

光子飓风 具有光子横向轨道角动量的时空涡旋

万辰皓 Andy Chong 詹其文[†]

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

2020-03-20收到

[†] email: qzhan1@udayton.edu

DOI: 10.7693/wl20200416

众所周知,光子具有沿传播方向的线性动量。光子的线性动量在光与物质的相互作用中具有重要的作用。光子与物质的动量交换可以产生光压。2018年获得诺贝尔物理学奖的光镊技术基于微纳米颗粒对光子动量改变产生的光场梯度力。光子也具有沿传播方向的角动量,包括与圆偏振相关的自旋角动量和与涡旋相位关联的轨道角动量。近年来,研究表明在高数值孔径聚焦光场和隐失波光场中存在垂直于光束传播方向的光子横向自旋角动量^[1]。那么是否存在垂直于光束传播方向的光子横向轨道角动量呢(图1)?我们最新的研究给出了肯定的答案,成果发表于《自然—光子学》^[2]。

早在1909年,英国物理学家坡印亭就指出,圆偏振光携带自旋角动量^[3]。但是直到1992年,科学家们才发现具有涡旋相位的光束,比如拉盖尔—高斯光束、贝塞尔光束,携带轨道角动量^[4]。光子角动量在高速光通信、粒子操控、全息成像、量子光学等方面得到了广泛的研究和应用^[5-7]。在粒子操控方面,光子的自旋角动量可以使粒子以自身为轴进行旋转,而光子的轨道角动量可以使粒子以光束中心为轴进行旋转,类似于地球的自

转和公转。在高速光通信方面,不同于以往的波分复用和偏振复用技术,光子的轨道角动量提供了一个全新的自由度。具有不同拓扑荷的涡旋光束可以加载不同的光信号,并通过自由空间或者波导传输,然后在输出端进行解复用。

近年来,科学家在研究高数值孔径聚焦光场和隐失波光场时发现了垂直于光束传播方向的光子横向自旋角动量^[8,9]。在高数值孔径聚焦的光场以及隐失波光场中,均可存在沿光束传播方向的电场分量,而这个沿光束传播方向的电场分量与垂直于光束传播方向的电场分量具有 $\pi/2$ 的位相差,可构成圆偏振态,且对应的光子自旋角动量垂直于传播方向,称之为光子横向自旋角动量。光子横向自旋角动量在光子自旋—轨道角动量耦合、量子光通信和表面等离激元定向传播等方面得到了广泛关注和研究^[10-12]。以表面等离激元定向传播为例,基于时间反演的原理,如果在介质—金属界面生成一个旋转的电偶极子,这个电偶极子激发的表面等离激元的传播方向就与这个旋转的电偶极子的旋向相关。换句话说,可以通过光子自旋的方向来控制波导中电磁波或者表面等离激元的传播方向。与光子自旋角动量类似,光子轨道角动量通常是沿光束传播方向,而垂直于光束传播方向的光子横向轨道角动量鲜见报道。

2012年以来的理论研究表明,如果一个观察者以接近光速的速度在垂直于空间涡旋光束的方向上移动,这个观察者观察到的涡旋光场携带的光子轨道角动量不再是沿光束传播方向,而是具有一定的倾角。倾斜的光子轨道角动量矢量具有一个沿光束传播方向的分量和一个垂直于光束传播方向的分量。但是这种理论研究在目前还很难被实验直接验证。

另外,理论研究预测光子横向轨道角动量也

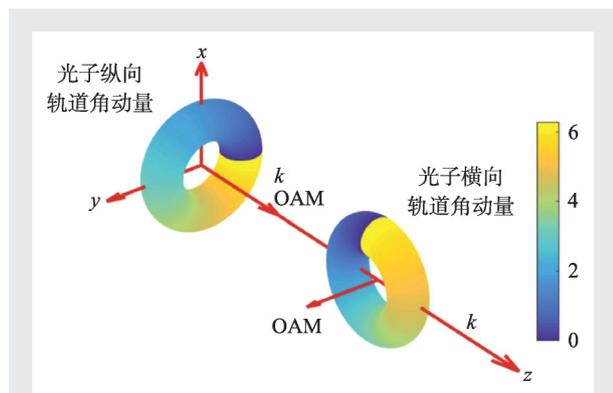


图1 携带光子纵向轨道角动量的空间涡旋光场和携带光子横向轨道角动量的时空涡旋光场^[2]

可以时空涡旋光场的形式存在^[13]。但是，关于如何产生具有时空涡旋相位光场的研究进展同样比较缓慢。原因在于，光子纵向轨道角动量对应的是光场横截面($x-y$ 面)的涡旋相位，因此可以容易地通过相位元件比如液晶光调制器直接在光束横截面上施加涡旋相位获得。但是，光子横向轨道角动量对应的是在时空面($x-t$ 面)上的涡旋相位。如何在光速运动的波包侧面叠加涡旋相位成为了一个关键和困难的问题。

幸运的是，在实验室里，基于常见的光学相位元件(比如衍射光栅、柱透镜和液晶光调制器)组成的光脉冲整形器，可以在空间频率—频率面施加涡旋相位。如图2所示，光源是一个发出皮秒啁啾脉冲的光纤锁模激光器。激光器发出的光脉冲经过衍射光栅、柱透镜后到达一个二维液晶光调制器的表面。这个表面就是光场的空间频率—频率面。二维液晶光调制器可以在该面上对光场施加一个涡旋相位。在空间频率—频率面叠加了涡旋相位的光场再次经过柱透镜和衍射光栅并传播一段距离，以完成二维的时空傅里叶变换。由于角动量是物理守恒量，所以空间频率—频率面的涡旋相位经过二维时空傅里叶变换后在时空面内仍然保留，而且拓扑荷不变。拓扑荷指的是涡旋相位旋转一周的累计相位与 2π 的比值。

生成的时空光涡旋波包是皮秒量级的啁啾脉冲。为了精确的测量和表征，从光源处分出一束参考光束，并通过一组光栅对压缩成飞秒脉冲，这个飞秒脉冲大约是90 fs，在时间尺度上远小于待测的皮

秒啁啾脉冲，所以飞秒脉冲与皮秒啁啾脉冲进行干涉时，实际上是与皮秒啁啾脉冲在时间上的一个切片进行干涉。通过CCD相机测量并记录干涉条纹，就可以得到皮秒啁啾脉冲这个时间切片的光场信息。与光栅对相配合的一个反射镜安装在一个电控调节的纳米台上，基于这个纳米台的精确控制，可以依次让飞秒参考脉冲和皮秒啁啾脉冲的每一个时间切片进行干涉并获取相关的光场信息。通过这种方法，就可以重建整个时空光涡旋波包的三维信息，包括相位分布和光强分布。图3(a)为重建的时空面的相位分布图，可以看到这是一个中心为相位奇点的涡旋相位分布，与理论预期相符。通过干涉条纹信息，还可以计算时空波包在三维空间中的光强分布，如图3(b)所示。图3(b)是等强度分布的绘制，包含了具有时空涡旋相位波包的绝大部分能量。可以看到，在

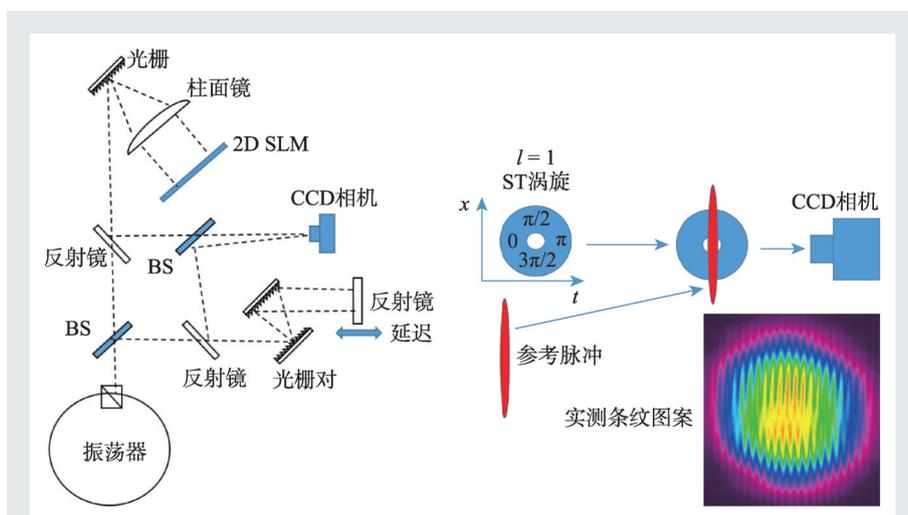


图2 完全采用线性光学手段的时空涡旋光场生成与表征实验装置示意图^[2]

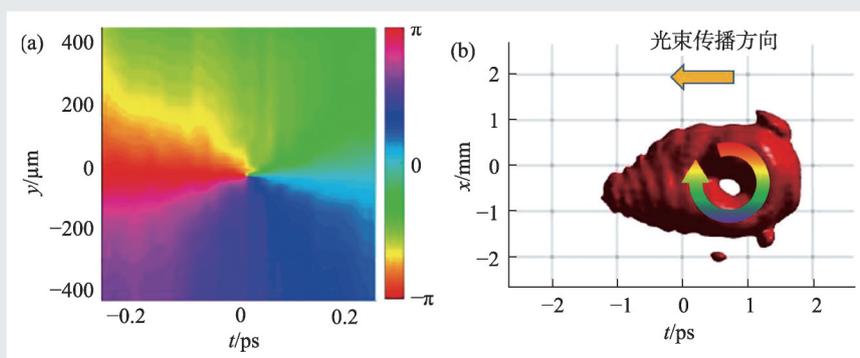


图3 实验产生的携带横向轨道角动量的时空涡旋光场 (a)时空涡旋相位分布；(b)时空涡旋强度分布^[2]

空间一时间面内, 光波包对应相位奇点位置的光强为零。

我们的工作提供了一种简单而优雅的线性方法来产生携带光子横向轨道角动量的时空涡旋光场, 展示了全新的光场态, 开辟了一个新的光子轨道角动量维度。同时也提供了一种线性的方法来较为简单地测量这种特殊的时空涡旋光场。不管是产生方法还是测量和表征方法, 都可以比较容易地在实验室中实现, 有利于其他研究人员在

此基础上开展更加深入的研究。这种特殊的携带光子横向轨道角动量的时空涡旋光场在光子自旋霍尔效应、量子纠缠、非线性效应和光子自旋-轨道耦合效应等方面可能会展示出独特的性质, 也可望应用于高速光通信、多自由度三维光学微操控和新型光电器件等领域。需要指出的是, 这一方法不局限于光学领域, 在声学、电子束、X-射线等具有波动性质的研究领域均可望得到应用, 拓展了相关理论和实验的应用范围。

参考文献

- [1] Ariello A, Banzer P, Neugebauer M *et al.* Nat. Photon., 2015, 9: 789
 [2] Chong A, Wan C, Chen J *et al.* Generation of spatiotemporal optical vortices with controllable transverse orbital angular momentum. Nat. Photon., 2020. <https://www.nature.com/articles/s41566-020-0587-z>
 [3] Poynting J H. Proc. R. Soc. Lond. A, 1909, 82: 560
 [4] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C *et al.* Phys. Rev. A, 1992, 45: 8185
 [5] He H, Friese M, Heckenberg N R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 75: 826
 [6] Yan L *et al.* Optica, 2015, 2: 900
 [7] Djordjevic I B, Arabaci M. Opt. Express, 2010, 18: 24722
 [8] Richards B, Wolf E. Proc. R. Soc. Lond. A, 1959, 253: 358
 [9] Bliokh K Y, Nori F. Phys. Rev. A, 2012, 85: 061801
 [10] Bliokh K Y, Rodríguez-Fortuño F J, Nori F *et al.* Nat. Photon., 2015, 9: 796
 [11] Pichler H, Ramos T, Daley A J *et al.* Phys. Rev. A, 2015, 91: 042116
 [12] Neugebauer M, Bauer T, Aiello A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 114: 063901
 [13] Bliokh K Y, Nori F. Phys. Rev. A, 2012, 86: 033824

创新 SOLVED!
 解决方案!

Goodfellow
 全球材料供应商

www.goodfellow.cn | china@goodfellow.com | +86 21 6112 1560