

光子高阶轨道角动量制备、调控及传感应用研究进展

陈理想 张远颖

Research progress on preparation, manipulation, and remote sensing applications of high-order orbital angular momentum of photons

Chen Li-Xiang Zhang Yuan-Ying

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 164210 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.164210

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

与 Ising 链耦合的中心双量子比特系统的量子关联

[Quantum correlation for a central two-qubit system coupled to Ising chain](#)

物理学报.2013, 62(13): 130305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.130305>

Majorana 表象下的纠缠动力学

[Entanglement dynamics in Majorana representation](#)

物理学报.2013, 62(3): 030303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.030303>

多进制量子图态纠缠的确定

[Determining the entanglement of quantum nonbinary graph states](#)

物理学报.2012, 61(22): 220304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.220304>

利用因式化纠缠模拟纠缠动力学行为的有效性研究

[On the validity of factorization law for the entanglement evolution of two qubits](#)

物理学报.2012, 61(21): 210304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.210304>

专题: 量子精密计量与操控

光子高阶轨道角动量制备、调控及传感应用研究进展*

陈理想[†] 张远颖

(厦门大学物理学系, 厦门 361005)

(2015年3月23日收到; 2015年5月4日收到修改稿)

光子既是经典信息也是量子信息的理想载体. 单个光子不仅可以携带自旋角动量(与光波的圆偏振相关), 还可以携带轨道角动量(与光波的螺旋相位相关). 而轨道角动量的重要意义在于可利用单个光子的量子态构建一个高维的 Hilbert 空间, 从而实现高维量子信息的编码. 自 Allen 等于 1992 年确认光子轨道角动量的物理存在以来, 轨道角动量在经典光学和量子光学领域展现了诸多诱人的应用前景, 目前已成为国际光学领域的研究热点之一. 本综述将着重介绍高阶轨道角动量光束的制备与调控技术, 特别是高阶轨道角动量的量子纠缠态操控、旋转 Doppler 效应测量及其在远程传感和精密测量技术中的应用.

关键词: 光子轨道角动量, 量子纠缠, 旋转 Doppler 效应, 量子遥感技术

PACS: 42.50.Tx, 03.67.Mn, 43.28.Py, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.64.164210

1 引言

光是非常有趣的, 因为我们尚未完全知道它究竟是什么, 它的一些属性仍令人捉摸不定. 关于光是什么, 这是自古以来科学家们一直探索的问题. 现代物理学理论已经普遍认为, 光具有波粒二象性, 即它不仅具有电磁波的宏观属性, 如频率(ν)、波长(λ)、偏振态(σ)和相位(φ), 也具有粒子的微观属性, 如能量(E)、动量(p)、自旋角动量(S)和轨道角动量(L). 早在 1905 年, 爱因斯坦就提出了“光子”理论, 认为光的能量是一份一份的, 每一份能量叫作“光子”, 简称“光子”, 并利用公式 $E = h\nu$, 将微观单个光子的能量和宏观电磁波的频率联系起来. 受此启发, 德布罗意进一步提出了“物质波”思想, 认为“任何物质都伴随着波, 而且不能将物质的运动和波的传播分离开”. 他也用了一个简洁的公式, $p = h/\lambda$, 将描述微观粒子属性的动量和描述波动属性的波长用普朗克常数巧妙地联系起来. 那

么, 我们能否将单个光子的自旋和轨道角动量这两种不同的微观自由度也和电磁波的某些宏观属性有效对应呢?

事实上, 光子角动量的研究具有悠久的历史, 至少可以追溯到 1909 年, 当时 Poynting^[1] 就意识到光具有角动量——自旋角动量, 并率先将光的自旋角动量与光波的偏振态联系起来. 1936 年, 美国 Princeton 大学的 Beth 等^[2] 根据四分之一波片可以改变光波偏振态的特性, 利用力学实验首次巧妙地验证了左、右圆偏振光子分别携带 $\pm\hbar$ 的自旋角动量. 但直到 1992 年, 荷兰 Leiden 大学的 Allen 等^[3] 才在理论上确认光子也可以携带另外一种形式的角动量——轨道角动量, 它来源于光波的螺旋相位. 他们发现具有相位结构 $\exp(i\ell\phi)$ 的光场, 其中 ϕ 是方位角, 如拉盖尔-高斯光束, 平均每个光子携带 $\pm\ell\hbar$ 的轨道角动量, 其中 ℓ 是任意整数. 如图 1 所示, 这类光束的等相位面在三维空间中的螺旋度与旋向分别取决于 ℓ 的绝对值与符号. 特别

* 国家自然科学基金(批准号: 11104233, 11474238)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-13-0495)、福建省杰出青年基金(批准号: 2015J06002)、福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划和厦门大学校长基金(批准号: 2012121015)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: chenlx@xmu.edu.cn

地, 当 $\ell = \pm 3$ 时, 该螺旋结构还非常类似于意大利面, 如图 1(e) 所示. 1995 年, 澳大利亚 Queensland 大学研究组首次实验观测到了轨道角动量从光束

到氧化铜微粒的传递, 并驱使后者发生转动^[4]. 因此, 光的轨道角动量不仅是数学层次上的一个新概念, 更是一种真实的物理存在.

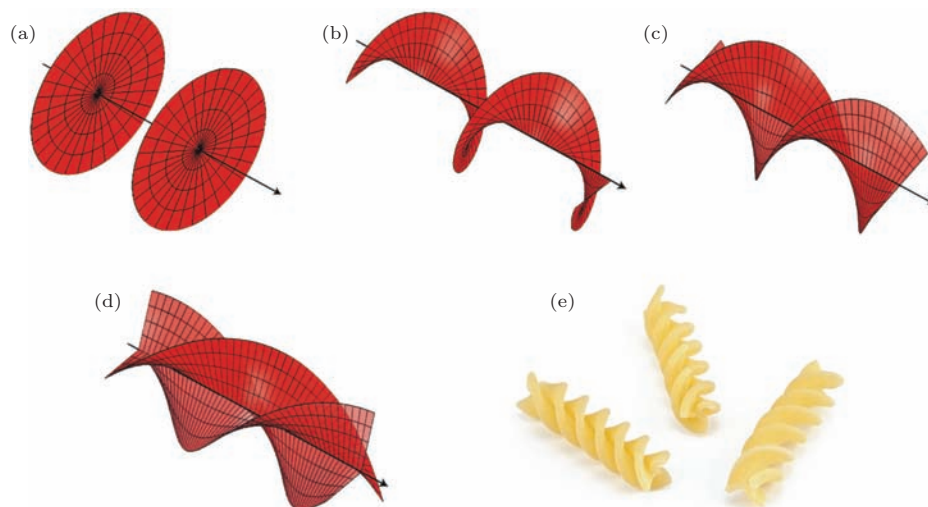


图 1 (a) 基模高斯光束的平面波前; (b) $\ell = 1$ 轨道角动量光束的等相位面; (c) $\ell = 2$ 具有二重螺旋的等相位面; (d) $\ell = 3$ 具有三重螺旋的等相位面^[5]; (e) 形象地说明 $\ell = 3$ 的三重螺旋相位具有类似意大利面的造型
Fig. 1. (a) The planar phase front of a fundamental Gaussian beam; (b) helical phase front of an $\ell = 1$ OAM beam; (c) two-fold helical phase with $\ell = 2$; (d) three-fold helical phase with $\ell = 3$ ^[5]; (e) shows that the wavefront for $\ell = 3$ is shaped like fusilli pasta.

目前光子轨道角动量已成为国际光学领域的一个研究热点, 在基础物理、应用物理以及天文、生物等交叉学科中的研究都具有重要的应用价值^[5-7]. 例如, 由于轨道角动量光束具有特殊的螺旋相位和中空光场, 因此可应用于微观世界的微操控技术^[8]. 早在 1986 年, Ashkin 等^[9]就在实验上证实一束聚焦高斯光束产生的光场梯度力可用于微观粒子的三维囚禁, 这种技术被形象地称为“光学镊子”. 而利用轨道角动量光束, 不仅可以实现微粒的光学囚禁, 而且当光束的轨道角动量部分地传递给微粒后, 后者还会受到一个力矩的驱动而发生转动^[10,11], 这一新颖的力学效应被英国 Glasgow 大学 Padgett 教授形象地称为“光学扳手”^[12]. 2001 年, 英国 St Andrews 大学 Paterson 等^[13]利用带有轨道角动量的旋涡光束干涉图样, 演示了光学扳手在生物学微型机械中的应用. 由于高阶轨道角动量光束对生物组织如细胞或 DNA 分子的热损伤小, 因此光镊和光扳手两种技术有机结合, 在微纳尺度下的激光囚禁和操控, 如光学导引、微马达等都具有广阔的应用前景^[14]. 由于具有特殊的相位螺旋结构, 轨道角动量光束在相衬成像系统也具有新颖的应用, 如图像的边缘增强效应和浮雕效果^[15-17]. 与轨道角动量密切相关的另一种成像技

术是 2005 年由意大利 ICFO 光子中心 Torner 等^[18]提出的数字螺旋成像 (digital spiral imaging). 在这种新概念成像技术中, 待测样品的强度信息和相位信息被记录在透射光或反射光离散的轨道角动量谱中. 最近, 该技术被进一步用于刻画微观介质球的尺寸和位置信息^[19]. 同时, 轨道角动量与当下光学领域的另一个研究热点——等离激元光子的结合, 为纳米级尺度下动态调控光场的聚焦、传输与变化, 以及现代光子集成电路的设计打开了新的思路^[20-24].

由于光子轨道角动量本征态在数学上构成了一组完备的正交基矢, 因此可以利用轨道角动量来实现高维信息的编码, 这种优势不仅体现在经典光通信领域^[25,26], 也体现在量子通信领域^[27]. 在经典光通信领域, 早在 1997 年, 英国 Glasgow 大学 Gibson 等^[28]首次提出了基于轨道角动量本征模式编码的保密通信方案. 同年, 美国 Southern California 大学的 Willner 研究组首次同时将轨道角动量复用和偏振复用技术与高速光通信系统中的波分复用技术有效结合, 实现了高达 2.56 Tbit/s 的自由空间数据率^[29,30]. 他们随后又将该复用技术扩展到支持空间模式传输的特种光纤网络^[31]. 就在刚刚过去的 2014 年, 奥地利 Vienna 大学 Zeilinger

研究组, 基于 16 种不同轨道角动量叠加态的图像编码和图样识别技术, 在维也纳城市上空演示了大气空间中长达 1 km 的实时图像传输, 这表明轨道角动量在卫星通信系统中具有潜在的实用价值^[32]. 在量子通信领域, 基于传统光学手段的量子信息协议目前基本上都是以光子的偏振自由度作为信息的载体, 而偏振态仅能在二维 Hilbert 空间实现量子比特的编码. 而如何构建具有实用性的高维量子体系, 已成为量子信息发展的一个关键问题. 这是因为高维量子体系具有特殊的优越性, 特别在有噪声的量子密钥分发协议中可显著提高信息的容量和安全性^[33]; 同时, 在高维的量子系统中执行量子计算, 也可大大简化逻辑运算的复杂程度^[34]. 而光子轨道角动量正好是高维量子信息的理想载体. 尤其是 2001 年, 奥地利 Vienna 大学 Zeilinger 研究组^[35]在《Nature》报道他们实验观测到自发参量下转化双光子具有高维的轨道角动量纠缠特性, 从而首次实现了光子角动量与现代量子信息技术在真正意义上的对接. 2010 年, 英国 Glasgow 大学 Leach 等^[36]在《Science》又报道了角位移和角动量这对共轭量之间表现出更强的量子关联, 这为提高未来量子密码网络的带宽带来了崭新的机遇. 由于这两项开创性的研究工作, 光子角动量目前已经成为国际上量子信息前沿研究的一大亮点和热点^[37]. 基于高维轨道角动量纠缠, Zeilinger 研究组还提出纠缠浓缩协议, 用以制备轨道角动量的最大化纠缠态^[38], 这在扩展 Bell 不等式检验^[39]以及量子密钥分发技术^[40]中都是必需的. 另外, 2005 年, Illinois 大学 Kwiat 研究组^[41]制备了超纠缠态, 即双光子同时纠缠于自旋、轨道角动量和能量-时间这三个不同的自由度. 而超纠缠体系是拓展高维 Hilbert 空间的一种有效工具^[42-45]. 特别是 2008 年, Kwiat 研究组^[46]在《Nature Physics》上利用超纠缠态辅助 Bell 态测量, 成功打破了传统线性超密集编码信道容量的极限. 2011 年, 英国 Glasgow 大学 Padgett 研究组^[47]也在《Nature Physics》上发表封面文章, 利用高达 11 维的轨道角动量纠缠态, 报道了扩展 Bell 不等式的破坏, 这有望成为下一代量子纠缠的新维度. 2012 年, 意大利 Rome 大学研究组^[48]也发展了一种基于轨道角动量的免调试的量子通信技术. 2014 年, 英国 Glasgow 大学 Padgett 研究组和加拿大 Ottawa 大学 Boyd 研究组合作, 在《Nature Communications》报道他们将强测量与弱测量两种技术有效结合, 直接测量了高达 27 维的轨道角动量态矢^[49].

在国内, 目前关于轨道角动量纠缠的研究更多的是理论工作. 中国科技大学郭光灿院士团队^[50]首次理论研究了轨道角动量纠缠在表面等离子波中的演化行为. 北京师范大学汪凯戈教授课题组^[51]提出了一种新型的自旋-轨道量子受控非门. 上海大学李春芳教授^[52]从横向性条件出发引入一个量子规范势, 即 Berry 势, 清楚地阐述了近轴 Laguerre-Gauss 光束的角动量可以近似地分解成独立于螺旋度的轨道和依赖于螺旋度的自旋两部分. 最近, 中国科学院上海光学精密机械研究所徐至展院士团队^[53]基于光学轨道角动量传输, 提出了一种相对论激光脉冲驱动的新型光扇. 我们也和中山大学余卫龙教授合作, 从数学模型和实验设计的角度出发, 提出了一些新型的量子信息协议, 如任意轨道角动量 Bell 态和 Greenberger-Horne-Zeilinger 态的制备^[54]、多自由度的量子态隐形传输^[55], 还演示了自旋-轨道超纠缠态浓缩方案^[56]. 在实验上, 南开大学王慧田教授课题组^[57]揭示了沿径向变化的杂化偏振矢量光场可以携带源于偏振旋度的一类新型光学轨道角动量. 南京邮电大学赵生妹教授课题组也在实验上深入研究了大气湍流对轨道角动量态的像差校正^[58]、量子密钥分发协议^[59], 以及鬼成像系统中彩色物体的编码技术^[60]. 近年来, 我们也和英国 Glasgow 大学 Padgett 教授研究组开展了合作研究, 在实验上通过测量高维轨道角动量纠缠所对应的 Shannon 维度, 定量确认了杨氏双缝鬼衍射所具有的高维量子特性^[61]; 基于二维的轨道角动量子空间, 实验演示 Hardy 非定域性理论的递推式论证^[62]. 我们还将数字螺旋成像技术与高维的轨道角动量纠缠结合, 获得了分数涡旋相位物体的非局域轨道角动量螺旋谱^[63]. 另外, 郭光灿院士团队^[64,65]在《Nature Communications》和《Physical Review Letters》分别实验报道了具有轨道角动量空间结构的单光子脉冲以及量子纠缠态在冷原子系综中的存储与释放, 这为高维量子中继器的实现迈出了关键的一步. 2015 年年初, 中国科技大学潘建伟院士和陆朝阳教授团队^[66]在《Nature》上撰文, 报道了他们利用六光子纠缠态在实验上完成了同一个光子的偏振态和轨道角动量态的同步隐形传输. 这是继 1997 年量子态隐形传输技术实现以来, 科学家们第一次成功传输了单光子的多个自由度, 从而为构建未来超大容量的量子网络, 提供了光明的前景. 最近, 深圳大学袁小聪教授研究组^[67]也在《Light:

Science & Applications》上报道基于自行设计的“光学旋涡达曼光栅”，完成了对多路轨道角动量的能量均分和高效并行检测，从而在实验上创下了160 Tbit/s的超高速率自由光通信记录。

我们知道，光子所携带的轨道角动量 $l\hbar$ 与旋涡光场的螺旋相位 $\exp(i\ell\phi)$ 相对应，而单个光子轨道角动量量子数 ℓ 的取值在理论上是无穷且不受限的。2012年奥地利 Vienna 大学的 Zeilinger 研究组 [68] 率先实验报道了轨道角动量 (OAM) 量子数高达 $\ell = \pm 300$ 的量子纠缠态。因为高阶轨道角动量光束在相位空间结构上具有高度的旋转对称性，因此与传统的偏振纠缠相比，利用高阶轨道角动量纠缠可以获得更高灵敏度的角度传感与测量，例如他们在实验中获得了测量精度 100 倍的提升。该创造性的工作表明高阶轨道角动量在精密测量物理中具有十分重要的应用价值。因此，本文将着重介绍高阶轨道角动量光束制备和调控的一些关键技术，特别是高阶轨道角动量在高维量子纠缠态操控、旋转 Doppler 效应测量等方面的最新研究进展。

2 高阶光子轨道角动量的制备

轨道角动量光束的制备方法主要有四种。1) 叉型衍射光栅 [69-71]：如图 2 (a) 所示，一束基模高

斯光束通过加载了 $\exp(i\ell\phi)$ 相位信息的叉型光栅后，产生的一级衍射光获得了 ℓ 重的螺旋相位结构，因此平均每个光子携带 $l\hbar$ 的轨道角动量。这种衍射光栅可以通过计算全息或者光刻的方法制备。2) 螺旋相位板 [72,73]：如图 2 (b) 所示，一束基模高斯光束通过螺旋相位板后会在光束中引入一个奇异相位。这种办法原理上看似简单，但是在制作过程中由于需要加工非常精细的螺旋表面，因此具有一定的挑战性。3) 柱透镜组合 [74-76]：如图 2 (c) 所示，该光学元件又称为“几何光学模式转换器”，可用于厄米-高斯光束与拉盖尔-高斯光束相互之间的模式转换，包括 $\pi/2$ 模式转换器与 π 模式转换器，其中 $\pi/2$ 模式转换器可以将入射的厄米-高斯光转换为同阶的拉盖尔-高斯光；而 π 相位转换器的作用。只对光束的轨道角动量的符号进行反转，即改变轨道角动量的旋向。4) 集成轨道角动量发射器 [77]：2012年英国 Bristol 大学余思远研究组设计了一类基于硅基光波导的环形光学微腔和环形微纳光栅，如图 2 (d) 所示，演示了携带不同轨道角动量涡旋光束的阵列发射，该技术可用于光子芯片的光波导互联，因此对未来适用于高维量子信息处理的光子芯片的设计具有启发性。

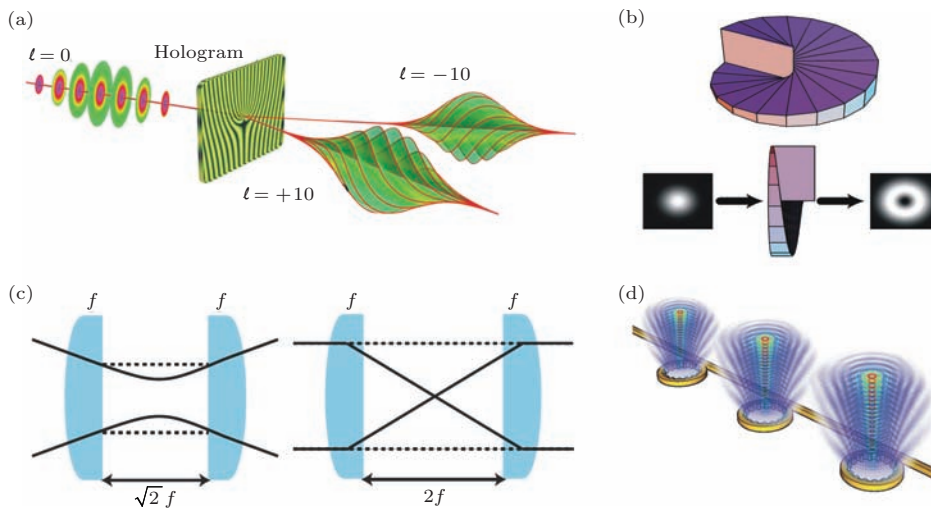


图2 轨道角动量制备技术 (a) 叉型光栅 [69,78]; (b) 螺旋相位板 [72]; (c) 几何光学模式转换器 [74]; (d) 轨道角动量涡旋光束阵列的发射器 [77]

Fig. 2. The generation methods of OAM: (a) fork grating [69,78]; (b) spiral phase plate [72]; (c) mode converter [74]; (d) vortex array emitter [77].

高阶轨道角动量的研究可以追溯到1997年英国 Glasgow 大学 Courtial 等 [79] 尝试利用一个焦距为 f 的柱面透镜在椭圆高斯光束中引入像散，使得聚焦后的像散椭圆高斯光束获得比标准的拉盖

尔-高斯光束大许多倍的轨道角动量。在实验中，他们预测像散光束中平均每个光子携带的轨道角动量可高达 $1000\hbar$ [79]。但是，高阶轨道角动量的研究真正引起科学家们的兴趣只是近年来的事情。这

里, 我们首先着重介绍制备高阶轨道角动量的三种关键技术.

2.1 空间光调制器 (spatial light modulator, SLM)

目前制备光子轨道角动量最广泛采用的设备就是空间光调制器^[80], 空间光调制器是一种像素化的液晶显示器, 每个像素都能独立调控反射或者透射光波的相位或振幅. 它还可以通过与计算机交互使用, 实时而便捷地产生各种图样的计算机全息光栅, 具有响应速度快、频谱范围宽等优点.



图3 日本滨松 X10468 系列的空间光调制器
Fig. 3. Spatial light modulator (Hamamatsu, X10469).

图3是我们实验室目前使用的日本滨松光子学公司 X10468 系列的空间光调制器, 像素阵列为 792×600 , 每个像素的尺寸为 $20 \mu\text{m}$. 为了制备高阶轨道角动量光束, 我们采用如图4(a)的 LabVIEW 算法, 从一束标准拉盖尔-高斯光束中分别提取强度信息和相位信息, 其中相位项为 $\exp(i\ell\phi)$. 让环形的强度分布恰好充满空间光调制器的液晶窗口, 对相位矩阵则乘以整数 N , 从而将原来相位螺旋度提高 N 倍, 这样修正后的拉盖尔-高斯光束携带的轨道角动量将高达 $N\ell$. 这样, 我们就可以让计算机产生的叉形光栅尽量占据更多的像素, 如图4(b), 从而提高衍射轨道角动量光束的品质. 利用该技术, 我们制备了轨道角动量高达 $\ell = 150, 240, 360$ 三重叠加态和 $\ell = 30, 60, 90, 120$ 四重叠加态. 图5显示的是四重叠加态的理论模拟和实验结果^[81]. 最近, 我们还模拟法拉第旋光效应, 在实验上基于改进的 Mach-Zender 干涉仪实现了高阶轨道角动量与偏振态的耦合, 并实现了高阶轨道角动量以及光学分数涡旋的高效分离^[82]; 另外, 基于高阶轨道角动量叠加态 ($\ell = \pm 100$) 的偏振操控, 我们也再次在波粒二象性的框架内演示了“路径实验”和“量子擦除实验”^[83].

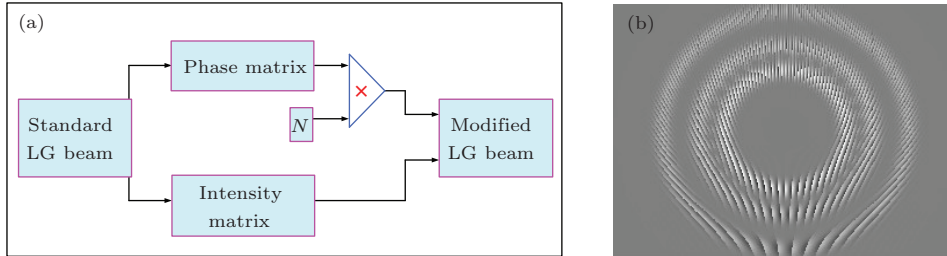


图4 (a) 制备高阶轨道角动量光束的 LabVIEW 算法; (b) 计算叉形光栅
Fig. 4. (a) The LabVIEW algorithm for making high OAM; (b) computer-generated fork grating.

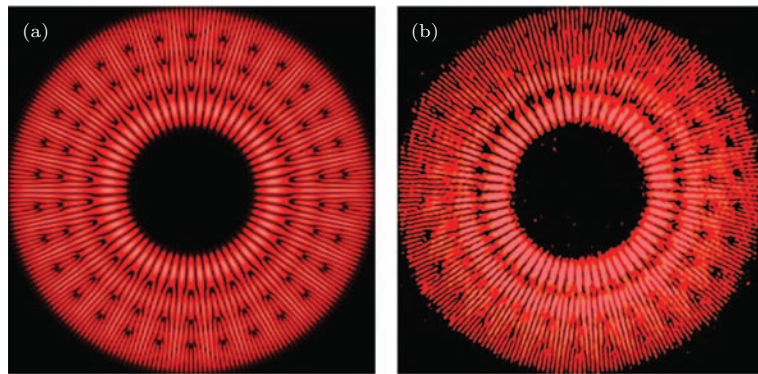


图5 四重轨道角动量叠加态 (a) 理论模拟结果; (b) 实验测量结果
Fig. 5. Optical Superposition of four OAM states: (a) numerical simulation; (b) experimental measurement.

2.2 螺旋相位镜 (spiral phase mirror, SPM)

螺旋相位镜是一种直接由超精密单点金刚石加工而成具有螺旋相位面的反射镜. 它通过精密的机械加工将待产生的涡旋光束的相位结构刻蚀在镜面衬底, 入射光经过其表面以后, 几乎所有的入射光都被反射, 且反射光波前携带了相应的相位信息, 并且转化效率理论上接近100%^[84]. 图6是澳大利亚国立大学Lam 研究组制备的铝质螺旋相位镜, 用于产生量子数高达 $\ell = 1020$ 的轨道角动量光束. 该螺旋相位镜直径为1英寸, 对应的入射波长为532 nm. 图6(a)是通过白光干涉技术对螺旋相位镜台阶表面形貌的重构图, 图6(b)与(c)分别代表中心缺陷与径向台阶的放大微结构. 这种微结构的精度可达100 nm, 轨道角动量的阶数可高达5010^[85]. 为了检测螺旋相位镜产生的高阶轨道角动量的品质, 可以利用Mach-Zender干涉仪装置分别将 $\ell = 1020$ 或 $\ell = 5050$ 的涡旋光束与基模高斯光束干涉, 如图7所示. 其中参考光波前的曲率半径与理想涡旋光束匹配, 所得到的干涉图样不仅检测了制备涡旋光束的质量, 而且更加细致地刻画了轨道角动量光束的螺旋相位构造. 螺旋相位镜的加

工精度受到铝质衬底反射率的影响. 但是, 它的制造具有操作简单、精度高的特点. 基于此方法, 还可以加工以高分子材料或晶体材料为基底的反射型或透射型涡旋光学元件.

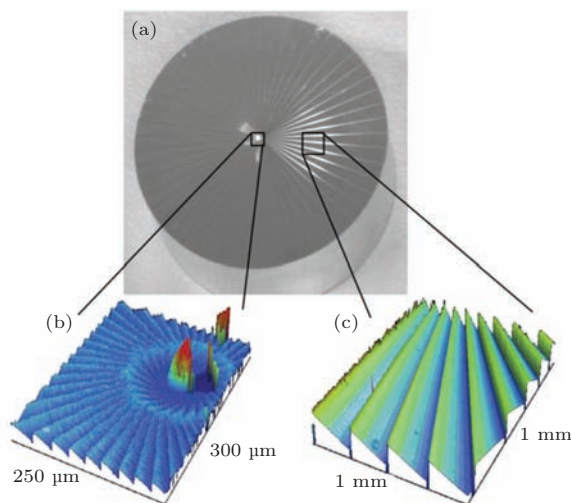


图6 (a) 量子数高达 $\ell = 1020$ 的铝质螺旋相位镜; (b) 相位镜中心的台阶表面形貌重构图; (c) 相位镜的径向台阶表面形貌重构图^[84]

Fig. 6. (a) Metal spiral phase mirror with $\ell = 1020$; (b) the reconstructed surface near the mirror center; (c) the reconstructed surface for radial step of the spiral phase mirror^[84].

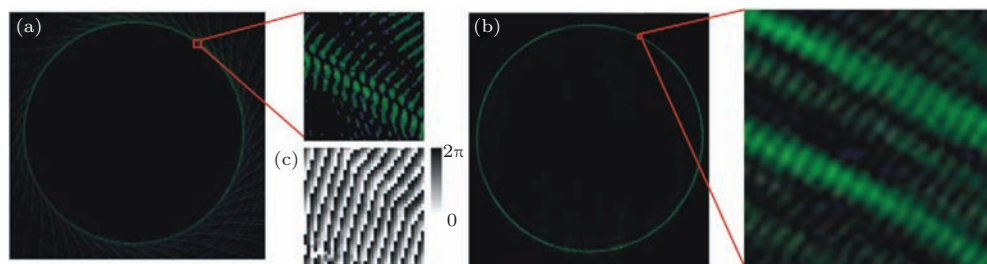


图7 超高阶轨道角动量光束与基模高斯光束干涉图样 (a) $\ell = 1020$; (b) $\ell = 5050$; (c) $\ell = 1020$ 轨道角动量光束的相位分布^[85]

Fig. 7. The interference pattern between a high OAM beam and a fundamental Gaussian beam: (a) $\ell = 1020$; (b) $\ell = 5050$; (c) the phase profile for $\ell = 1020$ OAM beam^[85].

2.3 Q板 (Q-plate)

Q板是由液晶分子构成的一种特殊的各向异性双折射相位板^[86], 它可用于实现光子自旋与轨道角动量的相互转化^[87]. 特别是近年来, 科学家们基于液晶光控取向法, 设计了一类新型的Q板, 用于产生高阶的轨道角动量^[88], 目前技术已达到 $\ell = 100$ ^[89]. 另外, 其响应速度理论上高达GHz, 而且便捷性可与空间光调制器相媲美. Q板一般由单轴双折射晶体制作而成, 如图8所示的是偏光显微镜下Q板的微结构. 在横向平面内, 光轴的取向具

有特定的方位角分布, 即 $\alpha(r, \phi) = \alpha_0 + q\phi$, 其中 α_0 是个常数; 而在Z轴方向有一个固定的相位延迟 δ . Q板对入射光子态的作用算符可以用量子力学语言描述如下^[90]:

$$\hat{O} = |R, m + 2q\rangle \langle L, m| + |L, m - 2q\rangle \langle R, m|, \quad (1)$$

其中 $|L\rangle, |R\rangle$ 分别表示左右旋圆偏振光子. (1)式还可以利用图9来形象地描述, 即左旋圆偏振光子经过Q板后, 变为右旋圆偏振态, 同时获得 $\ell = +2q$ 的轨道角动量. 而右旋圆偏振光子经过Q板后, 变为左旋圆偏振态, 同时获得 $\ell = -2q$ 的轨道角动量.

一般情况下, Q板的转换效率取决于它的纵向相位延迟 δ , 这与材质的选择、厚度等因素有关. 在实际操作中可以通过温度调节或电场调制获得 $\delta = \pi$, 从而优化转换效率^[91,92]. 迄今为止, Q板在光通信技术及量子信息领域都已经展现出了广阔的应用前景^[93].

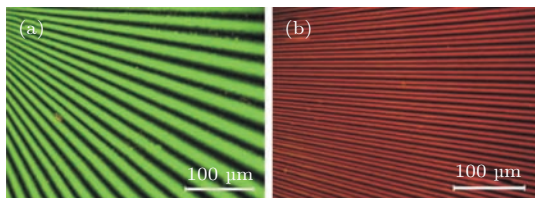


图8 偏光显微镜下的Q板微结构^[89] (a) $q = 15$; (b) $q = 150$

Fig. 8. The microscopic structure of the Q-plate by polarizing microscope^[89]: (a) $q = 15$; (b) $q = 150$.

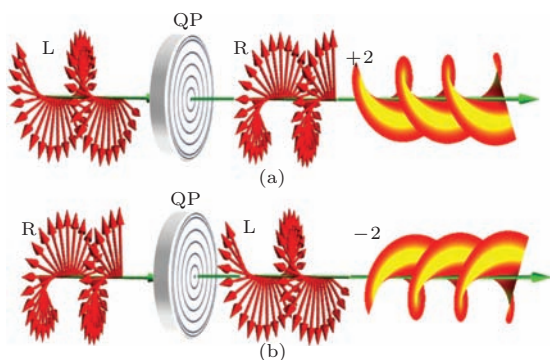


图9 (a) 左旋圆偏振光子经过Q板后变为右旋圆偏振, 同时获得 $+2q$ 的轨道角动量; (b) 右旋圆偏振光子经过Q板后变为左旋圆偏振, 同时获得 $-2q$ 的轨道角动量 (这里 $q = 1$)^[93]

Fig. 9. (a) A left-handed circularly polarized photon is converted to a right-handed one, while acquiring an OAM of $+2q$; (b) a right-handed circularly polarized photon is converted to a left-handed one, while acquiring an OAM of $-2q$ ^[93].

3 高阶光子轨道角动量在高精度传感技术中的应用

由于在高灵敏度传感和高精确度测量中的潜在应用价值, 高阶轨道角动量光束在近年来引起了科学家们浓厚的研究兴趣. 在这里我们将着重介绍高阶轨道角动量在量子纠缠态操控、旋转 Doppler 效应测量及其在现代精密测量技术中的最新研究进展.

3.1 高阶轨道角动量纠缠态操控

具有螺旋相位面的单光子携带量子化的轨道角动量, 单光子轨道角动量在理论上没有上限, 它

们的纠缠性质对于量子物理的基础研究和量子信息技术的应用发展具有重要意义^[38]. 其中最引人瞩目的是轨道角动量旋向相反的两个光子之间建立的纠缠. 这种纠缠的特性可以用经典的语言这样描述: 一个量子微观世界的花样滑冰者, 它具有一种不可思议的能力, 既可以顺时针又同时逆时针地旋转 (即处于顺时针和逆时针旋转的“相干叠加态”), 而且它的旋转与另外一个滑冰者是紧密相关的, 即不论它们距离有多远, 两者的旋向总是保持相反. 2012年 Zelinger 等^[68] 利用干涉仪通过偏振-轨道纠缠变换技术, 将双光子的偏振纠缠态转化为量子数高达 $\ell = \pm 300$ 的高阶轨道角动量纠缠态. 这意味着量子客体如光子, 有望携带接近于宏观量级的轨道角动量, 因此拉近了量子物理与经典物理的界限, 为制备宏观纠缠态迈出了关键的一步. 在应用领域, 由于携带高阶轨道角动量的光子具有高度的旋转对称性, 属于单光子水平下的微弱光源, 因此对于生物学细胞或组织的无损探测具有重要的应用前景.

由于自发参量下转换双光子的轨道角动量纠缠态具有有限的带宽, 即光子对的产率随着量子数 ℓ 的增大急剧地降低^[94,95], 因此 Zelinger 研究组并未直接利用该轨道角动量纠缠态, 而是先基于第二类相位匹配制备了如下偏振纠缠态,

$$|\psi_{\text{in}}\rangle = (1/\sqrt{2}) (|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle) \otimes |0\rangle|0\rangle, \quad (2)$$

其中, H 与 V 分别代表水平与垂直偏振, 0 表示利用单模光纤仅过滤轨道角动量 $\ell = 0$ 的光子. 然后将方程 (2) 描述的纠缠态输入到图 10(b) 所示的干涉仪, 通过偏振分束器和高分辨率空间光调制器 (像素阵列 1920×1080 , 最小像素尺寸 $8 \mu\text{m}$), 让水平和垂直偏振光子分别获得 $+\ell$ 和 $-\ell$ 的轨道角动量. 在干涉仪的出射端口, 再利用 45° 偏振片将偏振态的关联信息擦除, 从而获得轨道角动量纠缠态,

$$|\psi_{\text{out}}\rangle = (1/\sqrt{2}) (|+\ell\rangle|-\ell\rangle + |-\ell\rangle|+\ell\rangle). \quad (3)$$

考虑到轨道角动量叠加态, $|\chi\rangle = (|\ell\rangle + \exp(i\varphi)|-\ell\rangle)/\sqrt{2}$, 可以产生花瓣状的环形干涉条纹, 其中花瓣的数目恰好为 $N = 2\ell$, 如图 11 所示, 分别是 $\ell = \pm 10$, $\ell = \pm 100$, $\ell = \pm 300$ 对应的花瓣图样. 他们通过类比, 利用激光在黑色掩模板上打孔, 产生了类似图 11 的花瓣图样. 根据光路可逆原理, 这些周期性的圆孔阵列结合单模光纤和探测器反过来恰好可用于探测 $\pm\ell$ 高阶轨道角动量叠加态, $|\chi\rangle = (|\ell\rangle + \exp(i\varphi)|-\ell\rangle)/\sqrt{2}$.

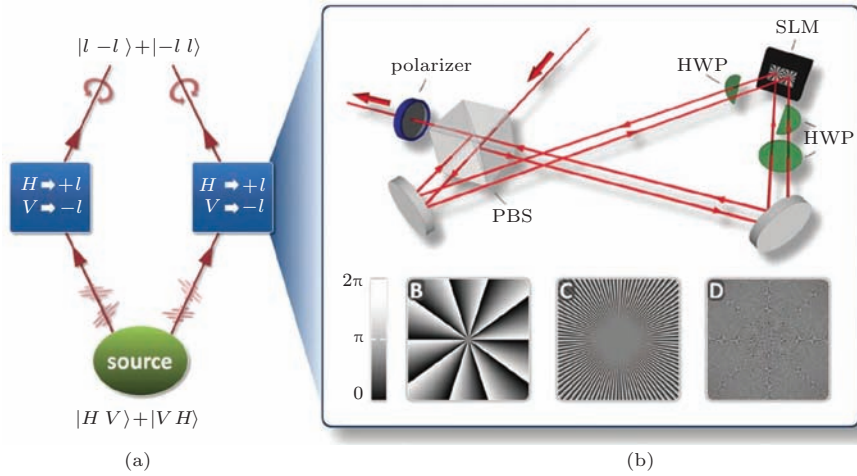


图 10 基于偏振-轨道纠缠变换技术制备高阶的轨道角动量纠缠态 [64]

Fig. 10. The generation of OAM entanglement by polarization-OAM entanglement swapping [64].

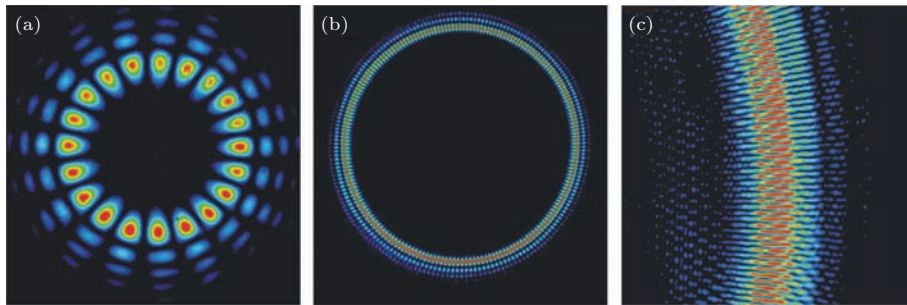


图 11 携带 $+l$ 和 $-l$ 轨道角动量光子叠加态 (a) $l = \pm 10$; (b) $l = \pm 100$; (c) $l = \pm 300$ [68]

Fig. 11. The superposition of $\pm l$ OAM states: (a) $l = \pm 10$; (b) $l = \pm 100$; (c) $l = \pm 300$ [68].

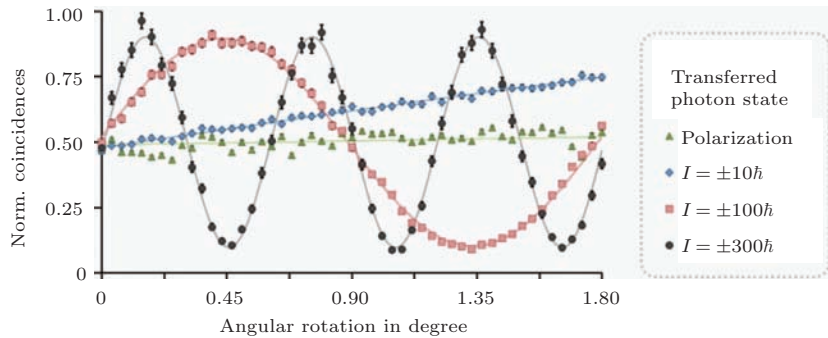


图 12 基于高阶轨道角动量纠缠态实现角度传感分辨率的显著提高 [68]

Fig. 12. Sensing improvement of angular resolution based on the high OAM entanglement [68].

在双光子纠缠实验中, Zelinger 研究组在信号光路和闲置光路分别放置这类具有周期性圆孔阵列的掩模板, 并记录了双光子符合测量计数与两块掩模板相对取向角的变化关系. 图 12 是他们的实验结果, 其中绿色曲线(三角形对应实验数据点)对应常见的偏振纠缠态, 而蓝色曲线(菱形)、红色曲线(正方形)和黑色曲线(圆形)分别对应 $l = \pm 10$,

± 100 和 ± 300 的高阶轨道角动量纠缠态. 首先, 他们基于符合测量实验结果, 计算获得了相应的纠缠见证(entanglement witness)达到 $\hat{W} = 1.6 \pm 0.3$, 从而验证了高阶轨道角动量的纠缠特性. 更重要的是, 他们的实验结果还表明, 当所使用的轨道角动量阶数越大时, 符合计数对旋转角度的变化就更为灵敏. 这是因为高阶轨道角动量光束具有高度的旋

转对称性, 因此可显著提高角度传感的灵敏度, 在理论上探测精度可提高 $N = 2\ell$ 倍, 该优势在量子遥感领域具有重要的应用.

3.2 旋转多普勒效应

多普勒效应于 1842 年由奥地利物理学家及数学家多普勒 (Doppler) 首先提出. 它描述的是波源辐射的波长或频率会因为波源和观测者的相对运动而发生变化. 具体而言, 当波源靠近观察者时接收频率会变高, 称为蓝移; 而当波源远离观察者时接收频率会变低, 称为红移. 同样地, 在天文学中, 当光和星体发生相对移动时, 光也会产生红移或蓝移现象. 因此, 根据频移测量结果, 可以计算出波源沿着观测方向的运动速度. 由于这种多普勒效应和物体的相对平移运动有关, 因此又称为平移多普勒效应, 已广泛应用于声纳和雷达测速.

与平移多普勒效应不同, 人们比较不熟悉的是由于物体旋转所引起的频移, 即旋转多普勒效应 [96]. 事实上早在 1979 年, 物理学家就演示了由于二分之一波片的转动, 导致激光光束产生了 $\Delta\omega = 2\Omega$ 的频率移动 [97], 其中 Ω 为波片的旋转角速度. Simon 等 [98] 利用 Poincaré 球分析了频移来源于几何 Berry 相位的动态演化; 而 Bretenaker 和 Le Floch [99] 认为该频移是能量守恒及光波与介质自旋角动量交换的结果. 我们知道, 轨道角动量来源于光波的螺旋相位, 而自旋角动量来源于光波的圆偏振态, 两者物理机理显然不同, 但科学家们仍致力于寻找它们之间的相似性 [100]. Allen 等 [101] 首先理论预言了光子轨道角动量也能引起旋转多普勒效应. 随后, 英国 Glasgow 大学 Courtial 等 [102,103] 利用毫米波实验证实了 Allen 等的预言: 具有轨道角动量 $\ell\hbar$ 的光束, 如果以速率 Ω 旋转, 那么将会产生一个 $\ell\Omega$ 的频移. 我们也提出理论方案利用旋转的 Q 板制备单光子多自由度的纠缠态, 发现旋转多普勒频移来源于光波与 Q 板的总角总动量交换, 并揭示了它与 Q 板的旋转对称性密切相关 [104].

近年来, 关于旋转多普勒效应最引人瞩目的工作是 2013 年英国 Glasgow 大学 Padgett 研究组 [105] 在《Science》上报道他们利用可见光范围内的高阶轨道角动量实现了旋转物体角速度的实时探测. 其中, 探测到的频移 $\Delta\omega = \ell\Omega$, 恰好完美地正比于检测光束的轨道角动量数, 测量精度在理论上提高了

ℓ 倍, 该工作在旋转物体的高精度远程传感技术中具有重要的应用价值. 在平移多普勒效应中, 当波源和接收者之间相对移动的速度为 v , 那么光波频率的改变量 $\Delta f = f_0 v/c$, 其中 f_0 是波源的固定频率, c 为光速. 同样地, 对于具有螺旋相位 $\exp(i\ell\varphi)$ 光束入射到沿着光轴旋转的物体表面, 观察者接收到的散射光波频率的改变量 $\Delta f = \ell\Omega/(2\pi)$.

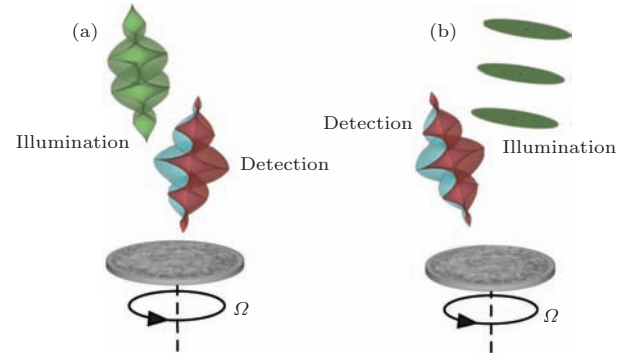


图 13 旋转多普勒频移的测量方案 (a) 以轨道角动量为 $\pm\ell$ 叠加光束作为入射光; (b) 以基模-高斯光束作为入射光, 其中金属圆盘的旋转速度为 Ω [105]

Fig. 13. The scheme of measuring the rotational Doppler shift: (a) using the $\pm\ell$ OAM superposition as the input light; (b) using the fundamental Gaussian state as the input light, the rotational speed of the metal disk is denoted as Ω [105].

Padgett 研究组采用了如下两个方案: 第一, 利用轨道角动量为 $\pm\ell$ 的叠加光束作为入射光, 然后结合多模光纤来探测散射光的频移, 如图 13 (a) 所示; 第二, 利用基模-高斯光束作为入射光, 然后结合单模光纤来探测轨道角动量为 $\pm\ell$ 叠加的散射光频移, 如图 13 (b) 所示. 在实验装置图 14 (a) 中, 将波长为 670 nm 激光耦合到单模光纤中, 经准直输出后入射到空间光调制器 (SLM). 为了获得特定 $\pm\ell$ 轨道角动量叠加, 需要在空间光调制器上加载特定的相位全息光栅, 如图 14 (b) 所示. 因此, 经光阑选择出的空间光调制器第一级衍射光随即获得了所需轨道角动量叠加态, 如图 14 (c) 显示的是 $\ell = \pm 18$ 叠加光束类似环形花瓣的光强图样. 该轨道角动量叠加光束而后入射到待探测的高速旋转的金属圆盘表面 (由马达驱动, 转速可达 200—500 rad/s), 散射光经透镜与多模光纤 (MMF) 耦合进入光电探测器 (PD), 将探测到的时域光强信号经过快速傅里叶变换后, 最终得到相关频域信号.

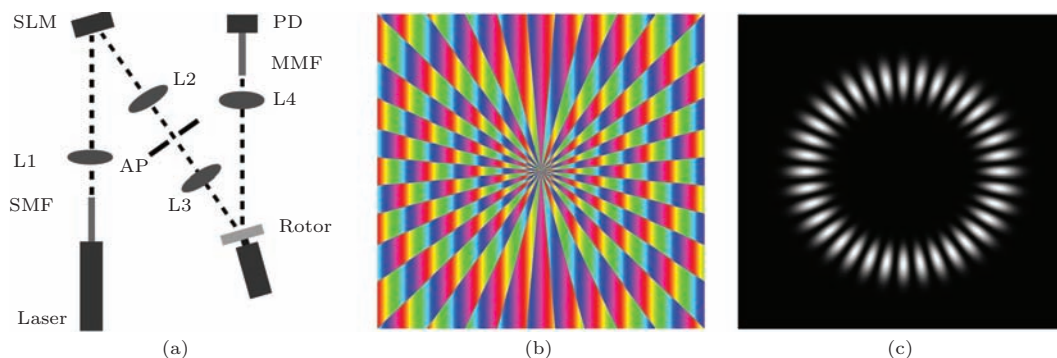

 图 14 (a) 旋转多普勒效应实验光路图; (b) 相位型全息光栅; (c) $\ell = \pm 18$ 轨道角动量叠加态^[105]

 Fig. 14. (a) Experimental configuration for observing the Rotational Doppler shifts; (b) phase holographic grating; (c) interference pattern of two OAM $\ell = \pm 18$ ^[105].

图 15 显示的是部分实验结果, 这里金属圆盘的旋转角速度 $\Omega \approx 383$ rad/s, 探测光束的轨道角动量 $\ell = \pm 18$. 在实验中, 他们通过对光电探测器记录到的时域光强信号实施傅里叶变换后, 得到了图 15 (a) 所示的频域信号. 不难看出, 调制频率的峰值大约出现在 $f_{\text{mod}} = (2346 \pm 1)$ Hz, 恰好与关系式

$$f_{\text{mod}} = 2|\ell|\Omega/(2\pi) \quad (4)$$

的预测一致. 根据轨道角动量本征态的正交完备性^[106], 可以将描述圆盘粗糙表面的函数 $u(r, \phi)$ 展开为一系列螺旋相位函数的叠加, 即

$$u(r, \phi) = \sum_{\ell} A_{\ell}(r) \exp(i\ell\phi). \quad (5)$$

当金属圆盘以角速度 Ω 旋转时, 等效在每个轨道角动量分量中引入一个相移 $\Delta\phi_{\ell} = \ell\Omega t$, 即

$$u(r, \phi, \Omega) = \sum_{\ell} A_{\ell}(r) \exp(i\ell\phi) \exp(i\ell\Omega t). \quad (6)$$

所以当入射光为轨道角动量 $\pm\ell$ 叠加光束时, 将分别引起 $\pm\ell\Omega$ 的频率移动. 因此, 光电探测器记录的光强信号的调制频率峰值, 将出现在频谱位置 $\Delta\omega = 2|\ell|\Omega$, 即 $f_{\text{mod}} = 2|\ell|\Omega/(2\pi)$. 图 15 (b) 说明了实验测量结果与理论预测高度符合. 显然调制频率的峰值与旋转速度 Ω 和轨道角动量 ℓ 均成正比. 这意味着, 当利用高阶轨道角动量进行探测时, 探测信号将被放大 $2|\ell|$ 倍, 所以旋转多普勒效应在天文学领域可用于高精度探测遥远星体的转速等信息^[107,108]. 目前基于金属螺旋相位镜制备的轨道角动量可高达 $\ell = 5050$ ^[85], 这意味着若将此技术与量子纠缠态操控和旋转多普勒测量有效结合, 角度传感精度将有四个数量级的改善, 这在精密测量物理学中具有重要的意义.

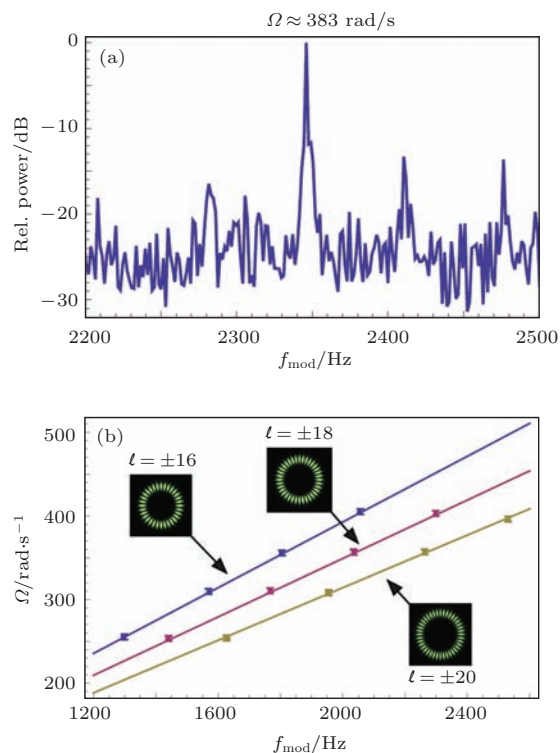

 图 15 (a) 经傅里叶变换获得的频域信号, 对应 $\ell = \pm 18$, 转速 $\Omega = 383$ rad/s; (b) 强度调制频率 f_{mod} 与转速 Ω 和轨道角动量 ℓ 之间的关系, 其中实线和数据点分别是理论和实验结果^[105]

 Fig. 15. (a) The frequency spectrum after FFT for $\ell = \pm 18$ and $\Omega = 383$ rad/s; (b) the relation between the modulation frequency and the OAM number, where the solid lines and points are the theoretical and experimental results, respectively^[105].

4 结 论

轨道角动量是光子一个新的独立自由度, 是实现高维量子体系的理想载体. 我们从基础物理和应用物理两个层面, 回顾了 1992 年以来轨道角动量研究的一些重要进展, 特别是高阶轨道角动量光束

的最新制备方法、调控手段及其在量子纠缠态操控和旋转多普勒效应测量中的最新应用. 这些工作既丰富了光子轨道角动量的基础物理理论, 也为高阶轨道角动量在工程领域的应用研究提供了崭新的思路和视角. 目前轨道角动量已然是国际物理学前沿研究的热点之一, 方兴未艾. 轨道角动量的一些崭新的特性和独特的潜在应用, 仍有待科学家们的继续思考和不懈探索. 在今后的几年时间里, 将是发展的关键时期, 充满了挑战, 但更多的是机遇!

参考文献

- [1] Poynting J H 1909 *Pro. R. Soc. London A* **82** 560
- [2] Beth R A 1936 *Phys. Rev.* **50** 115
- [3] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [4] He H, Friese M E J, Heckenberg N R, Rubinsztein-Dunlop H 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 826
- [5] Allen L, Barnett S M, Padgett M J 2003 *Optical Angular Momentum* (London: Institute of Physics Publishing)
- [6] Padgett M, Courtial J, Allen L 2004 *Phys. Today* **57** 35
- [7] Yao A M, Padgett M J 2011 *Adv. Opt. Photonics* **3** 161
- [8] Padgett M J, Bowman R 2011 *Nat. Photon* **5** 343
- [9] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, Chu Steven 1986 *Opt. Lett.* **11** 288
- [10] Friese M E J, Nieminen T A, Heckenberg N R, Rubinsztein-Dunlop H 1998 *Nature* **394** 348
- [11] O'Neil A T, MacVicar I, Allen L, Padgett M J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 053601
- [12] Simpson N B, Dholakia K, Allen L, Padgett M J 1997 *Opt. Lett.* **22** 52
- [13] Paterson L, MacDonald M P, Arlt J, Sibbett W, Bryant P E, Dholakia K 2001 *Science* **292** 912
- [14] Grier D G 2003 *Nature* **424** 810
- [15] Jesacher A, Fürhapter S, Bernet S, Ritsch-Marte M 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 233902
- [16] Davis J A, McNamara D E, Cottrell D M, Campos J 2000 *Opt. Lett.* **25** 99
- [17] Jack B, Leach J, Romero J, Franke-Arnold S, Ritsch-Marte M, Barnett S M, Padgett M J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 083602
- [18] Torner L, Torres J, Carrasco S 2005 *Opt. Express* **13** 873
- [19] Petrov D, Rahuel N, Molina-Terriza G, Torner L 2012 *Opt. Lett.* **37** 869
- [20] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [21] Shen Z, Hu Z J, Yuan G H, Min C J, Fang H, Yuan X C 2012 *Opt. Lett.* **37** 4627
- [22] Yu H H, Zhang H J, Wang Y C, Han S, Yang H F, Xu X G, Wang Z P, Petrov V, Wang J Y 2013 *Sci. Rep.* **3** 3191
- [23] Heeres R W, Zwiller V 2014 *Nano. Lett.* **14** 4598
- [24] Karimi E, Schulz S A, de Leon I, Qassim H, Upham J, Boyd R W 2014 *Light: Sci. Appl.* **3** e167
- [25] Yu S Y 2015 *Opt. Express* **23** 3075
- [26] Willner A E, Huang H, Yan Y, Ren Y, Ahmed N, Xie G, Bao C, Li L, Cao Y, Zhao Z, Wang J, Lavery M P J, Tur M, Ramachandran S, Molisch A F, Ashraf N, Ashrafi S 2015 *Adv. Opt. Photon* **7** 66
- [27] Boyd R W, Leach J, Jack B, Romero J, Jha A K, Yao A M, Franke-Arnold S, Ireland D G, Barnett S M, Padgett M J 2010 *Opt. Photon. News* **21** 48
- [28] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, Vasnetsov M, Pas'ko V, Barnett S M, Franke-Arnold S 2004 *Opt. Express* **12** 5448
- [29] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, Ahmed N, Yan Y, Huang H, Ren Y, Yue Y, Dolinar S, Tur M, Willner A E 2012 *Nat. Photon* **6** 488
- [30] Willner A E, Wang J, Huang H 2012 *Science* **337** 655
- [31] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, Tur M, Kristensen P, Huang H, Willner A E, Ramachandran S 2013 *Science* **340** 1545
- [32] Krenn M, Fickler R, Fink M, Handsteiner J, Malik M, Scheidl T, Ursin R, Zeilinger A 2014 *New J. Phys.* **16** 113028
- [33] Lanyon B P, Barbieri M, Almeida M P, White A G 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 200501
- [34] Lanyon B P, Barbieri M, Almeida M P, Jennewein T, Ralph T C, Resch K J, Pryde G J, O'Brien J L, Gilchrist A, White A G 2009 *Nat. Phys.* **5** 134
- [35] Mair A, Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2001 *Nature* **412** 313
- [36] Leach J, Jack B, Romero J, Jha A K, Yao A M, Franke-Arnold S, Ireland D G, Boyd R W, Barnett S M, Padgett M J 2010 *Science* **329** 662
- [37] Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L 2007 *Nat. Phys.* **3** 305
- [38] Vaziri A, Pan J W, Jennewein T, Weihs G, Zeilinger A 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 227902
- [39] Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 240401
- [40] Gröblacher S, Jennewein T, Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2006 *New J. Phys.* **8** 75
- [41] Barreiro J T, Langford N K, Peters N A, Kwiat P G 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 260501
- [42] Sheng Y B, Deng F G, Long G L 2010 *Phys. Rev. A* **82** 032318
- [43] Gu B, Huang Y G, Fang X, Zhang C Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 100309
- [44] Ren X F, Guo G P, Li J, Li C F, Guo G C 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 552
- [45] Wang T J, Li T, Du F F, Deng F G 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 040305
- [46] Barreiro J T, Wei T C, Kwiat P G 2008 *Nat. Phys.* **4** 282
- [47] Dada A C, Leach J, Buller G S, Padgett M J, Andersson E 2011 *Nat. Phys.* **7** 677
- [48] D'Ambrosio V, Nagali E, Walborn S P, Aolita L, Slusarenko S, Marrucci L, Sciarrino F 2012 *Nat. Commun.* **3** 961
- [49] Malik M, Mirhosseini M, Lavery M P J, Leach J, Padgett M J, Boyd R W 2014 *Nat. Commun.* **5** 3115
- [50] Ren X F, Guo G P, Huang Y F, Li C F, Guo G C 2008 *Opt. Commun.* **281** 5063

- [51] Deng L, Wang H, Wang K 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 2517
- [52] Li C F 2009 *Phys. Rev. A* **80** 063814
- [53] Shi Y, Shen B F, Zhang L G, Zhang X M, Wang W P, Xu Z Z 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 235001
- [54] Chen L, She W 2011 *Phys. Rev. A* **83** 032305
- [55] Chen L, She W 2011 *Phys. Rev. A* **83** 012306
- [56] Chen L 2012 *Phys. Rev. A* **85** 012311
- [57] Wang X L, Chen J, Li Y N, Ding J P, Guo C S, Wang H T 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 253602
- [58] Zhao S M, Leach J, Gong L Y, Ding J, Zheng B Y 2012 *Opt. Express* **20** 452
- [59] Zhao S M, Gong L Y, Li Y Q, Yang H, Sheng Y B, Cheng W W 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 060305
- [60] Li Y Q, Yang H, Liu J, Gong L Y, Sheng Y B, Cheng W W, Zhao S M 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 021104
- [61] Chen L, Leach J, Jack B, Padgett M J, Franke-Arnold S, She W 2010 *Phys. Rev. A* **82** 033822
- [62] Chen L, Romero J 2012 *Opt. Express* **20** 21687
- [63] Chen L, Lei J, Romero J 2014 *Light: Sci. Appl.* **3** e153
- [64] Ding D S, Zhou Z Y, Shi B S, Guo G C 2013 *Nat. Commun.* **4** 2527
- [65] Ding D S, Zhang W, Zhou Z Y, Shi S, Xiang G Y, Wang X S, Jiang Y K, Shi B S, Guo G C 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 050502
- [66] Wang X L, Cai X D, Su Z E, Chen M C, Wu D, Li L, Liu N L, Lu C Y, Pan J W 2015 *Nature* **518** 516
- [67] Lei T, Zhang M, Li Y R, Jia P, Liu G N, Xu X G, Li Z H, Min C J, Lin J, Yu C Y, Niu H B, Yuan X C 2015 *Light: Sci. Appl.* **4** e257
- [68] Fickler R, Lapkiewicz R, Plick W N, Krenn M, Schaeff C, Ramelow S, Zeilinger A 2012 *Science* **338** 640
- [69] Bazhenov V Yu, Vasnetsov M V, Soskin M S 1990 *JETP Lett.* **52** 429
- [70] Ye F W, Li Y P 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 328
- [71] Qi X Q, Gao C Q, Liu Y D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 264
- [72] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, Woerdman J P 1994 *Opt. Commun.* **112** 321
- [73] Oemrawsingh S S R, van Houwelingen J A W, Eliel E R, Woerdman J P, Verstegen E J K, Kloosterboer J G, Hooft G W 2004 *Appl. Opt.* **43** 688
- [74] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E I O, Woerdman J P 1993 *Opt. Commun.* **96** 123
- [75] Padgett M, Arlt J, Simpson N 1996 *Am. J. Phys.* **64** 77
- [76] Dmitri V. Petrov, Fernando Canal, Lluís Torner 1997 *Opt. Commun.* **143** 265
- [77] Cai X, Wang J, Strain M J, Johnson-Morris B, Zhu J, Sorel M, O'Brien J L, Thompson M G, Yu S 2012 *Science* **338** 363
- [78] Monroe D 2015 *Physics* **8** 7
- [79] Courtial J, Dholakia K, Allen L, Padgett M J 1997 *Opt. Commun.* **144** 210
- [80] Savage N 2009 *Nat. Photon* **3** 170
- [81] Chen L, Zhang W, Lu Q, Lin X 2013 *Phys. Rev. A* **88** 053831
- [82] Zhang W, Qi Q, Zhou J, Chen L 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 153601
- [83] Chen L, Zhang W, Cai K, Zhang Y, Qi Q 2014 *Opt. Lett.* **39** 5897
- [84] Campbell G, Hage B, Buchler B, Lam P K 2012 *Appl. Opt.* **51** 873
- [85] Shen Y, Campbell G T, Hage B, Zou H, Buchler B C, Lam P K 2013 *J. Opt.* **15** 044005
- [86] Marrucci L, Manzo C, Paparo D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 221102
- [87] Marrucci L, Manzo C, Paparo D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 163905
- [88] Slussarenko S, Murauski A, Du T, Chigrinov V, Marrucci L, Santamato E 2011 *Opt. Express* **19** 4085
- [89] D'Ambrosio V, Spagnolo N, Del Re L, Slussarenko S, Li Y, Kwek L C, Marrucci L, Walborn S P, Aolita L, Sciarrino F 2013 *Nat. Commun.* **4** 2432
- [90] Chen L, Lu X, Cheng Z 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 2915
- [91] Karimi E, Piccirillo B, Nagali E, Marrucci L, Santamato E 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 231124
- [92] Piccirillo B, D'Ambrosio V, Slussarenko S, Marrucci L, Santamato E 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 241104
- [93] Marrucci L, Karimi E, Slussarenko S, Piccirillo B, Santamato E, Nagali E, Sciarrino F 2011 *J. Opt.* **13** 064001d
- [94] Torres J P, Alexandrescu A, Torner L 2003 *Phys. Rev. A* **68** 050301
- [95] Di Lorenzo Pires H, Florijn H C B, van Exter M P 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 020505
- [96] Padgett M J 2006 *Nature* **443** 924
- [97] Garetz B A, Arnold S 1979 *Opt. Commun.* **31** 1
- [98] Simon R, Kimble H J, Sudarshan E C G 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 19
- [99] Bretenaker F, Le Floch A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 2316
- [100] Padgett M J, Courtial J 1999 *Opt. Lett.* **24** 430
- [101] Allen L, Babiker M, Power W L 1994 *Opt. Commun.* **112** 141
- [102] Courtial J, Dholakia K, Robertson D A, Allen L, Padgett M J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3217
- [103] Courtial J, Robertson D A, Dholakia K, Allen L, Padgett M J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4828
- [104] Chen L, She W 2008 *Opt. Express* **16** 14629
- [105] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, Padgett M J 2013 *Science* **341** 537
- [106] Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L 2001 *Phys. Rev. Lett.* **88** 013601
- [107] Marrucci L 2013 *Science* **341** 464
- [108] Padgett M 2014 *Phys. Today* **67** 58

SPECIAL ISSUE — Quantum metrology and control

Research progress on preparation, manipulation, and remote sensing applications of high-order orbital angular momentum of photons*

Chen Li-Xiang[†] Zhang Yuan-Ying

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

(Received 23 March 2015; revised manuscript received 4 May 2015)

Abstract

Photons are an ideal candidate for encoding both classical and quantum information. Besides spin angular momentum associated with circular polarization, single photon can also carry other fundamentally new degree of freedom of orbital angular momentum related to the spiral phase structure of light. The key significance of orbital angular momentum lies in its potential in realizing a high-dimensional Hilbert space and in encoding a high-dimensional quantum information. Since Allen *et al.* [Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185] recognized the physical reality of photon orbital angular momentum in 1992, rapidly growing interest has been aroused in orbital angular momentum (OAM) from both classical and quantum points of view. Here we present an overall review on the high-order orbital angular momentum of photon, including its preparation and manipulation based on some specific techniques and also its applications. The spatial light modulator is a commercial device that has been widely employed to generate the OAM beams. We make and identify the optical OAM superposition with very high quantum numbers up to $\ell = 360$. Recently, the metallic spiral phase mirrors were also developed to produce high-order OAM beams up to $\ell = 5050$. In addition, the Q-plates made of anisotropic and inhomogeneous liquid crystals were invented to generate high-order OAM beams in a polarization-controllable manner, and the OAM superposition of $\ell = \pm 50$ were achieved. Owing to high rotational symmetry, these high OAM beams have been found to have more and more important applications in the fields of high-sensitivity sensing and high-precision measurements. Two fascinating examples are discussed in detail. The first example is that the research group led by Prof. Zeilinger has prepared and observed the quantum entanglement of high orbital angular momenta up to $\ell = \pm 300$ by the technique of polarization-OAM entanglement swapping, and they demonstrated that the angular resolution could be significantly improved by a factor of ℓ . Their result was the first step for entangling and twisting even macroscopic, spatially separated objects in two different directions. The second example is that the research group led by Prof. Padgett has demonstrated an elegant experiment of rotational Doppler effects for visible light with $\ell = \pm 20$ OAM superposition. They showed that a spinning object with an optically rough surface might induce a Doppler effect in light reflected from the direction parallel to the rotation axis, and the frequency shift was proportional to both the disk's angular speed and the optical OAM. The potential applications in noncontact measurement of angular speed and in significant improvement of angular resolution for remote sensing will be particularly fascinating.

Keywords: orbital angular momentum of light, quantum entanglement, rotation Doppler effect, quantum remote sensing

PACS: 42.50.Tx, 03.67.Mn, 43.28.Py, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.64.164210

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11104233, 11474238), the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-13-0495), the Science Foundation of Fujian Province for Distinguished Young Scientists, China (Grant No. 2015J06002), the Program for New Century Excellent Talents in Universities of Fujian Province, China, and the Principal Fund of Xiamen University, China (Grant No. 2012121015).

[†] Corresponding author. E-mail: chenlx@xmu.edu.cn