

《物理学报》创刊 90 周年·封面文章

轨道角动量量子光源的集成化研究*

陈波 刘进 李俊韬 王雪华†

(中山大学物理学院, 光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2024 年 6 月 4 日收到; 2024 年 7 月 5 日收到修改稿)

量子光源是量子信息处理的关键器件之一, 是量子计算、量子通信、量子模拟等应用的重要基础, 基于量子光源制备量子态并提升其编码容量是量子信息技术发展的重大挑战. 轨道角动量 (OAM) 是光子一种无限维的空间自由度, 其空间模式构成无限维完备的正交基, 利用 OAM 制备高维量子态可大幅提升量子信息处理容量, 是高维量子信息处理的关键资源. 随着光量子技术的进步, 多种重要光量子器件已可在集成化芯片上实现. 然而, 微纳尺度下制备高维 OAM 量子态仍是实现量子光源集成化的挑战, 亟需深入研究和突破. 本文综述并讨论了集成化 OAM 量子光源的研究进展及其研究中面临的热点和难点问题, 为推进高维量子光源在量子信息处理中的研究及实用化进程提供参考.

关键词: 轨道角动量, 量子光源, 集成化, 高维量子态

PACS: 42.50.Tx, 42.50.Dv, 42.79.-e, 42.50.Ex

DOI: 10.7498/aps.73.20240791

1 引言

量子光学是目前国际上最前沿、最活跃的研究领域之一, 随着量子实用化的不断推进, 开发以光量子为基础的研究和应用已经引起了广泛的关注. 以光子为信息载体的操控平台可以实现光量子态在偏振、频率、路径、时间、能量和角动量等^[1,2]多个自由度上进行信息编码, 而且不同维度的光信号互不影响, 基于不同自由度及其组合可实现对光量子态的制备和操控并构建高维量子体系, 不仅可以极大地提高量子信息的容量, 还可以提高光子的利用率. 其中轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 作为光子一个无限高维的空间自由度, 其空间模式分布会形成无限维完备的希尔伯特空间正交基, 不同 OAM 模式的光束具有不同的相位分布 $\exp(il\varphi)$, 其中 φ 为方位角, l 是轨道角动量量子数, 在空间上表现为螺旋形的波前. 如图 1 所示, 不同

于偏振态仅能在二维希尔伯特空间实现量子态比特 (qubit) 编码, 轨道角动量的量子数 l 在理论上可以取任意整数, 以光子轨道角动量作为信息的载

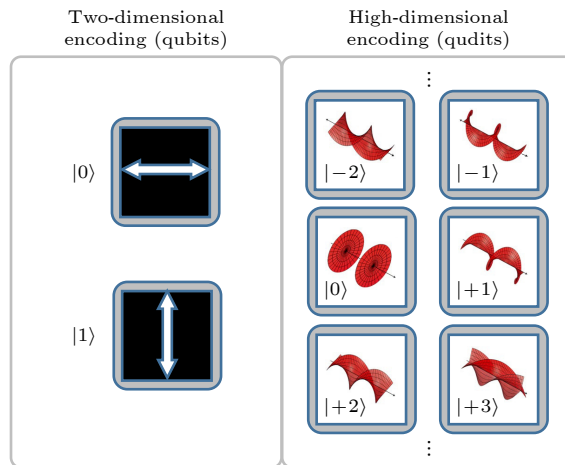


图 1 二维偏振编码和高维轨道角动量编码维度的对比
Fig. 1. Comparison of two-dimensional polarization coding and high-dimensional orbital angular momentum coding dimensions for photons.

* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFA1400800)、国家自然科学基金 (批准号: 12104522, 62035017) 和广东省自然科学基金 (批准号: 2022A1515011400) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangxueh@mail.sysu.edu.cn

体来编码信息,能够大大增加传输的信息容量,可以实现希尔伯特空间中高维量子态 (qudits) 编码,且具有更好的保密性,是构建高维量子体系的重要资源.

自 1992 年荷兰莱顿大学 Allen 等^[3]首次证实光子携带轨道角动量,这一新物理自由度的发现开始成为光学领域的一个研究热点.随后基于模式变换法、螺旋相位板、空间光调制器以及 Q-plate 等^[4]不同的光学元件均实现了 OAM 光束的产生.作为一种新的光学自由度,光子的 OAM 已经在光学微操控、光学显微镜、光通信和量子信息处理等^[5]多个领域得到了广泛的研究和应用.同时,OAM 具有可高维编码特性,为光学和量子技术的发展开辟了新的方向,对 OAM 的研究不仅有助于提高光学设备的性能,还为量子信息领域的创新提供了新的可能性.携带 OAM 的量子光源在高维量子纠缠^[6,7]、长距离高维量子密钥分发^[8,9]以及隐形量子态的传输^[10]等都有极大的潜在应用.

在前期的研究中,制备高维 OAM 量子态的体系中使用的传统体光学元件由于体积大、稳定性差、元件分散等缺点,在复杂的光量子信息处理方案中存在着很大的局限性.随着光量子技术的进步,多种重要的光量子器件已可在集成化芯片上实现.在量子光源研究中,小型化和集成化成为近年来备受关注的研究方向,实现量子光源集成化面临的挑战是要克服传统光学系统限制、提高器件性能和实现实际应用,亟需深入研究和突破.

无论在基础研究还是应用研究上,在产生高效按需可控的高维量子光源研究方面均存在亟须解决的关键科学问题和技术瓶颈.本文将针对轨道角动量量子光源集成化过程中高维量子态制备方面的研究进行总结,并分析现阶段高维量子光源在小型化、集成化方面面临的挑战和机遇,为加速高维量子光源在量子信息处理中的研究及实用化进程提供参考.

2 集成化的轨道角动量单光子源

单光子是一种不可再分的光场基本单元.利用单光子进行量子信号处理时原理上任何攻击者都不能从信号中窃取部分信号而不破坏原有的信息,因此具有极高的安全性.单光子源在量子随机数产生、量子密钥分发、光量子模拟与计算等方面有重

要的应用.理想的单光子源在被激光或电脉冲触发时,会确定性地产生单个光子,在量子光学实验中,一般制备单光子态的主要方法有衰减激光光源,利用非线性材料中自发非线性光学过程和基于不同原子或类原子的二能级系统自发辐射产生单光子^[11].

随着集成光学技术的进步,单光子携带轨道角动量的小型化、集成化研究逐渐引起了人们的关注.2012年,Cai等^[12]首次在硅基平台制备了内壁嵌入二阶角向微纳光栅的微环谐振腔,实现了微纳尺度下携带不同轨道角动量涡旋光束的阵列发射.在该方案的基础上,研究人员实现了微环谐振腔在芯片上产生轨道角动量出射的激光光源^[13,14].直到2021年,Chen等^[15]利用荧光成像精确定位技术和微纳加工技术,将固态半导体单量子点置入角向光栅微环谐振腔中,实现了微环谐振腔产生轨道角动量单光子源结构.如图2(a)所示,把量子点放置于内壁嵌入二阶角向光栅的微环谐振腔波导内部,微环谐振腔的回音壁模式被角向光栅调制之后,会以螺旋传播方式被散射到自由空间,从而实现轨道角动量光子的产生.同时,量子点在微环谐振腔内辐射出的光子也会受到腔的调制,由于量子电动力学效应会改变量子体系的自发辐射速率,该系统实现了2倍的Purcell增强,出射的单光子纯度接近90%,且携带了 $| -6 \rangle + | +6 \rangle$ 的轨道角动量叠加态,该实验实现了不利用外部干涉器件直接检测出出射的单光子轨道角动量量子态的维度信息.同时,利用液晶空间光调制器解调,在实验上测到的单光子 OAM 量子态 $| -6 \rangle$ 和 $| +6 \rangle$ 的纯度约为 36.4% 和 38%,分别达到了仿真结果的 77% 和 80%.该研究是首次在芯片上实现触发式单光子携带轨道角动量发射,为推进量子光源按需调控和高维量子信息处理迈出了非常重要的一步.

利用类似的微环谐振腔,Zhao等^[16]将二维材料 WSe₂ 与带角向光栅的微环谐振腔混合集成,实现了单向轨道角动量出射的单光子源,如图2(b)所示,单光子纯度约 87%,腔增强后的量子产率约 76%,单向 OAM 模式纯度高达 96.9%.利用硅的非线性效应结合微环谐振腔,如图2(c)所示,Zhang等^[17]展示了具有可切换轨道角动量模式的预报式单光子源,把单光子携带轨道角动量模式的波长拓展到了红外通讯波段.结合阿基米德螺旋微纳光栅和金刚石色心,如图2(d)所示,Wu等^[18]在室温下实现了轨道角动量单光子源,单光子纯度约为 85%.

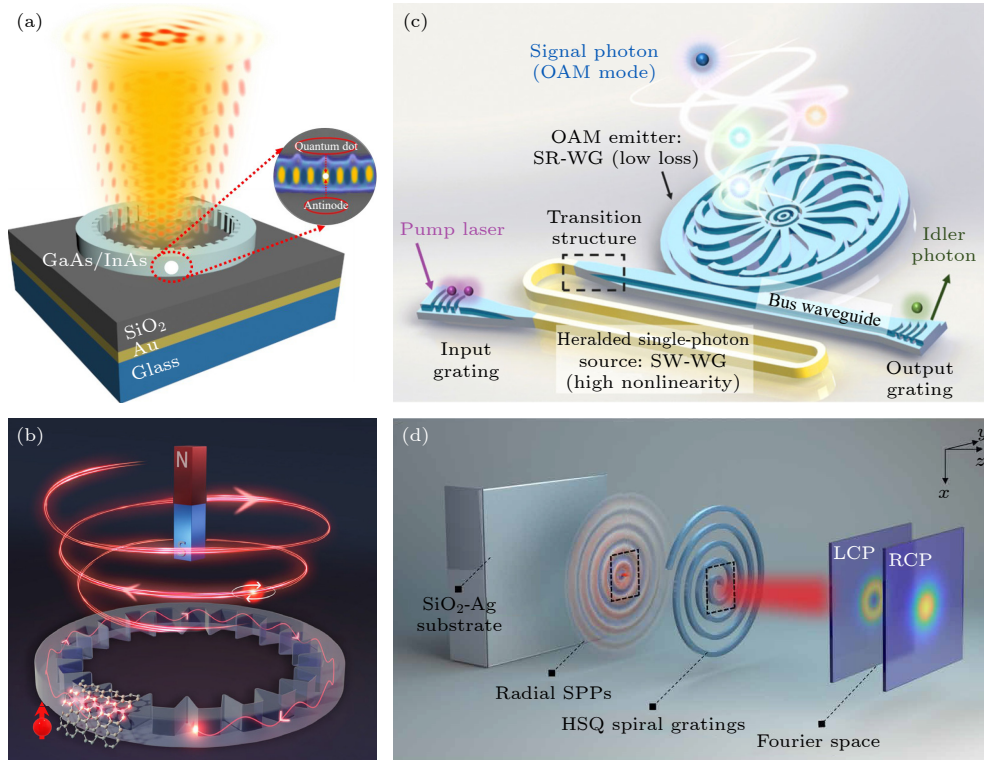


图 2 微纳尺度下轨道角动量单光子源实现方案 (a) 嵌入量子点的微环谐振腔产生轨道角动量量子叠加态的单光子源^[15]; (b) 二维材料与微环谐振腔的混合集成实现可调谐的轨道角动量单光子源^[16]; (c) 片上集成预报式可调轨道角动量单光子源^[17]; (d) 金刚石色心与阿基米德螺旋光栅集成化轨道角动量单光子源^[18]

Fig. 2. Schemes of orbital angular momentum single-photon sources at nanoscale: (a) Microring resonators embedded with quantum dots for the generation of single photons carrying quantum superposition states of OAM^[15]; (b) the on-chip switchable twisted single photon source by hybrid integration of monolayer WSe₂ and a microring resonator^[16]; (c) the integrated heralded single-photon source with switchable OAM modes^[17]; (d) the OAM single-photon source operation in layer-by-layer integration^[18].

上述在微纳尺度下制备轨道角动量单光子源的代表性工作, 为小型化、集成化的片上高维量子光源研究开拓了新的思路和方法, 为推进量子光源的按需调控迈出了非常重要的一步. 这些器件与现代半导体加工工艺兼容, 具有器件尺寸小, 可集成、可扩展的优势. 但是光量子信息技术所需要的完美单光子源, 要同时满足确定性、高纯度、高全同性和高效率这些严苛的条件, 目前制备的高维 OAM 单光子态虽然取得了初步的进展, 但其品质还远不能满足实用化需要. 制备高维 OAM 量子态的研究还面临着长期的挑战, 需要研究人员继续深入研究和探索.

3 集成化的轨道角动量纠缠光源

量子纠缠是量子信息中的核心资源, 制备纠缠态量子光源是实现量子信息处理的基础, 纠缠态的产生可以分为光子对纠缠和多光子纠缠, 实验上制

备量子纠缠态的方法主要有离子阱, 非线性晶体的自发参量下转换 (SPDC) 及四波混频过程等. 由于光子的并行性, 在高维的量子系统中利用光子进行编码, 可简化逻辑运算的复杂程度, 而光子轨道角动量自由度正是高维量子信息的理想载体, 产生高维轨道角动量纠缠态可以很方便地实现这一目标.

2001 年, Mair 等^[19] 利用 BBO 晶体的自发参量下转换验证了光子携带轨道角动量的纠缠特性, 首次实现了光子角动量在量子信息技术中的应用. 2010 年, Leach 等^[20] 验证了角位移和角动量两个共轭量之间的量子关联, 为实现复杂的量子网络编码带来了新的机遇. 2012 年, Fickler 等^[7] 通过干涉法将偏振纠缠转换到 OAM 中, 产生并验证了光子的高维轨道角动量纠缠. 该方法首先基于第二类相位匹配制备了高保真的二维偏振纠缠态:

$$|\Psi_{in}\rangle = [\alpha|H\rangle|V\rangle + \beta\exp(i\varphi)|V\rangle|H\rangle] \otimes |0\rangle|0\rangle, \quad (1)$$

其中 H 和 V 分别代表水平和垂直偏振; 0 表示用

单模光纤滤出的 OAM $l = 0$ 的光子. 然后给水平和垂直偏振的光子分别加载 $+l$ 和 $-l$ 的 OAM, 在干涉仪的出射端利用 45° 偏振片擦除偏振态的关联信息, 从而制备出高维的 OAM 纠缠态:

$$|\Psi_{\text{out}}\rangle = |D\rangle|D\rangle \otimes [\alpha|+l\rangle - l\rangle + \beta \exp(i\varphi)|-l\rangle + l\rangle]. \quad (2)$$

此方案中他们制备出 OAM 量子态的量子数高达 $l = \pm 300$. 2016 年, Fickler 等^[21] 又实现了高达 10010 量子数的 OAM 量子纠缠态, 为高维轨道角动量纠缠态的制备和应用做出了突出的贡献.

在国内, 郭光灿院士领导的研究团队利用光子的轨道角动量进行了一系列开创性的工作^[22-24]. 2007 年, 张沛等^[25] 利用光子的轨道角动量演示了量子随机行走. 之后, Zhou 等^[26,27] 实现了 OAM 纠缠光子以及 OAM 与偏振组成的混合纠缠光子的频率转换, 证明了在频率变换过程中单光子的量子相干性和光子对的纠缠特性保持不变. 2015 年,

汪喜林等^[28] 利用光子的 OAM 作为一个纠缠自由度, 产生了 18 个量子比特的光子纠缠系统. 这些工作对实现不同波长的 OAM 量子网络的对接和量子信息交互及编码具有重要意义.

虽然高维轨道角动量纠缠的研究已经有很多工作基础, 但是轨道角动量纠缠光源的小型化和集成化还面临着极大的挑战. 近几年, 随着微纳加工工艺的发展, 人们可以精确地制备大规模纳米尺度的超构表面, 实现对光多自由度的调控. 超构表面的发展为微纳尺度下调控轨道角动量光场带来了新的手段.

2018 年, Stav 等^[29] 利用超构表面实现了光子的自旋角动量和轨道角动量之间的转换和纠缠. 如图 3(a) 所示, 当线偏振光通过超构表面后产生自旋角动量和轨道角动量, 其态的转换可以表示为 $|\sigma_{\pm}\rangle|l\rangle \rightarrow |\sigma_{\mp}\rangle|l \pm \Delta l\rangle$, 其中 $|\sigma_{+}\rangle, |\sigma_{-}\rangle, l, \Delta l$ 分别表示右旋、左旋、入射的轨道角动量数和出射的轨

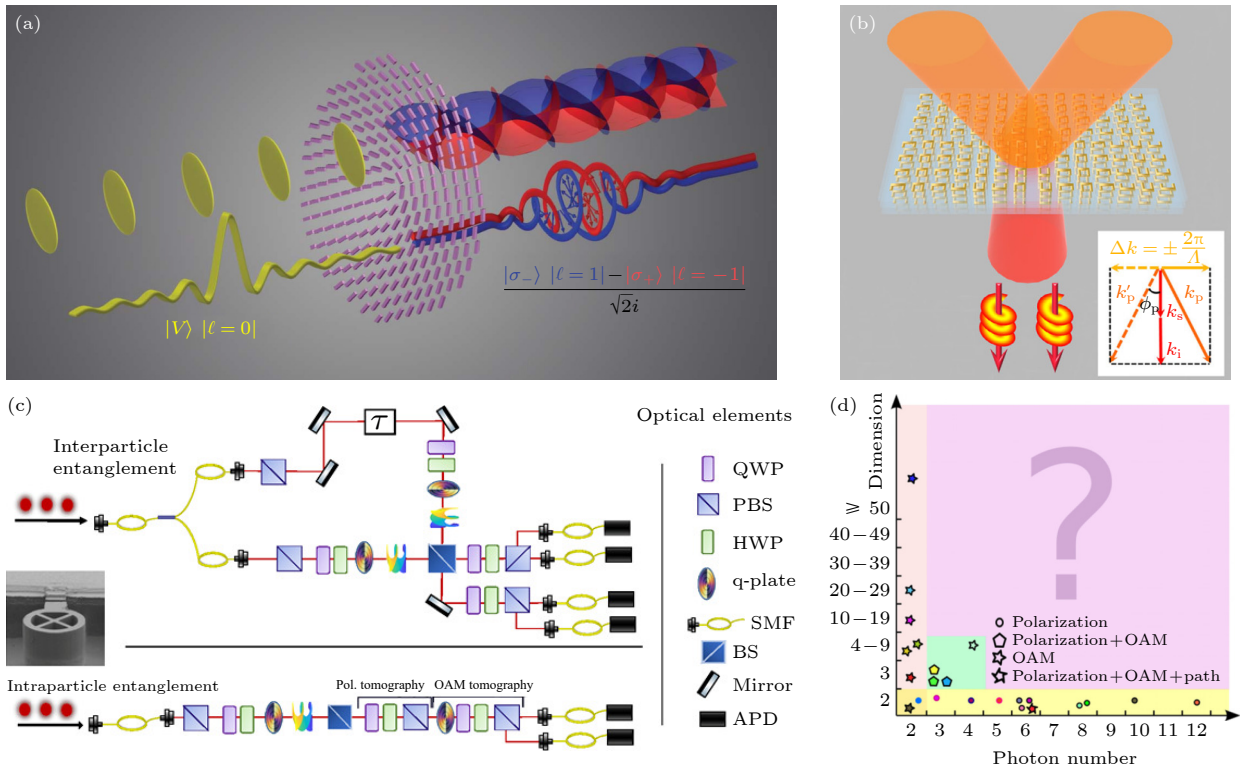


图 3 (a) 基于超构表面制备光子自旋角动量与轨道角动量之间的量子纠缠态^[29]; (b) 基于叉形光栅非线性等离子体超构表面的非线性参量下转换过程产生的轨道角动量纠缠态^[30]; (c) 利用量子点单光子源产生基于轨道角动量粒子内和粒子间纠缠态^[31]; (d) 多光子高维纠缠态的制备方法对比及待开发领域^[32]

Fig. 3. (a) Entanglement between spin and OAM on a single photon by using a dielectric metasurface^[29]; (b) the generation of OAM entangled state with fork-shaped metamaterials by parametric down conversion process in the nonlinear metamaterial^[30]; (c) orbital angular momentum based intra- and interparticle entangled states generated via a quantum dot source^[31]; (d) high-dimensional multiphoton entanglement process and a tremendous void that is yet to be filled^[32].

道角动量数. 通过测量产生光子的自旋和轨道角动量纠缠的四种 Bell 态密度矩阵及纠缠光子对在自旋角动量和轨道角动量之间的相关性, 验证了经过超表面后产生的自旋和轨道角动量之间的非局域纠缠. 2020 年, Ming 等^[30]研究了基于叉形光栅非线性等离子体超构表面的非线性参量下转换过程产生的光子纠缠和调制. 通过灵活的纳米结构设计, 如图 3(b) 所示, 制备出的超构表面可以产生纠缠光子对, 并控制产生轨道角动量纠缠态.

利用超表面对非线性过程产生的纠缠光子波前进行集成化的调控, 可以满足量子光学系统小型化的需要, 但是量子光源还是利用产生非线性过程的体材料晶体, 阻碍了小型化的进程. 2023 年, Suprano 等^[31]利用片上集成化的微柱量子点单光子源制备了基于轨道角动量粒子内和粒子间纠缠态, 如图 3(c) 所示, 实验测出粒子内和粒子间轨道角动量纠缠态保真度分别达到了 97.14% 和 93.50%, 该方案为基于片上量子光源制备纠缠态提供了新的思路.

在现有集成化轨道角动量纠缠光源实现方案中, 主要集中在超表面对 OAM 相位的调控方面, 为集成化的纠缠光源提供了一种初步的解决方案, 但是和其他芯片上的调制器件兼容性还需要进一步探索, 同时其调控的 OAM 量子数受到一定的限制, 制备的纠缠态维度均局限在低阶 OAM 模式纠缠, 没有发挥出 OAM 高维的优势. 如图 3(d) 所示^[32], 在高维量子信息应用中, OAM 是构建高维量子态的最佳自由度之一, 基于 OAM 自由度的高维纠缠态仍需待开发, OAM 自由度结合多光子和其他自由度可以极大地提升纠缠态的维度, 实现更多自由度的高维纠缠量子光源. 集成化的 OAM 纠缠态量子光源在原理、技术到应用等各个方向都存在诸多空白地带, 仍需进一步探索. 一种潜在的集成化方案是基于片上微环谐振腔, 在微环谐振腔中频率纠缠已经实现了高维调控^[33], 但是片上产生 OAM 纠缠光源还需要进一步探索. 近期, Chen 等^[34]在微环谐振腔中联合开发频率和轨道角动量两个自由度得到轨道角动量频率梳, 实现了片上 OAM 的高维制备, 在此基础上可进一步开发并制备多光子 OAM 高维纠缠态, 是实现集成化轨道角动量纠缠态量子光源一种极具潜力的方案, 有望推进片上集成化量子光源的研究, 并在基础量子物理

研究和高维量子信息应用中发挥独特作用.

4 总结与展望

利用微腔、超构表面等微纳结构, 目前研究人员已经初步研究了产生高维轨道角动量量子光源, 并对单光子和纠缠光子等量子态进行调控. 但前期的工作仍存在很多缺陷, 比如利用非线性效应制备 OAM 量子态存在一定的概率性, 效率不高, 其纯度也还需要进一步提升. 在集成化方面, 只是验证了 OAM 量子态在单个器件上的调控, 对大规模和其他片上器件集成在一起还面临着长期的挑战.

总体而言, 小型化和集成化的量子光源对于量子信息处理的发展至关重要, 它们为提高量子系统的稳定性、降低噪声、提高操作效率和实现复杂的量子电路奠定了基础. 而且, 量子器件的小型化和集成化趋势不仅推动了科学的前沿, 也促使了量子技术从实验室走向实际应用的转变. 如何利用微纳结构, 进一步将量子光源高效耦合进入芯片, 探索基于量子信息技术的微纳光电子集成芯片, 仍具有较大的挑战和机遇, 是未来量子信息处理研究及实用化的重要研究方向.

参考文献

- [1] Flamini F, Spagnolo N, Sciarrino F 2018 *Rep. Prog. Phys.* **82** 016001
- [2] Erhard M, Krenn M, Zeilinger A 2020 *Nat. Rev. Phys.* **2** 365
- [3] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [4] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. 2015 *Adv. Opt. Photonics* **7** 66
- [5] Shen Y, Wang X, Xie Z, et al. 2019 *Light-Sci. Appl.* **8** 90
- [6] Romero J, Giovannini D, Franke-Arnold S, et al. 2012 *Phys. Rev. A* **86** 012334
- [7] Fickler R, Lapkiewicz R, Plick W N, et al. 2012 *Science* **338** 640
- [8] Krenn M, Handsteiner J, Fink M, Zeilinger A 2015 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **112** 14197
- [9] Krenn M, Handsteiner J, Fink M, et al. 2016 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **113** 13648
- [10] Sit A, Bouchard F, Fickler R, et al. 2017 *Optica* **4** 1006
- [11] Migdall A, Polyakov S V, Fan J, Bienfang J C 2013 *Single-photon Generation and Detection: Physics and Application* (Oxford: Academic Press)
- [12] Cai X, Wang J, Strain M J, et al. 2012 *Science* **338** 363
- [13] Miao P, Zhang Z, Sun J, et al. 2016 *Science* **353** 464
- [14] Zhang J, Sun C, Xiong B, et al. 2018 *Nat. Commun.* **9** 2652
- [15] Chen B, Wei Y, Zhao T, et al. 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 302
- [16] Zhao H, Ma Y, Gao Z, et al. 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 183801
- [17] Zhang S, Li S, Feng X, et al. 2021 *Photonics Res.* **9** 1865

- [18] Wu C, Kumar S, Kan Y, et al. 2022 *Sci. Adv.* **8** eabk3075 103601
- [19] Mair A, Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2001 *Nature* **412** 313 [27] Zhou Z Y, Li Y, Ding D S, et al. 2016 *Light-Sci. Appl.* **5** e16019
- [20] Leach J, Jack B, Romero J, et al. 2010 *Science* **329** 662 [28] Wang X L, Cai X D, Su Z E, et al. 2015 *Nature* **518** 516
- [21] Fickler R, Campbell G, Buchler B, et al. 2016 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **113** 13642 [29] Stav T, Faerman A, Maguid E, et al. 2018 *Science* **361** 1101
- [22] Zhang W, Ding D S, Dong M X, et al. 2016 *Nature Commun.* **14** 13514 [30] Ming Y, Zhang W, Tang J, et al. 2020 *Laser Photonics Rev.* **14** 1900146
- [23] Liu S L, Zhou Q, Zhou Z Y, et al. 2019 *Phys. Rev. A* **100** 013833 [31] Suprano A, Zia D, Pont M, et al. 2023 *Adv. Photonics* **5** 046008
- [24] Cao H, Gao S C, Zhang C, et al. 2020 *Optica* **7** 232 [32] Forbes A, Nape I 2019 *AVS Quantum Sci.* **1** 011701
- [25] Zhang P, Ren X F, Zou X B, et al. 2007 *Phys. Rev. A* **75** 052310 [33] Kues M, Reimer C, Lukens J M, et al. 2019 *Nat. Photonics* **13** 170
- [26] Zhou Z Y, Liu S L, Li Y, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** [34] Chen B, Zhou Y, Liu Y, et al. 2024 *Nat. Photonics* **18** 625

The 90th Anniversary of *Acta Physica Sinica*: COVER ARTICLE

Research progress of integrated quantum light sources with orbital angular momentum*

Chen Bo Liu Jin Li Jun-Tao Wang Xue-Hua[†]

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Physics,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

(Received 4 June 2024; revised manuscript received 5 July 2024)

Abstract

Quantum light sources are one of key devices for quantum information processing, and they are also the important foundation for applications such as in quantum computing, quantum communication, and quantum simulation. Improving the capacity of quantum information coding by using the quantum light source is a major challenge in the development of quantum information technology. Photons with a helical phase front can carry a discrete, unlimited but quantized amount of orbital angular momentum (OAM). The infinite number of states with different OAMs can greatly increase the capacity of optical communication and information processing in quantum regimes. To date photons carrying OAM have mainly been generated by using bulk crystals, which limits the efficiency and the scalability of the source. With the advancement of quantum photonic technology, many significant quantum photonic devices can now be realized on integrated chips. However, creating high-dimensional OAM quantum states at a micro-nano scale is still a challenge. And the research of harnessing high-dimensional OAM mode by using integrated quantum photonic technologies is still in its infancy. Here, the authors review the recent progress and discuss the integrated quantum light sources with OAM. The authors introduce the research progress of using OAM for both single photons and entangled photons and emphasize the exciting work on pushing boundaries in high-dimensional quantum states. This may pave the way for the research and practical applications of high-dimensional quantum light sources.

Keywords: orbital angular momentum, quantum light source, integration, high-dimensional quantum state

PACS: 42.50.Tx, 42.50.Dv, 42.79.-e, 42.50.Ex

DOI: 10.7498/aps.73.20240791

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2021YFA1400800), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12104522, 62035017), and the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2022A1515011400).

[†] Corresponding author. E-mail: wangxueh@mail.sysu.edu.cn



轨道角动量量子光源的集成化研究

陈波 刘进 李俊韬 王雪华

Research progress of integrated quantum light sources with orbital angular momentum

Chen Bo Liu Jin Li Jun-Tao Wang Xue-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 164204 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240791

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240791>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海洋湍流对光子轨道角动量量子通信的影响

Effects of ocean turbulence on photon orbital angular momentum quantum communication

物理学报. 2022, 71(1): 010304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211146>

基于光束偏移器的光的轨道角动量分束器

Orbital angular momentum splitter of light based on beam displacer

物理学报. 2024, 73(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231874>

三维空间轨道角动量全息

Three-dimensional spatial orbital angular momentum holography

物理学报. 2024, 73(9): 094202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231822>

基于双层超表面的宽带、高效透射型轨道角动量发生器

Wideband and high efficiency orbital angular momentum generator based on bi-layer metasurface

物理学报. 2021, 70(3): 038101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200975>

基于平面相控阵的轨道角动量涡旋电磁波扫描特性

Beam steering of orbital angular momentum vortex wave based on planar phased array

物理学报. 2021, 70(23): 238401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211119>

螺旋扭曲双包层-三芯光子晶体光纤用于轨道角动量的生成

Helically twisted double-cladding-three-core photonic crystal fiber for generation of orbital angular momentum

物理学报. 2023, 72(13): 134201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222405>