

量子信息实验新进展:首次实现多自由度量子体系隐形传态*

汪喜林^{1,2,3} 刘乃乐^{1,2,3} 陆朝阳^{1,2,3,†} 潘建伟^{1,2,3,††}

(1 中国科学技术大学 合肥微尺度物质科学国家实验室 合肥 230026)

(2 中国科学技术大学 近代物理系 合肥 230026)

(3 量子信息与量子科技前沿协同创新中心 合肥 230026)

2015-05-03收到

† email: cylu@ustc.edu.cn

†† email: pan@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20150604

量子隐形传态^[1]在概念上非常类似于科幻小说中的“星际旅行”，可以利用量子纠缠把量子态传输到遥远地点，而无需传输载体本身。量子隐形传态作为量子信息处理的基本单元，在量子通信和量子计算网络中发挥着至关重要的作用。

1997年，国际上首次报道了单一自由度量子隐形传态的实验验证^[2]。此后，作为国际学术界量子信息实验领域的重要研究热点，量子隐形传态又先后在包括冷原子^[3]、离子阱^[4]、超导^[5]、量子点^[6]和金刚石色心^[7]等诸多物理系统中得以实现。

然而，迄今为止，所有的实验实现都存在着一个根本的局限，即只能传输单个自由度的量子状态，而真正的量子物理体系自然地拥有多种自由度的性质，即使是一个最简单的基本粒子，如单光子，它的性质也包括波长、动量、自旋和轨道角动量等等。多自由度的量子隐形传态作为发展可拓展量子计算和量子网络技术的必经途径，成为近二十年来量子信息基础研究领域的一个巨大挑战。

面对挑战，我们选取单光子自旋和轨道角动量作为研究对象，开展多自由度量子体系隐形传态的实验研究。自旋角动量即光子的偏振，可以利用波片、极化片和分束器等线性光学元件非常便捷地调控，相关技术已经非常成熟^[8]。近年来的研究表明，具有螺旋位相 $[\exp(i\ell\phi)]$ 的光学涡旋中的每个光子携带 $\ell\hbar$ 的轨道角动量(orbital angular momentum, 简称OAM)，其中 ϕ 为极坐标下的方位角， ℓ 为拓扑荷，可以取值为任意整数。从1992年被发现至今，OAM已经在包括量子信息、量子光学、生物光子学、光学成像和非线性光学等众多科学领域得到了广泛应用，已经发展成为光子另外一个非常重要的自由度^[9]。

量子隐形传态的实现有两个必要条件：(1)高亮度纠缠源；(2)Bell态测量，即把4个Bell态中的某一个与另外3个区分开来，对于光子极化而

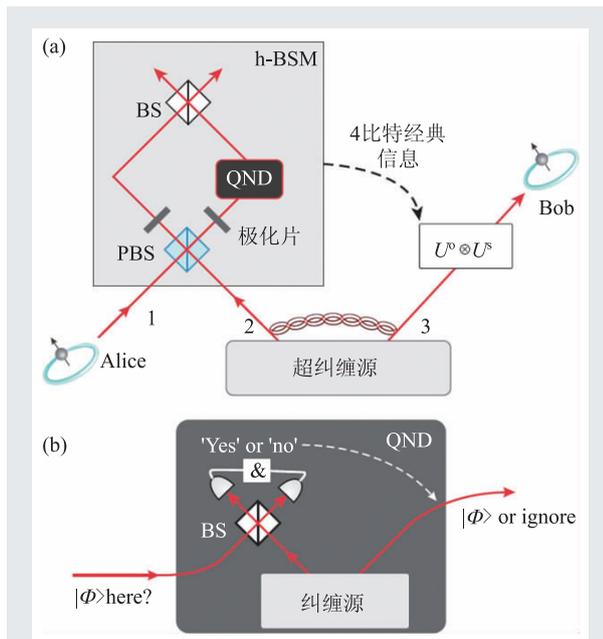


图1 多自由度量子体系隐形传态实验方案 (a) Alice要将编码在光子1上的自旋-轨道角动量复合量子态传输给Bob，为此，Alice和Bob需要事先共享一对超纠缠光子对2-3，接着Alice对光子1和2进行超纠缠Bell态测量，将测量结果以4比特形式通过经典信道告知Bob，根据接收到的来自Alice的经典信息，Bob对光子3进行合适的双自由度幺正操作，便可将光子3转换为原先光子1的量子态，从而实现量子隐形传态；(b) 借助于一对OAM纠缠光子对实现的单光子非破坏测量，当入射一个光子，分束器后两个探测器会被同时触发，产生两体符合，从而预报出射处有一个光子并且其量子态与入射光子相同(借助于单自由度量子隐形传态实现)，当没有光子入射时，分束器后的两个探测器无法产生两体符合，从而预示着出射口没有光子输出

言，通常可由分束器或者极化分束器来实现^[8]。对于多自由度的量子隐形传态，相应的两个必要条件会变得更加苛刻：(1)高亮度自旋—轨道超纠缠源，即两个光子在自旋和轨道两个自由度均各自纠缠；(2)超纠缠 Bell 态测量，即要把 16 个自旋—轨道超纠缠 Bell 态中的某一个和另外 15 个区分开来。

针对以上两个苛刻条件，我们首先从理论上展开研究，已有理论分析表明，仅利用线性光学元件无法实现超纠缠 Bell 态测量^[10]，因此，必须首先在理论上取得突破。经过深入钻研，我们发现借助于单光子非破坏测量可以实现超纠缠 Bell 态测量。

于是，我们设计了如图 1(b) 所示的实现自旋—轨道角动量多自由度超纠缠 Bell 态测量的新方案，其中单光子非破坏测量技术是通过 OAM 自由度的量子隐形传态实现的，借助了一对 OAM 纠缠源。在此基础上，我们进一步提出了如图 1(a) 所示的多自由度体系量子隐形传态的方案。

以上方案涉及到 6 个光子的 OAM 干涉，以往国际上对于 OAM 的调控仅仅局限于 2 光子水平，原因在于 OAM 测量效率过低。因此，要想在实验上实现此方案，首先必须提高 OAM 测量效率。借鉴于经典光学中对于 OAM 的调控技术，我们发展了高效 OAM 测量技术，获得了高亮度的自旋—轨道角动量超纠缠源。此外，我们还发展了 OAM 双通道测量技术，构造出类似于极化比特中极化分束器功能的干涉仪，能够同时测量 OAM 正交量子比特，进一步提高了整个实验的效率。在此基础上，搭建了如图 2 所示的 6 光子 11 量子比特的自旋—轨道角动量纠缠实验平台。

为了验证实验装置的可行性，我们一共传输了 5 个量子态： $|\varphi\rangle_A = |0\rangle^s|0\rangle^o$ ， $|\varphi\rangle_B = |1\rangle^s|1\rangle^o$ ， $|\varphi\rangle_C =$

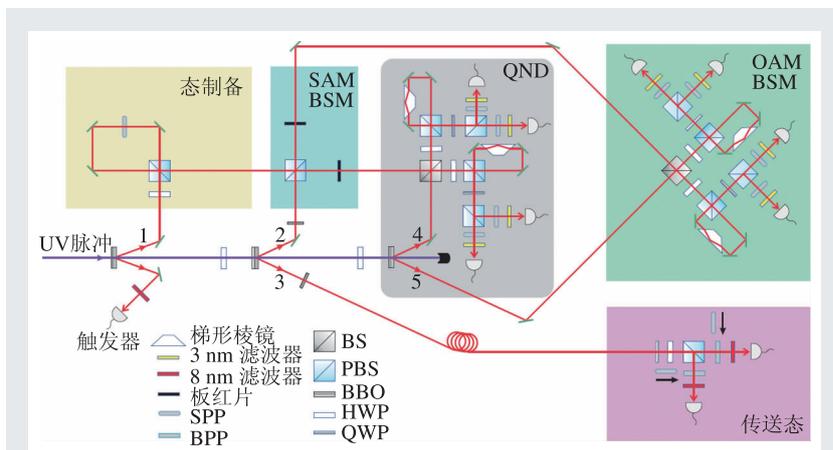


图2 多自由度量子体系隐形传态实验装置。紫光飞秒脉冲被聚焦在3块BBO晶体上，产生3对光子：1-t、2-3和4-5。第1对光子，t被用作触发光子1，光子1用来制备拟传输的自旋—轨道角动量复合量子态，第2对光子2-3是自旋—轨道角动量超纠缠源，第3对光子4-5是轨道角动量纠缠源。超纠缠 Bell 态测量分3步完成：(1)自旋角动量 Bell 态测量；(2)单光子非破坏测量；(3)轨道角动量 Bell 态测量。Bob 处接收到的复合量子态在自旋和轨道角动量两个自由度分别进行测量，其中自旋角动量的测量通过偏振分束器、1/4波片和1/2波片组合完成，轨道角动量的测量通过螺旋位相板和二元位相板以及单模光纤组合完成

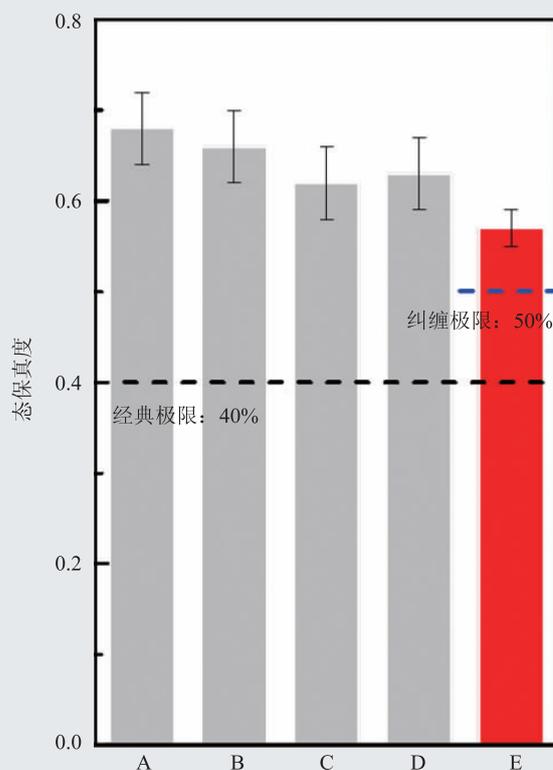


图3 多自由度量子体系隐形传态实验结果，柱状图指示出5个复合量子态的传输保真度

$$(|0\rangle^s + |1\rangle^s)(|0\rangle^o + |1\rangle^o)/2, \quad |\varphi\rangle_D = (|0\rangle^s + i|1\rangle^s)(|0\rangle^o + i|1\rangle^o)/2, \quad |\varphi\rangle_E = (|0\rangle^s|0\rangle^o + |1\rangle^s|1\rangle^o)/\sqrt{2};$$

其中 $|0\rangle^s$ 和

$|1\rangle^s$ 表示自旋角动量自由度的两个量子比特，分别由水平线偏振态和竖直线偏振态编码， $|0\rangle^o$ 和 $|1\rangle^o$ 表示轨道角动量自由度的两个量子比特，由1阶模式两个 OAM 量子态编码，对应的每个光子携带的 OAM 为 $\pm h$ 。这5个量子态可以划分为3大类：第一类是 $|\varphi\rangle_A$ 和 $|\varphi\rangle_B$ ，为自旋—轨道角动量计算基矢的直积态；第二类是 $|\varphi\rangle_C$ 和 $|\varphi\rangle_D$ ，为计算基矢叠加态的直积；第三类是 $|\varphi\rangle_E$ ，为自旋—

轨道角动量杂化纠缠态。

我们通过测量 Bob 处接收到的量子态的保真度来分析实验结果，如图3所示，获得5个态的保真度均大于0.4这一经典极限^[11]，并且对于纠缠态，其保真度也大于0.5这一两体纠缠保真度的下限要求^[12]。这些结果表明，我们成功地实现了单光子自旋—轨道角动量双自由度的量子隐形传态。

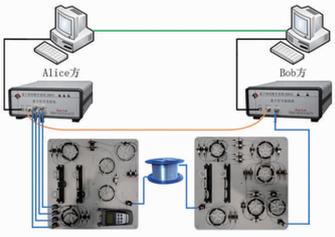
参考文献

[1] Bennett C H *et al.* Phys. Rev. Lett., 1993, 70: 1895
 [2] Bouwmeester D *et al.* Nature, 1997, 390: 575
 [3] Krauter H *et al.* Nat. Phys., 2013, 9: 400
 [4] Riebe M *et al.* Nature, 2004, 429: 734
 [5] Steffen L *et al.* Nature, 2013, 500: 319
 [6] Nilsson J *et al.* Nat. Photon., 2013, 7: 311
 [7] Pfaff W *et al.* Science, 2014, 345: 532
 [8] Pan J W *et al.* Rev. Mod. Phys., 2012, 84: 777
 [9] Yao A M, Padgett M J. Adv. Opt. Photon., 2011, 3: 161
 [10] Wei T C *et al.* Phys. Rev. A, 2007, 75: 060305(R)
 [11] Hayashi A *et al.* Phys. Rev. A, 2005, 72: 032325
 [12] Gühne O, Toth G. Phys. Rep., 2009, 474: 1



安徽量子通信技术有限公司
 地址：安徽省合肥市望江西路800号创新产业园D3
 电话：400-885-0929 65368589(传真) 13395515356
 网址：www.quantum-info.com
 邮箱：feng.liu@quantum-info.com

BB84 量子密钥分发教学科研系统







QKDS-84-T型量子信号发射机 QKDS-84-R型量子信号接收机
 QKDS-84-P-T型光学测试平台发射端 QKDS-84-P-R型光学测试平台接收端

BBO小型纠缠源系统

系统组成

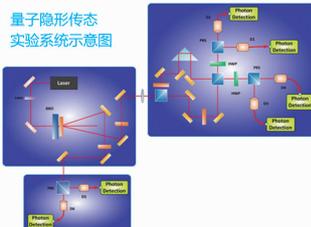


技术指标

- 泵浦光功率 (mW) 100
- 可见度 92%
- 贝尔不等式违反程度 $S > 2.3$
- P, N偏振对比度 $> 7:1$
- H, V偏振对比度 $> 25:1$
- 单光子计数率 (cps) < 10
- 纠缠光子对亮度 $> 100k$

量子隐形传态实验系统

量子隐形传态实验系统示意图



数据采集&分析显示界面





提供最专业的量子信息科研系统

• BB84量子密钥分发教学科研系统 • 小型纠缠源 • 高亮度纠缠源 • 单光子干涉系统 • 双光子干涉系统 • 双缝量子成像系统 • 量子隐形传态 • 单光子探测器 • 皮秒脉冲激光器