

涡旋光在大学物理实验教学中的探究

王志平 吴 伟 宋 飞 王雨龙 王雨杭 王 浩
(安徽大学物理与光电工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要 涡旋光具有独特的强度和螺旋相位结构而备受人们的关注。基于涡旋光与铷原子相互作用, 本文研究分析了入射光的频率、拓扑核数以及偏振状态等参量涡旋光束轮廓和能量分布的影响。实验结果表明这些参量可以实现对涡旋光空间分布的有效调制。我们的实验探索能让大学生对涡旋光有更深入的理解, 拓展他们的眼界。本实验研究也将在大学物理实验教学方面具有潜在的应用。

关键词 涡旋光; 螺旋相位板; 大学物理实验

EXPLORATION OF VORTEX LIGHT IN THE TEACHING OF COLLEGE PHYSICS EXPERIMENT

WANG Zhiping WU Wei SONG Fei WANG Yulong WANG Yuhang WANG Hao

(School of Physics and Optoelectronics Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601)

Abstract Vortex light has gained much interest due to its unique intensity and phase structures. Based on the interaction of vortex light and rubidium atoms, the effects of the frequency of incident light, topological charge and polarization state on the vortex beam profile and energy distribution are studied and analyzed in this paper. The experimental results show that the space distribution of the vortex beam can be effectively modulated via these parameters. Our experiment can enable college students to have a deeper understanding in the vortex light, and expand their horizons. This experimental investigation will also have potential applications in college physics experiment teaching.

Key words vortex light; vortex phase plate; college physics experiment

涡旋光束^[1]是一种携带轨道角动量(OAM)的光束, 相位结构呈螺旋分布, 在传播过程中, 中心光强始终保持为零, 同时光束中心相位不确定, 具有相位奇点^[2]。正因为涡旋光束空间上特殊的性质, 使得其在光通讯^[3]、光学精密测量^[4]、光学捕获、光学旋转以及量子通信等领域具有很高的研究价值^[5]。

近些年来, 涡旋光束与粒子的相互作用成为人们关注的研究热点之一。由于涡旋光携带有轨

道角动量, 故可以利用轨道角动量把粒子囚禁在光束的中心从而实现对粒子的精确操控和移动。当一束聚焦的 OAM 光照射到粒子上, 粒子会吸收光子并转移 OAM, OAM 的转移使粒子获得了一个扭矩从而使粒子围绕某个点旋转, 一般称为光学扳手。所以可以利用涡旋光束作为光学镊子^[6]或者光学扳手^[7]来操纵粒子。近来, 涡旋光与热原子相互作用方面也引起人们的关注。如西安交通大学张彦鹏小组研究了光子带隙结构中携

收稿日期: 2022-04-22

基金项目: 省级大学生创新创业训练计划项目(S202110357048)和国家自然科学基金(11674002)资助。

通讯作者: 王志平, 男, 安徽大学副教授, 主要从事大学物理教学和量子光学研究工作, zhipwang@126.com。

引文格式: 王志平, 吴伟, 宋飞, 等. 涡旋光在大学物理实验教学中的探究[J]. 物理与工程, 2023, 33(1): 143-146.

Cite this article: WANG Z P, WU W, SONG F, et al. Exploration of vortex light in the teaching of college physics experiment[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(1): 143-146. (in Chinese)

带轨道角动量的涡旋六波混频现象^[8],通过改变耦合场的功率得到了混频场通过热铷原子蒸汽后的干涉图样,并分析了其传播特性。李福利小组研究了矢量涡旋光在铷原子蒸汽中的透射特性^[9],观察到与铷原子相互作用之后产生了四瓣图案,并用量子相干性很好地解释了该现象。此外他们还研究了混合阶矢量涡旋光在铷原子蒸汽中的极化旋转问题^[10],利用铷原子蒸汽中传输的非线性效应解释了混合阶矢量涡旋光在自由空间中传输时极化旋转受限制的问题,并实现了混合阶矢量涡旋光通过铷原子蒸汽时的极化分布调制。在上述工作的基础之上,本文利用 Sagnac 环路制备了具有等量异号拓扑核数的叠加态涡旋光,经过与热⁸⁵Rb 原子发生相互作用后,研究分析拓扑核数、入射光频率以及偏振状态等参量对涡旋能量分布和光束轮廓的影响。该实验探索不仅能让大学生对涡旋光有更深入的理解,也有助于他们实验动手能力,独立学习能力,团队协作能力以及创新思维能力的提升。

1 主要实验仪器

1.1 螺旋相位板

螺旋相位板是厚度相对中心旋转方位角成比例变化的透明板。当波束通过这个相位板时,由于相位板的螺旋面结构导致透射光束的光程差不同,引起相位的改变量也不同,从而产生一个具有螺旋相位的因子。让光通过螺旋相位板不同的区域可以得到不同拓扑核数的涡旋光。

1.2 激光器

在实验中采用 Toptica 公司生产的 DL100 型外腔式可调谐半导体激光器激光器,主要由驱动电路、激光二极管以及光栅组成。激光二极管可以输出连续的窄线宽激光,通过调整光栅的角度可以微调波长和扫描。在实验中激光器的工作波长为 780nm。

1.3 相机式光束质量分析仪

Thorlabs 相机式光束质量分析仪(CCD)用于光束密度分布二维分析,其分辨率为 1360×1024 像素,低噪声: $S/N \geq 62\text{dB}$,最短曝光时间 $20\mu\text{s}$ 。

2 实验搭建

实验装置如图 1 所示。利用螺旋相位板产生

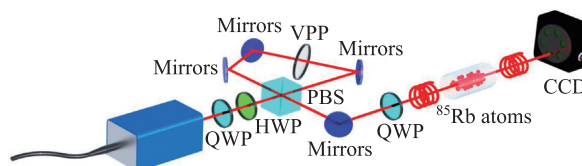


图 1 实验装置图,其中:QWP 为四分之一波片,HWP 为二分之一波片,Mirrors 为反射镜,VPP 为螺旋相位板,PBS 为偏振分光棱镜,⁸⁵Rb atoms 为铷原子气室,CCD 为相机式光束质量分析仪

涡旋光束,通过 Sagnac 干涉仪制备初始轨道角动量和偏振的叠加态。

先搭建饱和吸收谱光路以确保能找到⁸⁵Rb 原子的共振频率。其原理主要是利用光学烧孔效应,由此我们可以得到介质原子能级的超精细结构。需要注意的是在图 1 中没有画出饱和吸收光谱的光路,而是用激光器来代替通过饱和吸收光谱后产生的激光。

激光通过四分之一波片和二分之一波片后传输到偏振分光棱镜(PBS),被分为水平偏振光和垂直偏振光两束光,其中二分之一波片和偏振分光棱镜的组合可以用来改变入射光的功率;直接透过的是水平偏振光,透过螺旋相位板后被反射镜反射两次;被反射的是垂直偏振光,透过螺旋相位板后被反射镜反射一次;由于被反射镜反射一次后会使拓扑核数 l 变成 $-l$,所以从环路出来的光具有等量异号的拓扑核数。接着被反射镜反射后通过四分之一波片进入 Rb 原子气室中,Rb 原子气室连接有温控系统方便控制原子气室的温度。入射光在原子气室内与⁸⁵Rb 原子发生相互作用,最后经过热原子输出的涡旋光通过光束质量分析仪(CCD)接入电脑中观察涡旋光的光束轮廓和能量分布。

为了更好地观察到实验现象,在实验过程中要注意当光入射到偏振分光棱镜时要用光功率计测量功率,以保证被分开的水平偏振光和垂直偏振光的强度之比为 1:1。螺旋相位板的位置要保证从螺旋相位板的两边到偏振分光棱镜(PBS)的光程相等,以便在光束质量分析仪(CCD)中能观察到更详细的光束轮廓和更清晰的功率密度分布。为此我们在实验中设计一个直角梯形环路,在此环路中两条短的直角边之间的长度加起来等于第三条直角边的长度,然后把螺旋相位片放在直角梯形斜边的中点位置,这样就能确保经过螺旋相位片的两束光的光程相等。

3 涡旋光的产生

实验中采用 ^{85}Rb 的 D_2 线($5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$)其跃迁频率为 384.230406THz ,激光器工作波长约为 780.241nm 。控制入射光的功率为 5mW ,原子气室的温度控制在 60°C 。分别调节入射光的频率为 384.22912THz 和 384.23215THz ,让光通过螺旋相位板不同的区域以便得到不同拓扑核数的叠加涡旋光,通过CCD观察与铷原子相互作用后的出射光的光束轮廓和能量分布,如图2所示。

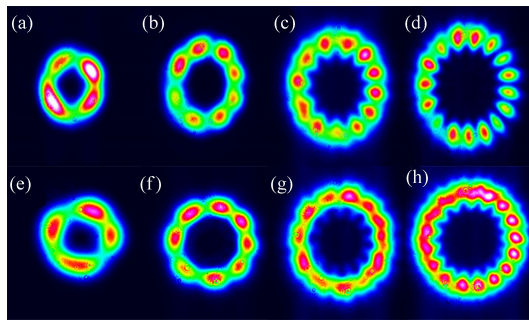


图2 从左往右拓扑核数依次为 $l=1, l=2, l=3, l=4$ 。第一排是入射光频率为 384.22912THz 得到的图像,第二排是入射光频率为 384.23215THz 得到的图像

入射光频率为 384.22912THz ,拓扑核数 $l=1$ 时得到的图像如图2中(a)图所示,入射的原高斯光束变成四片对称的花瓣状光斑,光束中心光强为零。当 $l=2, l=3, l=4$ 时,分别对应图2中的图2(b)~(d)。可以看出,随着拓扑核数 l 的增加,所观察到的图样的瓣数也随之增加,能量分布也随之不均匀。瓣状图样的数量 n 与拓扑核数满足 $n=2|l_1-l_2|$ 的关系,其中 l_1 和 l_2 分别是经过偏振分光棱镜分束后的两束光所带的拓扑核数。入射光频率为 384.23215THz 时,拓扑核数分别为 $l=1, l=2, l=3, l=4$ 所得到的图像对应于图2(e)~(h)。与上面类似,随着拓扑核数 l 的增加,所形成的涡旋光的瓣数也随之增加,瓣状图样的数量依旧满足 $n=2|l_1-l_2|$ 的关系。与入射光频率为 384.22912THz 时相比,入射光频率在 384.23215THz 时与铷原子相互作用之后的出射光能量更强,说明频率会影响与铷原子相互作用后的出射光的能量。

以上研究的都是频率对水平偏振和垂直偏振叠加态涡旋光与铷原子相互作用的影响,为了进一步的了解偏振状态对所产生的光斑的影响,我

们在上面的实验基础上,在光束质量分析仪(CCD)之前加上一个偏振分光棱镜(PBS),由于偏振分光棱镜允许水平偏振光透过而反射垂直偏振光,故可以通过光束质量分析仪观察到单一的水平偏振和垂直偏振。

同样分别将频率调至 384.230406THz 和 384.23215THz ,调整螺旋相位板的位置使得拓扑核数 $l=4$,控制入射光功率为 5mW ,原子气室温度为 60°C ,通过光束质量分析仪(CCD)观察到出射光的光束轮廓和光束能量密度分布如图3所示。

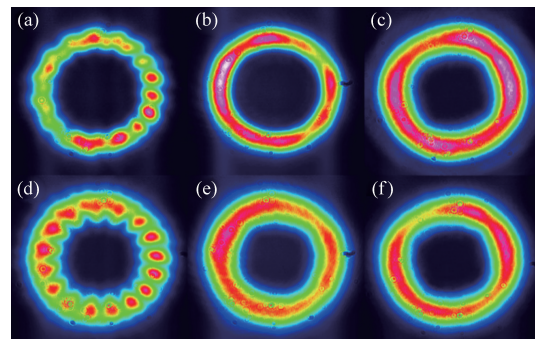


图3 从左往右依次为水平与垂直偏振叠加态、水平偏振、垂直偏振。第一排图样入射光频率为 384.22912THz ,第二排图样入射光频率为 384.23215THz

如图3所示,图3(a)、(b)、(c)是在入射光频率为 384.22912THz 下得到的出射光光束轮廓和能量分布;图3(d)、(e)、(f)是在入射光频率为 384.23215THz 下得到的出射光光束轮廓和能量分布。从图中可以清晰地看到水平偏振状态下和垂直偏振状态下都是标准的圆环状,但是等量异号拓扑核数的涡旋光叠加后变成花瓣状的光斑,这是由于水平偏振光和垂直偏振光叠加后再与热 ^{85}Rb 原子发生相互作用,导致光束轮廓变化和光束能量的重新分布。图3(d)与图3(a)相比能量分布更均匀,说明入射光频率对与铷原子相互作用后的出射光的能量分布有一定的影响。

4 实验结果分析

在实验中我们利用螺旋相位板产生涡旋光,并使用Sagnac干涉仪制备初始叠加态,研究了不同频率、不同拓扑核数情况下的涡旋光与热原子相互作用之后的光束轮廓和能量分布情况,并分析了不同偏振状态对光束能量和光束轮廓的影响。结果表明,在控制激光功率、原子气室温度以

及频率一定的条件下,与铷原子相互作用之后的出射光的轮廓会变成花瓣状,且瓣数会随着拓扑核数的增加而增加,其瓣状光斑的数量满足 $n = 2|l_1 - l_2|$ 的关系,其中 l_1 和 l_2 分别是经过螺旋相位板后两束光所带的拓扑核数。 ^{85}Rb 的 D_2 线具有超精细的能级结构,入射光的频率不同会导致原子跃迁能级的改变,这会影响原子对入射光束的吸收,进而导致能量分布不均匀,所以当改变入射光频率时,相应的能量分布也会发生改变。当只有水平偏振或者垂直偏振时,其光束轮廓为标准的圆环状,能量分布也较为均匀。当两束具有等量异号拓扑核数的涡旋光叠加时,由于叠加后的涡旋光与热 ^{85}Rb 原子相互作用,导致叠加的涡旋光轮廓变为花瓣状,同时引起其能量的重新分布。基于涡旋光特殊的能量和相位结构,相信其在光信息处理、光通信和量子信息等领域有重要的应用前景^[11,12]。

5 涡旋光在物理实验教学中的探究

大学物理实验是一门重要的基础课程,对培养学生严谨的科学素养和创新实践能力有着无可替代的作用,更为后续课程培养正确的学习态度奠定基础。依托省级大学生创新创业训练计划项目,已有3名本科生(王雨龙,王雨杭,王浩)参与到本次实验教学过程来。通过该实验的探索,他们从开始实验时对实验仪器不熟悉,基础光路的搭建有困难,到实验完成时已经可以熟练使用各种实验室仪器设备,独立完成光路搭建,实践动手能力得到了极大地提高。从实验选题到实验搭建、方案改进、处理数据的过程中,他们在独立学习能力、团队协作能力以及创新思维能力方面更是有显著的提升。此外,这次实验教学研究有效完善了对涡旋光的认知,弥补了理论教学过于固化的被动式学习,转变了他们对实验课程的态度,变被动接受为主动探索,使实验过程从机械性的简单重复走向更深层次的理解,有效提高了实验教学效率。本文只是涡旋光在物理实验教学研究中的一个初步探索,相信其会在未来大学物理专业实验教学中有更广泛的应用空间。

6 结语

近年来,依托国家一流学科建设的推进,安徽

大学在光学专业实验教学场地、专业实验教学规模及专业实验设备等方面都有很大的改观。通过相关专业实验研究在未来大学物理实验教学中的探索和应用,将有助于激发本科生的学习兴趣,提升他们对实验仪器的认识和使用能力,增强同学们对涡旋光的理解。

参 考 文 献

- [1] FANG L, PADGETT M J, WANG J. Sharing a common origin between the rotational and linear Doppler effects[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(6):1700183.
- [2] 袁小聪. 光学旋涡光场调控与应用[J]. *光学与光电技术*, 2016, 14(6):13-16.
YUAN X C. Regulation and application of optical vortex light field[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2016, 14(6):13-16. (In Chinese)
- [3] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [4] PHILLIPS D B, LEE M P, SPEIRITS F C, et al. Rotational Doppler velocimetry to probe the angular velocity of spinning microparticles[J]. *Physical Review A*, 2014, 90(1): 011801.
- [5] 印建平, 刘南春, 夏勇, 等. 空心光束的产生及其在现代光学中的应用[J]. *物理学进展*, 2004, 24(3): 336-380.
YIN J P, LIU N C, XIA Y, et al. Generation of hollow laser beams and their applications in modern optics[J]. *Progress in Physics*, 2004, 24(3): 336-380. (In Chinese)
- [6] HE H, FRIESE M E J, HECKENBERG N R, et al. Direct Observation of Transfer of Angular Momentum to Absorptive Particles from a Laser Beam with a Phase Singularity[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(5): 826-829.
- [7] SIMPSON N B, DHOLAKIA K, ALLEN L, et al. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(1): 52-54.
- [8] HUANG L, WANG Z, SUN Y, et al. Dressed optical vortex in a hot atomic medium[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(9): 096001.
- [9] YANG X, CHEN Y, WANG J, et al. Observing quantum coherence induced transparency of hybrid vector beams in atomic vapor[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2911-2914.
- [10] LUO D J, HU H J, PAN C R, et al. Nonlinear control of polarization rotation of hybrid-order vector vortex beams[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(11): 115612.
- [11] PADGETT M J. Orbital angular momentum 25 years on[J]. *Optics Express*, 2017, 25: 11265-11274.
- [12] FORBES A, OLIVEIRA M, DENNIS M R. Structured light. *Nature Photonics*, 2021, 15: 253-262.