

利用 Sagnac 干涉仪实现光子轨道角动量分束器

付栋之 贾俊亮 周英男 陈东旭 高宏 李福利 张沛

Realisation of orbital angular momentum sorter of photons based on Sagnac interferometer

Fu Dong-Zhi Jia Jun-Liang Zhou Ying-Nan Chen Dong-Xu Gao Hong Li Fu-Li Zhang Pei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 130704 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.130704

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130704>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I13>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种超快时间分辨速度干涉仪的设计和理论研究

[Design and theoretical research of an ultrafast time-resolved velocity interferometer](#)

物理学报.2014, 63(6): 060703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.060703>

软 X 射线双频光栅剪切干涉法研究

[Studies on soft X-ray shearing interferometry with double-frequency gratings](#)

物理学报.2013, 62(7): 070703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.070703>

基于飞秒光频梳的压电陶瓷闭环位移控制系统

[Closed-loop displacement control system for piezoelectric transducer based on optical frequency comb](#)

物理学报.2013, 62(7): 070702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.070702>

法-珀干涉绝对距离测量中的声光移频器双通道配置方法

[Method on double-pass acousto-optic frequency shifter in absolute distance measurement using Fabry-Pérot interferometry](#)

物理学报.2012, 61(18): 180701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.180701>

基于法拉第旋镜的干涉型光纤传感系统偏振相位噪声特性研究

[Investigation of polarization-induced phase noise in interferometric optical fiber sensing system based on FRM](#)

物理学报.2012, 61(15): 150701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.150701>

## 利用Sagnac干涉仪实现光子轨道角动量分束器\*

付栋之 贾俊亮 周英男 陈东旭 高宏 李福利 张沛†

(西安交通大学理学院应用物理系, 西安 710049)

(2014年12月5日收到; 2015年1月30日收到修改稿)

光子轨道角动量量子态具有高维和光学涡旋特性, 在经典和量子领域展示出了巨大的应用潜力, 目前对其的研究已成为物理学的一个热点. 本实验研究了利用Sagnac干涉仪干涉的方法将具有不同轨道角动量的光束无破坏地分离到不同的路径, 即实现光子轨道角动量分束器. 实验中利用此分束器验证了对几种不同轨道角动量态(包含叠加态)的分离, 得到了与理论预期相符的实验结果. 这种对轨道角动量态的区分的方法相比已有的其他区分方法具有较好的稳定性, 而且可用于区分叠加态, 也可以达到单光子水平, 最重要的是实现了不同的轨道角动量本征态无破坏的与路径比特耦合. 这种新方法对高密度通信、量子纠缠、量子保密通信、量子计算与量子信息等方面有着重要的意义.

**关键词:** 轨道角动量, Sagnac干涉仪, 轨道角动量分束器

**PACS:** 07.60.Ly, 42.50.Dv, 42.50.Tx, 95.75.Kk

**DOI:** 10.7498/aps.64.130704

## 1 引言

光子角动量包含自旋(光的偏振)和轨道(光的横模)两部分. 1909年, 在爱因斯坦光子理论<sup>[1]</sup>提出的几年后, Poynting发现光子具有自旋角动量<sup>[2]</sup>, 然而光的轨道角动量(OAM)却直到1992年才被Allen等所认识<sup>[3]</sup>. 光的自旋角动量和偏振有关, 若一束光是圆偏振光, 则光束中每个光子都携带了 $\sigma\hbar$ 的自旋角动量. 由于电磁场的横波性,  $\sigma$ 只能取 $\pm 1$ 两个值, 分别对应左旋圆偏振和右旋圆偏振. 这两个态是量子力学中自旋算符的本征态, 因此光的自旋角动量态(偏振态)是二维量子态. 光的轨道角动量和复电场相位角有关, 轨道角动量来源于绕传播方向的相位波前. 一个光子轨道角动量值为 $l\hbar$ 对应螺旋形等相位面, 螺旋相位项为 $\exp(il\varphi)$ ,  $l$ 为轨道角动量量子数,  $l$ 的正负代表旋转方向不同. 由于 $l$ 可以是任意整数, 所以单光子有无数个轨道角动量正交本征态, 即光子轨道角动量具有高维特性. 近年来, 科学家在量子信息的研究中发现, 高

维量子态相比于二维量子态体现出更加特殊和优越的性质, 如在基础量子理论的验证方面, 高维量子体系相比于二维量子体系更大程度的违背贝尔不等式<sup>[4,5]</sup>, 这使得寻找高维量子态很有必要, 而光子轨道角动量具有高维特性. 由于光子又是很好的量子系统和信息载体, 近年来基于光子轨道角动量的高维量子态研究, 引起了人们的广泛兴趣<sup>[6,7]</sup>.

光子轨道角动量的发现, 除了让人们更进一步理解光的本质外, 还拓展了光的应用范围, 有着十分重要的科学意义和应用价值. 目前, 光的轨道角动量除了在经典领域(例如光镊<sup>[8,9]</sup>、高密度通信等<sup>[10]</sup>)有着重要的应用价值外, 光子轨道角动量子态的高维特性使得其在量子信息领域展现出了诱人的应用前景<sup>[11,12]</sup>. 在量子信息处理中, 如果利用光子轨道角动量进行编码, 最后解码信息的时候, 必然要求对光子轨道角动量进行探测, 所以, 对光子轨道角动量的区分显得尤为重要. 实验上对光子轨道角动量子态的测量已有很大的发展, 常见的区分方法有计算全息光栅法<sup>[11]</sup>、干涉图样区分法(如拉盖尔-高斯模(LG模)与平面波干涉<sup>[13,14]</sup>,

\* 国家自然科学基金(批准号: 11374008, 11074198, 11074199)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangpei@mail.ustc.edu.cn

LG 模与它的镜像干涉<sup>[15]</sup>、衍射图样区分法(如双缝干涉<sup>[16,17]</sup>、多孔板<sup>[18,19]</sup>、等边三角缝<sup>[20]</sup>), 以上几种方法操作起来简单且快, 但是衍射图样和干涉图样法都是通过观察最后的强度分布的特征来实现对光束模式的区分, 这个特点限制了它们在单光子水平下的应用. 另外, 因为这些方法在探测时破坏了被检测的轨道角动量, 所以它们只能用来探测轨道角动量态, 而不能作为态的分离器. 利用两臂加入 Dove 棱镜的 Mach-Zehnder 干涉仪来区分单光子的轨道角动量的方法<sup>[21-23]</sup>, 可以将不同的轨道角动量本征态无破坏地分束到不同的路径, 级联  $N - 1$  个干涉仪可以分离  $N$  个不同的轨道角动量态. 但是, Mach-Zehnder 干涉仪极不稳定, 级联多个干涉仪对目前还具有很大的挑战.

Sagnac 干涉仪中发生干涉的两个光场在同一段路程内传输, 是一种自平衡的干涉仪, 具有结构紧凑、稳定, 制作相对容易, 对环境噪音不敏感等优点, 所以在实验中用 Sagnac 干涉仪替代 Mach-Zehnder 干涉仪来制作光子轨道角动量态分束器, 这样不但克服 Mach-Zehnder 干涉仪极不稳定的缺点, 还可以实现多个干涉仪的级联, 甚至做到集成. 下面我们将首先详细介绍基于干涉仪的光子轨道角动量态分束器的原理; 然后介绍我们在实验上利用两臂分别加入 Dove 镜的 Sagnac 干涉仪将量子数为奇数和偶数轨道角动量量子态分别分离在不同的端口, 并用五个不同的 LG 模式光束进行区分来验证其可行性; 此外, 实验中还级联了两级 Sagnac 干涉仪, 进一步分离了轨道角动量量子数为  $\pm 1$  的量子态. 我们的实验验证了基于 Sagnac 干涉仪轨道角动量分束器的稳定性和易级联性, 这种方法在高维量子信息中有着重要的应用价值.

## 2 光子轨道角动量分束器的原理

### 2.1 第一级干涉仪

利用两臂带有 Dove 棱镜的 Sagnac 干涉仪能够将不同模式的 LG 模按奇偶分离到干涉仪的两个端口, 光路主要是在 Sagnac 干涉仪两臂上插入了转角差为  $\alpha/2$  的 Dove 棱镜. 实验装置如图 1 所示, 图中光束入射方向为  $z$  轴方向,  $x$  轴和  $y$  轴分别垂直和平行于纸面. Dove 棱镜的角度处于  $\alpha/2$  放置时, 其作用有以下两点: 1) 在  $0^\circ$  位置看, 光场反射, 即整个光场沿轴方向上成镜像对称, 2) 将镜像

光场相对  $x$  轴旋转  $\alpha$  角度. 当 Dove 棱镜 DP1 相对于 Dove 棱镜 DP2 旋转  $\pi/2$  角度时, 经过 Dove 棱镜 DP2 的光束的光场将相对于  $x$  轴翻转, 而经过 Dove 棱镜 DP1 的光束的光场不仅相对于  $x$  轴翻转, 还将相对于  $x$  轴旋转  $\pi$  的角度. 理想情况下, Sagnac 干涉仪两臂路径是等光程的, 每个端口处的两束光的相位差是由反射引起的, 对于 CCD1 端口, 两束光的相位差为  $0^\circ$ , 因而干涉加强; 对于 CCD2 端口, 两束光的相位差为  $\pi$ , 因而完全消光. 当在两臂上同时插入 Dove 棱镜时, 经过两路的光都会多一次反射, 因而反射并不影响两路的相位差. 但当入射光束为轨道角动量量子数为  $l$  的螺旋光束时, 旋转的角度就会影响几何相位<sup>[24]</sup>, 如果两臂 Dove 棱镜有  $\alpha/2$  的角度差, 则使得两臂的光经过 Dove 棱镜后光场相对旋转了  $\alpha$  的角度, 即会在两臂的光场之间引入几何相位差  $l\alpha$ , 则 CCD1 端口两束光的相位差变为  $l\alpha$ , CCD2 端口两束光的相位差变为  $l\alpha + \pi$ .

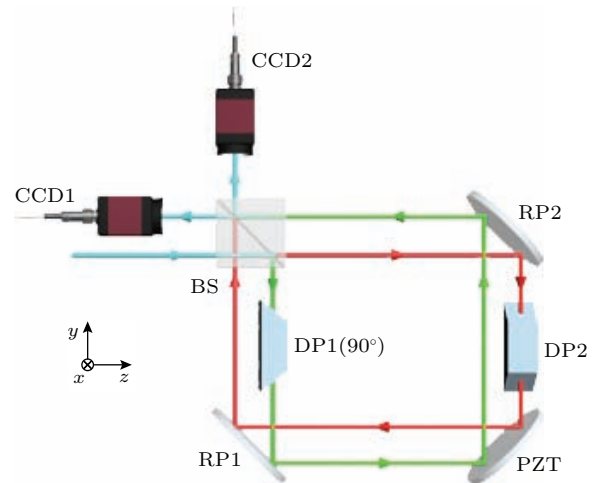


图 1 (网刊彩色) 光子轨道角动量分束器第一级. BS 为分束器; RP1, RP2 为反射镜; DP1, DP2 为 Dove 棱镜; PZT 为压电陶瓷; CCD1, CCD2 为探测器.

Fig. 1. (color online) The first stage of OAM sorting scheme. BS, beam splitter; RP1 and RP2, reflecting prisms; DP1 and DP2, Dove prisms; PZT, piezoelectric transducer; CCD1 and CCD2, charge-coupled device cameras.

实验中我们取  $\alpha = \pi$ , 光通过两臂后, 对于进入 CCD1 的两束光相位差为  $l\pi$ , 对于进入 CCD2 的两束光相位差为  $(l + 1)\pi$ , 因此, 对于轨道角动量量子数  $l$  为偶数的光束在 CCD1 端口会相干加强, 在 CCD2 端口完全消光; 对于轨道角动量量子数  $l$  为奇数的光束在 CCD2 端口会相干加强, 在 CCD1 端口完全消光. 另外, 进入 CCD1 的两束光均发生了

奇数次反射, 光束携带的轨道角动量符号变为相反数, 即轨道角动量量子数为  $l$  的光束, 经过光路从 CCD1 端口出射时将变为轨道角动量量子数为  $-l$ ; 而进入 CCD2 的两束光均发生了偶次反射, 光束携带的轨道角动量不变.

### 2.2 第二级干涉仪

前面我们阐述了如何利用两臂带有 Dove 棱镜的 Sagnac 干涉仪将不同模式的 LG 模按奇偶分开到干涉仪的两个出口, 若想区分多个模式的光束, 将此分束器级联起来即可. 由以上分析可知, 第一级只能区分奇偶, 如果想进一步区分轨道角动量量子数的正负, 如在实验中将轨道角动量量子数  $l$  为  $\pm 1$  的模式区分开, 我们需要在第一级干涉仪后再级联一个干涉仪, 实验装置如图 2 所示. 我们知道, 对于一个单光子来说, 在傍轴近似的条件下, 自旋角动量和轨道角动量是相互分离的, 因此, 我们可将一个光子的态矢量写为两部分的直积形式, 即  $|\sigma\rangle \otimes |l\rangle$ . 假设一束光入射, 其轨道角动量量子数为  $l$ ,  $l$  取  $+1$  或  $-1$ , 经过第一级干涉仪, 光束将从 B 端口出射, 让出射光束先经过半波片 HWP1, 将光束旋转为正  $45^\circ$  偏振光, 此时光束可用态

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle + |V\rangle) \otimes |l\rangle \quad (1)$$

描述, 光束入射到偏振分束器 PBS1, PBS1 使水平偏振光透过, 垂直偏振光反射. 在 Sagnac 干涉仪中插入两个 Dove 棱镜 DP3 和 DP4, 其中 DP3 相对于 DP4 旋转了  $\alpha$  的角度, 则经过两臂的螺旋光束产生一个  $\exp(i l \varphi)$  的相对相移, 即水平偏振光和垂直偏振光之间产生了  $\exp(i l \varphi)$  的相对相移. 两路光在偏振分束器 PBS2 中又重新合成, 经过 Sagnac 干涉仪出射后的水平偏振光和垂直偏振光之间有一个  $\exp(i l \varphi)$  的相对相移, 这个相位延迟项和光束的轨道角动量有关. 从偏振分束器 PBS1 出射的光束经过二分之一波片 HWP2, 其作用是将正负  $45^\circ$  偏振光分别旋转成垂直和水平偏振光, 经过 HWP2 后光子态为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle + |V\rangle) \otimes |l\rangle \\ \rightarrow & \frac{1}{\sqrt{2}}(\exp(i l \alpha)|H\rangle + \exp(-i l \alpha)|V\rangle) \otimes |l\rangle \\ \rightarrow & (\cos(l\alpha)|H\rangle + i \sin(l\alpha)|V\rangle) \otimes |l\rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

如果  $\alpha$  取  $\pi/4$ , 则  $l = +1$  的光束变为左旋圆偏振,  $l = -1$  的光束变为右旋圆偏振, 将其通过四分之一波片 QWP 后, 可将左旋圆偏振光和右旋圆偏振光分别转换为水平偏振光和垂直偏振光, 然后  $l = \pm 1$  的光束被偏振分束器 PBS2 分离在不同的端口, 因为 PBS 使水平偏振光透过, 使垂直偏振光反射, 因此,  $l = +1$  的螺旋光束将从 D 端口出射,  $l = -1$  的螺旋光束将从 C 端口出射, 这样,  $l = +1$  和  $l = -1$  的光束将被区分开来.

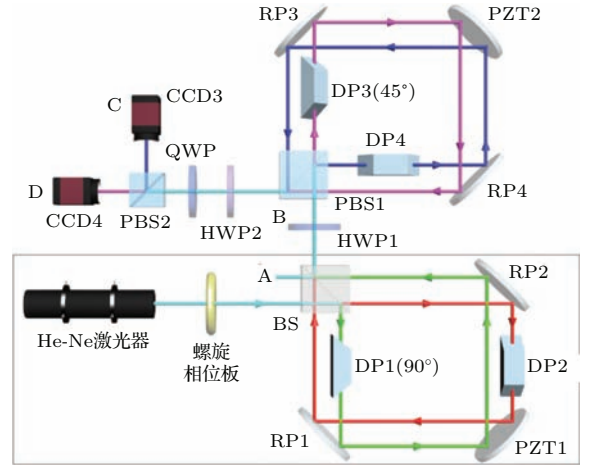


图 2 (网刊彩色) 光子轨道角动量分束器 (级联) (PBS1, PBS2 为偏振分束器; HWP1, HWP2 为二分之一波片; QWP 为四分之一波片)

Fig. 2. (color online) Schematic of OAM-Sorter (cascade). PBS1 and PBS2, polarizing beam splitters; HWP1 and HWP2, half-wave plates; QWP, quarter-wave plate.

### 3 区分光的轨道角动量的实验及结果

实验中我们搭建了一套产生和分离带有轨道角动量的光路, 如图 2 所示, 其中, 实线框中的第一级光路是按轨道角动量量子数的奇偶将其分离在 A 和 B 端口, 其后是级联的第二级光路, 利用轨道角动量和偏振的耦合将轨道量子数为  $\pm 1$  的光束分离在 C 和 D 端口. 实验中我们所用的光源是波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器, 使用 RPC Photonics 公司 VPP-m633 型的螺旋相位板, 其厚为 6.25 mm, 直径为 100 mm, 适用波长为 633 nm. 用 He-Ne 激光器产生基模拉盖尔-高斯光束, 再通过螺旋相位板的适当位置, 产生具有特定  $l$  值的拉盖尔-高斯光束, 让光束通过如图 2 所示的第一级轨道角动量分束器, 分束器将不同模式的 LG 模按奇偶将其分离在干涉仪的两个端口, 从而成功的分离了具有不同模式的螺旋光束. 将 B 端口出射的  $l = +1$  和

$l = -1$  的光束通过图 2 所示的级联第二级光路, 分束器将  $l = +1$  和  $l = -1$  的光束分别分离在不同的端口.

我们利用螺旋相位板分别产生了  $l$  为 0, 1, 2, 3, 4 五种模式的拉盖尔-高斯光束, 将光束通过如图 2 所示的第一级轨道角动量分束器装置, 可将五种模式的光束分离在相应的端口. 实验中将两个 Dove 棱镜 DP1 和 DP2 分别安装在一个二维平移台上, 通过微调两个 Dove 镜和压电陶瓷 (PZT) 来调节 Sagnac 干涉仪两臂的光程差, 实验上要求两臂光强严格相等, 通过微调光路, 干涉可见度达到了 95.98%. 通过 CCD1 和 CCD2 探测 Sagnac 干涉仪两个出口的出射光, 实验结果如图 3 所示.

	CCD1	CCD2	$l$
(a)			0
(b)			1
(c)			2
(d)			3
(e)			4

图 3 Sagnac 干涉仪分离单一模式实验结果 (a)  $l = 0$ ; (b)  $l = 1$ ; (c)  $l = 2$ ; (d)  $l = 3$ ; (e)  $l = 4$

Fig. 3. Experimental results of the first stage Sagnac interferometer: (a)  $l = 0$ ; (b)  $l = 1$ ; (c)  $l = 2$ ; (d)  $l = 3$ ; (e)  $l = 4$ .

由图 3(a), (c), (e) 可以看出, 当入射的螺旋光束轨道角动量为 0, 2, 4 时, 通过改进的 Sagnac 干涉仪后, CCD1 端口干涉加强, 而 CCD2 端口出现消光; 由图 3(b), (d) 可以看出, 当入射的螺旋光束轨道角动量为 1, 3 时, 通过改进的 Sagnac 干涉仪

后, CCD2 端口干涉加强, 而 CCD1 端口出现消光, 即利用该装置成功的将不同模式的 LG 模按奇偶分开到干涉仪的两个出口.

由 B 端口出射的轨道角动量量子数为  $l = +1$  和  $l = -1$  的光束分别通过级联的第二级干涉仪, 则  $l = +1$  和  $l = -1$  的光束将分别从不同端口出射, 用 CCD3 和 CCD4 探测级联的 Sagnac 干涉仪两个出口的出射光, 实验结果如图 4 所示. 由图 4(a), (b) 可一看出, 第二级干涉仪可以将轨道角动量量子数为  $l = +1$  和  $l = -1$  的光束分别分离到 CCD4 和 CCD3 端口. 实验中我们还对  $l = \pm 1$  的叠加态进行分离, 如图 4(c), 实验结果很好地验证了此分束器可以分离叠加态.

	CCD3	CCD4	$l$
(a)			+1
(b)			-1
(c)			±1

图 4 Sagnac 干涉仪第二级分离模式实验结果 (a)  $l = 1$ ; (b)  $l = -1$ ; (c)  $l = \pm 1$

Fig. 4. Experimental results of the second stage Sagnac interferometer. (a)  $l = 1$ ; (b)  $l = -1$ ; (c)  $l = \pm 1$ .

#### 4 总结与展望

实验中的轨道角动量分束器类似于偏振分束器, 可以将具有不同轨道角动量的光束分离在不同的光学路径上, 这意味着此分束器可以产生光学路径和轨道角动量的纠缠, 就如偏振分束器可以产生光学路径和偏振的纠缠一样, 这对产生高维复合量子纠缠具有重要意义. 此轨道角动量态的分束器实现将不同的轨道角动量本征态无破坏地分束到不同的路径, 而且稳定性比较好, 可以实现级联甚至集成. 实验中我们还区分轨道角动量量子数为  $l = +1$  和  $l = -1$  以及两者的叠加态的光束, 下一

步我们将对更大的 $l$ 值进行正负的区别,并将这种装置用于单光子水平,开发其在量子信息和量子计算领域的应用.我们的工作在于量子信息处理、超密编码<sup>[13]</sup>、量子隐形传态<sup>[14]</sup>、量子计算<sup>[15]</sup>、高密度通信等方面有很大的应用前景.

## 参考文献

- [1] Einstein A 1905 *Ann. d. Phys.* **322** 549
- [2] Poynting J H 1909 *Proc. Roy. Soc. London Ser. A* **82** 560
- [3] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R, Woerdman J 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [4] Collins D, Gisin N, Linden N, Massar S, Popescu S 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 040404
- [5] Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 240401
- [6] Arnold S F, Allen L, Padgett M 2008 *Laser & Photon. Rev.* **2** 299
- [7] Yao A M, Padgett M J 2011 *Advances in Optics and Photonics* **3** 161
- [8] Friese M, Nieminen T, Heckenberg N, Rubinsztein-Dunlop H 1998 *Nature* **394** 348
- [9] Padgett M, Bowman R 2011 *Nat. Photonics* **5** 343
- [10] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, Ahmed N, Yan Y, Huang H, Ren Y, Yue Y, Dolinar S, Tur M 2012 *Nat. Photonics* **6** 488
- [11] Mair A, Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2001 *Nature* **412** 313
- [12] 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
- [13] Huang H, Ren Y, Yan Y, Ahmed N, Yue Y, Bozovich A, Erkmen B I, Birnbaum K, Dolinar S, Tur M 2013 *Opt. Lett.* **38** 2348
- [14] Padgett M, Arlt J, Simpson N, Allen L 1996 *American Journal of Physics* **64** 77
- [15] Harris M, Hill C, Tapster P, Vaughan J 1994 *Phys. Rev. A* **49** 3119
- [16] Sztul H, Alfano R 2006 *Opt. Lett.* **31** 999
- [17] Wang Z, Zhang Z, Lin Q 2009 *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* **11** 085702
- [18] Berkhout G C, Beijersbergen M W 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 100801
- [19] Berkhout G, Beijersbergen M 2009 *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* **11** 094021
- [20] Hickmann J, Fonseca E, Soares W, Ch Shávez-Cerda 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 053904
- [21] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, Franke-Arnold S, Courtial J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 257901
- [22] Leach J, Courtial J, Skeldon K, Barnett S M, Franke-Arnold S, Padgett M J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 013601
- [23] Zhang W, Qi Q, Zhou J, Chen L 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 153601
- [24] Courtial J, Robertson D, Dholakia K, Allen L, Padgett M 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4828

# Realisation of orbital angular momentum sorter of photons based on Sagnac interferometer<sup>\*</sup>

Fu Dong-Zhi Jia Jun-Liang Zhou Ying-Nan Chen Dong-Xu Gao Hong  
Li Fu-Li Zhang Pei<sup>†</sup>

(MOE Key Laboratory for Nonequilibrium Synthesis and Modulation of Condensed Matter, Department of Applied Physics,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

( Received 5 December 2014; revised manuscript received 30 January 2015 )

## Abstract

Orbital angular momentum (OAM) of photons has both classical and quantum applications due to its feature of optical vortex and infinite dimension. OAM discrimination is one of the basic problems, which has been paid much attention recently. Here we present an interferometer method in which a Sagnac interferometer with a Dove prism is placed on each arm to separate the different OAM of photons into different output ports, namely, OAM sorters. We demonstrate experimentally the feasibility of OAM sorter by dividing different OAM states into different output ports. Using the cascade interferometers, we also sort the superposition state successfully. Experimental results are in good agreement with the theoretical predictions. Compared with other methods, this method is more stable and can be used to separate superposition states into single photon levels. Furthermore, this method can also be used to couple OAM modes with spatial modes, a very important method for manipulating OAM states. It is a useful method and has potential applications in high-capacity optical communication, quantum entanglement, quantum cryptography, quantum computation and quantum information.

**Keywords:** orbital angular momentum, Sagnac interferometer, OAM sorter

**PACS:** 07.60.Ly, 42.50.Dv, 42.50.Tx, 95.75.Kk

**DOI:** [10.7498/aps.64.130704](https://doi.org/10.7498/aps.64.130704)

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11374008, 11074198, 11074199).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zhangpei@mail.ustc.edu.cn](mailto:zhangpei@mail.ustc.edu.cn)