 760-763.
- [50] Cognée K G, Doeleman H M, Lalanne P, et al. Generation of pure OAM beams with a single state of polarization by antenna-decorated microdisk resonators[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(11): 3049-3060.
- [51] Iwahashi S, Kurosaka Y, Sakai K, et al. Higher-order vector beams produced by photonic-crystal lasers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 11963-11968.
- [52] Chen M L N, Jiang L J, Sha W E I. Generation of orbital angular momentum by a point defect in photonic crystals[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10: 014034.
- [53] Schulz S A, Machula T, Karimi E, et al. Integrated multi vector vortex beam generator[J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 16130-16141.
- [54] Suzuki S, Shuto K, Hibino Y. Integrated-optic ring resonators with two stacked layers of silica waveguide on Si[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 4(11): 1256-1258.
- [55] Hayenga W E, Parto M, Ren J H, et al. Direct generation of tunable orbital angular momentum beams in microring lasers with broadband exceptional points[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(8): 1895-1901.
- [56] Zhang D K, Feng X, Huang Y D. Encoding and decoding of orbital angular momentum for wireless optical interconnects on chip[J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26986-26995.
- [57] Wang Y, Feng X, Zhang D, et al. Generating optical superimposed vortex beam with tunable orbital angular momentum using integrated devices[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10958.
- [58] Xiao Q S, Klitis C, Li S M, et al. Generation of

- photonic orbital angular momentum superposition states using vortex beam emitters with superimposed gratings[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3168-3176.
- [59] Shao Z K, Zhang Y F, Li S M, et al. Integrated orbital angular momentum emitters based on silicon nitride photonic platform[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2016, November 2-5, 2016, Wuhan. Washington, D.C.: OSA, 2016: AF4E.4.
- [60] Xu Y H. Integrated the OAM beam emitter model simulation analysis of purity[J]. *Electronic Test*, 2015(3): 48-50.  
徐延海. 集成 OAM 光束发射器模式纯度仿真分析[J]. *电子测试*, 2015(3): 48-50.
- [61] Chen X L. Research of integrated photonic devices to generate and measure orbital angular momentum beams[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017: 1-68.  
陈小林. 轨道角动量光束产生和测量的集成光子器件研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 1-68.
- [62] Shao Z K, Zhu J B, Zhang Y F, et al. On-chip switchable radially and azimuthally polarized vortex beam generation[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1263-1266.
- [63] Zheng S, Ma X, Chen Q A, et al. Concentric microcavities for cylindrical vector beam lasers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2211-2214.
- [64] Zhang J, Sun C Z, Xiong B, et al. An InP-based vortex beam emitter with monolithically integrated laser[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2652.
- [65] Li R, Feng X, Zhang D K, et al. Radially polarized orbital angular momentum beam emitter based on shallow-ridge silicon microring cavity[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(3): 1-10.
- [66] Li S M, Ding Y H, Guan X W, et al. Compact high-efficiency vortex beam emitter based on a silicon photonics micro-ring[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1319-1322.
- [67] Iwahashi S, Sakai K, Kurosaka Y, et al. Centered-rectangular lattice photonic-crystal surface-emitting lasers[J]. *Physical Review B*, 2012, 85(3): 035304.