

# 拓扑保护的集成量子纠缠光源

戴天祥<sup>1</sup> 胡小永<sup>1,2,3</sup> 龚旗煌<sup>1,2,3</sup> 王剑威<sup>1,2,3,†</sup>

(1 北京大学 人工微结构和介观物理国家重点实验室 北京 100871)

(2 北京大学 教育部纳光电子前沿科学中心 量子物质科学协同创新中心 北京 100871)

(3 北京大学 长三角光电科学研究院 南通 226010)

2022-03-16收到

† email: jww@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220407

量子信息<sup>[1]</sup>与拓扑物理学<sup>[2]</sup>是由量子力学衍生而来的两个全然不同的重要学科分支,其中量子纠缠与拓扑相既是基础物理研究的核心内容,也是前沿技术发展的关键物理资源。量子纠缠是量子计算、量子模拟和量子通信等应用中的关键资源,约20个量子比特的量子纠缠态已在光子、超导、离子和原子等体系实现。然而,量子纠缠本身对环境噪声敏感的特点,以及其对量子器件加工和调控精度的高要求,都在一定程度上限制了其实际应用。另一方面,拓扑相的物理概念源自强磁场下二维电子气系统观察到的整数量子霍尔效应,近年来被拓展到了光学、声学 and 冷原子等体系,并且大放异彩。拓扑所具有的鲁棒性给予了拓扑边界态在对称性保护下的抗缺陷和抗不完美的能力。因此,利用拓扑鲁棒性保护量子纠缠态,对研究含噪声量子计算、大规模集成量子器件和大尺度量子计算机,以及研究量子体系的新拓扑物理和现象等,均具有重要意义。

目前,制备出具有拓扑保护性质的量子纠缠态仍面临着诸多挑战。在电子体系中,拓扑保护

量子态的制备对器件本身的复杂度有较高要求,在实验环境上需要较强磁场来产生非平庸拓扑相,并在毫开尔文(mK)温度和极高的真空度下完成量子态的制备。相较之下,拓扑光子学和集成光量子体系的融合提供了另一种可能性。目前,拓扑光子学与量子光学的结合已经取得了重要成果,包括基于一维 Su—Schrieffer—Heeger(SSH)模型和基于二维整数量子霍尔效应的拓扑保护光子对源<sup>[3,4]</sup>,拓扑保护的可调量子干涉<sup>[5]</sup>等。在此基础上,我们基于互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺的硅基光量子芯片,通过设计多个微环腔相互耦合,形成光学反常弗洛凯(Floquet)拓扑绝缘体,从而制备出具有拓扑保护性质的量子纠缠光源<sup>[6]</sup>(图1)。

光学反常弗洛凯拓扑绝缘体的形成依托于耦合连接环的类晶格周期性结构<sup>[7]</sup>。将完全相同的半径为61 μm的硅波导光学微环腔周期性排布,根据其空间位置分为主环与连接环,主环按照正方形晶格排布,两近邻主环之间通过一个连接环进行倏逝波耦合,环与环之间的耦合强度相同。

由于光在主环内有顺时针与逆时针两种绕向,可根据光的绕向不同将光学模式分为赝自旋向上与赝自旋向下两类,彼此之间相互正交。从时域传输的角度,光在微环中的耦合与传输过程具有周期性,主环中光子与周围的4个连接环耦合并周期性重复,因此可以被理解为周期性时域调制。在环间保持强耦合时,其有效哈密顿量对应的能带在单个周期内表现出三个体态区域,而在每一个带间区域,即使没

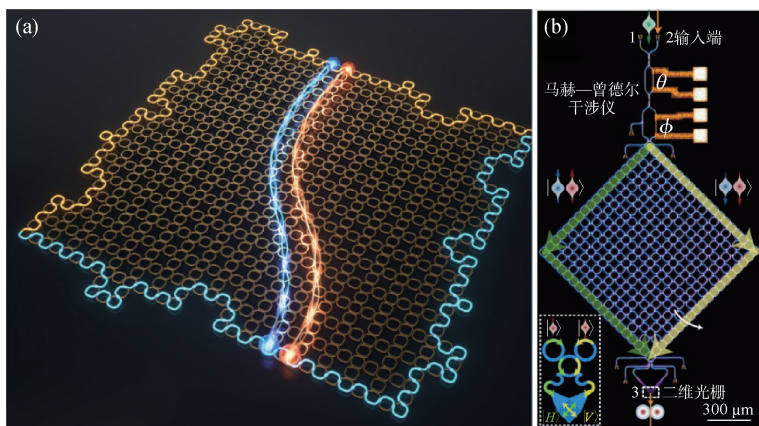


图1 拓扑保护的集成量子纠缠光源概念示意图(a)与器件图(b)<sup>[6]</sup>

有外加磁场,也会产生一对色散反向的拓扑边界态。边界模式的拓扑性质可以通过拓扑不变量绕数(winding number)来描述。即使存在一定的加工误差或人为制造的环缺失和增加,也不会发生能带闭合后再打开的情况,因此器件整体的拓扑性质不发生变化,带间区域拓扑边界态依旧存在,仍可以保证光子的理想运输,与之相反,体态区域则表现出极大的随机性。

在外界泵浦光激发拓扑边界模式时,器件成为良好的四波混频量子光源。四波混频过程需要吸收两个泵浦光子,并同时产生一个信号光子和一个闲频光子,光子间需要满足能量守恒和波矢

匹配条件。硅材料本身具有较高的三阶非线性系数,同时由于拓扑边界态的线性色散关系,使得当泵浦光的频率处于拓扑边界模式时,在满足能量守恒  $\omega_{p1} + \omega_{p2} = \omega_s + \omega_i$  的条件下,对应的信号光子和闲频光子的频率如果也处于拓扑边界模式的频率范围内,那么波矢匹配条件  $k(\omega_{p1}) + k(\omega_{p2}) = k(\omega_s) + k(\omega_i)$  将自动满足,因而可高效地产生单光子对。通过控制前置马赫—曾德尔干涉仪的分束比,可实现赝自旋向上与赝自旋向下两种模式的同时相干泵浦,若此时泵浦光的频率处于拓扑边界态频率范围,则可产生拓扑保护的赝自旋纠缠态:  $|\psi\rangle_{\text{EPR}} = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|\uparrow_s \uparrow_i\rangle + e^{i2\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|\downarrow_s \downarrow_i\rangle$ 。进一步增大泵浦光功率,还可得到多光子纠缠态  $|N00N\rangle$ 。我们分别对拓扑保护的单光子态以及两光子和四光子纠缠态进行量子干涉实验(图2),由于光子数的增加,干涉周期分别为  $\lambda$ 、 $\lambda/2$  以及  $\lambda/4$ 。相比之

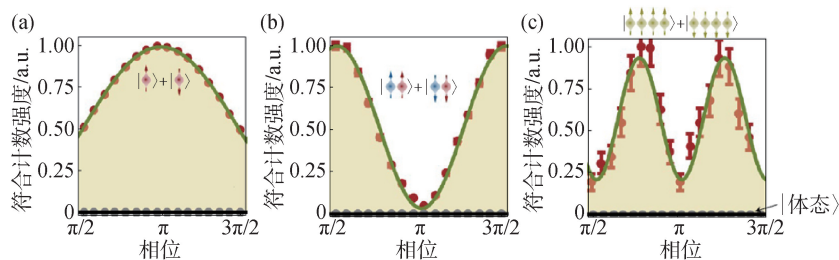


图2 拓扑保护边界态与体态产生的单光子(a)、两光子(b)与四光子(c)量子干涉曲线<sup>[6]</sup>

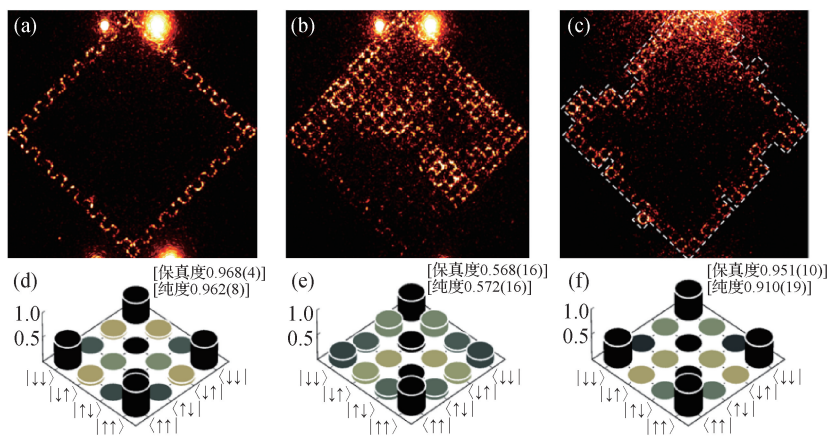


图3 拓扑边界态、体态、带缺陷器件的拓扑边界态成像图((a)—(c))及其纠缠态重构密度矩阵((d)—(f))<sup>[6]</sup>

下,体态区域的计数率要远低于边界态,同时也不表现出周期性干涉条纹。

为了进一步对产生的拓扑保护 Einstein—Podolsky—Rosen(EPR)纠缠态的量子性质进行表征,同时探索在缺陷存在的情况下拓扑鲁棒性对量子态的保护,我们制备了具有多种缺陷类型的拓扑保护集成量子纠缠光源器件,并对原器件和带缺陷器件分别进行量子层析投影测量,并重构出密度矩阵。如图3所示,在拓扑边界模式下产生的拓扑纠缠态的重构密度矩阵具有高达0.968(4)的保真度和0.962(8)的纯度,与之相比,体态激发下产生的光子态只具有0.568(16)的保真度和0.572(16)的纯度,远低于边界态产生的量子态。而带缺陷的器件在边界态泵浦激发时,依旧保持了高达0.951(10)的保真度和0.910(19)的纯度,我们首次在实验上证明了量子纠缠光源在器件存在某类结构缺陷和加工误差的情况下,依然具有高量子态保真度和纯度,有望提升大规模光量子芯片<sup>[8]</sup>



的鲁棒性和实用性。

该研究成果3月8日以封面文章的形式发表在 *Nature Photonics* 上<sup>[6]</sup>。这一工作利用光学反常弗洛凯拓扑绝缘体边界模式的鲁棒性,制备了拓扑保护的集成多光子量子纠缠光源,并首次在实验上证明了拓扑保护的量子纠缠光源对加工带来的误差以及部分结构缺陷存在很强的抗干扰能力,有望帮助抗噪声的量子计算技术的发展。当下微纳加工技术不断走向成熟,加工精度的不断提高和工艺稳定性的逐步提升使得在更小的尺度上设

计出具有拓扑性质的微纳结构成为可能。以此为基础,制备出高性能或具有新奇功能的光量子器件也可能成为未来的一大趋势。利用拓扑鲁棒性来保护量子纠缠光源不仅促进了利用拓扑保护集成量子光学器件的发展,更有助于原子、超导等量子体系对于拓扑保护量子态的探索。拓扑量子技术有望在含噪声量子信息处理、大规模量子计算、可容错量子计算以及拓扑量子物理模拟等方面获得重大应用。

### 参考文献

- [1] Horodecki R, Horodecki P, Horodecki M *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2009, 81: 865
- [2] Hasan M Z, Kane C L. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, 82: 3045
- [3] Blanco-Redondo A, Bell B, Oren D *et al.* *Science*, 2018, 362: 568
- [4] Mittal S, Goldschmidt E A, Hafezi M. *Nature*, 2018, 561: 502
- [5] Mittal S, Orre V V, Goldschmidt E A *et al.* *Nat. Photon.*, 2021, 15: 542
- [6] Dai T, Ao Y, Bao J *et al.* *Nat. Photon.*, 2022, 16: 248
- [7] Liang G Q, Chong Y D. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 203904
- [8] Wang J, Sciarrino F, Laing A *et al.* *Nat. Photon.*, 2020, 14: 273


**欧普特科技**  
GOLDEN WAY SCIENTIFIC

# 做中国专业的 光学元件与光学仪器系统集成商

TO BE A PROFESSIONAL **OPTICAL COMPONENTS AND OPTICAL INSTRUMENTS** SYSTEM INTEGRATOR IN CHINA










地址: 北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋东5层  
E/5F M7, NO.1, JIUXIANQIAO EAST ROAD, CHAOYANG DISTRICT, BEIJING

电话: 010-8809 6218 / 8809 6099

邮箱: optics@goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司  
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd.

