陕西省自然科学奖公示信息

(2021年度)

**一、项目基本情况**

|  |  |
| --- | --- |
| 项目名称 | 光场横向模式的产生机理与传输特性研究 |
| 主要完成人 | 高宏、张沛、刘瑞丰、卫栋、王云龙 |
| 主要完成单位 |  西安交通大学 |

**二、提名意见**（适用于部门、机构提名）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 提 名 者 | 陕西省物理学会 | 提名等级 | □一等奖 ☑二等奖及以上 |
| 提名意见：具有特殊空间模式的光场在光信息传递、光束微粒控制方面的潜在应用价值，引起人们的广泛关注。近年来，人们陆续发现一些在自由空间传播的特殊光学模式，如拉盖尔-高斯模式（LG模式）、Airy光束等。光子的LG模式对应其轨道角动量，具有高维特征，在量子通信中，相比于以偏振或其他两态正交系统，轨道角动量态信息携带量大、抗噪能力强，在量子计算和量子信息处理中具有十分重要的应用前景。Airy光束具有的无衍射、自愈合、自加速特性，赋予了其在微粒操控方面的独特优势。项目立足于近年来发现的这些特殊光学模式，基于线性光学器件及原子介质，针对光场横向模式的产生机理、模式识别与传输特性展开系统研究，取得重要研究成果。研究了自由空间通信系统在具有湍流环境下涡旋光束的传输特性，提出并在实验上实现了利用量子光学的Hanbury Brown and Twiss 效应，简单快速的测量部分相干光的交叉关联函数，从而准确获得OAM光所携带的信息。在特殊空间模式光场的产生方面，提出基于光学筛子的纯振幅光学器件，可以用于精确制备各种光场，同时该方案可有效用于X射线与电子束调控等领域；在基于光子轨道角动量识别方面，提出并发现一系列有效识别方法，大大拓展了人们对LG模式光场的认识和利用，获得国际同行的广泛关注；在基于原子介质的光场操控方面，利用原子介质的良好相干性和易于光场调控性，提出了LG模式的克隆机制及Airy光束操控的方法，明确了Airy光束自愈合的机理与其空间相位无关，为构建新型自愈合光束提供了思路。项目相关研究成果在国内外重要物理期刊发表SCI文章30余篇，累计引用300多次，项目所取得的系列相关成果了加深人们对光场横向模式的理解，为其进一步的应用奠定了理论和实验基础。提名该项目为陕西省自然科学奖 二 等奖。**说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。** |

**三、项目简介**

|  |
| --- |
| （限2页）根据麦克斯韦电磁理论，光场可以通过波动方程的解严格描述。在波动方程的解中，高阶横向模式往往被忽略。L. Allen等人在 1992 年发现了高阶拉盖尔-高斯光（LG）携带有光子的轨道角动量（OAM），LG模函数是以横向角坐标为变量的轨道角动量算符的本征态，每个光子可以携带$lℏ$的OAM，*l*则可以取任意的整数。在宏观上，光子的OAM表现为光场的横向空间分布模式，其等相位面沿光束传播方向呈现螺旋变化，波前面上相位变化不连续具有奇异点，因而也被称为涡旋光场。近年来，带有螺旋位相结构的OAM光场吸引了众多研究者的关注，成为了光学领域的热点前沿领域。我们基于空间结构光场的调控技术，开展了场横向模式的产生机理与传输特性研究，取得了重要的进展，主要学术贡献包括：1. 实验验证了涡旋光场在湍流环境下传输特性与识别方法

由于激光的波束宽度较窄且方向性较好，这使得自由空间光通信技术具有较强的机密性和抗干扰能力，并且FSO通信系统的应用场景十分广泛，包括短距离的宽带服务，基站与终端间的通信，全息成像和星地卫星通信等，因此引起了大量研究者对 FSO 通信系统的兴趣。随着信息技术的不断发展，信息量呈指数型增长，因此有学者提出将涡旋光束应用于通信技术能满足 5G、6G、物联网、全息影像等新兴技术对通信网络的高要求。涡旋光束由于携带有轨道角动量，具有不同拓扑荷的 OAM 模式彼此在空间上又是正交的，因此将信息调制成涡旋光束并携带不同的 OAM 模式可作为一种新的调制信息方式。理论上 OAM 具有无限个本征态，所以 OAM 这一种新的空间自由度可以承载无限多比特的信息。利用涡旋光束作为信息载体不仅能提高频谱的利用率，更是一种提升信息容量的新方向。然而当涡旋光束在随机介质中传输时会被湍流所干扰，进而产生湍流效应，包括波束抖动、光强闪烁，波束扩展和轨道角动量弥散等，这些都将降低通信系统的性能。因此，研究湍流环境中涡旋光束的传输特性是OAM在 FSO 通信系统中应用的重要任务之一。我们提出并在实验上实现了利用量子光学的Hanbury Brown and Twiss 效应，简单快速的测量部分相干光的交叉关联函数，从而准确获得OAM光所携带的信息[Applied Physics Letters 108, 051107 (2016)]。1. 提出多种横向模式和涡旋光场的检测方法

我们基于不同原理，提出了多种轨道角动量态测量和操控方法，实验上实现了从单一OAM态到OAM谱，再到光场横向模式的测量。以该研究方向为主要内容，2015年获得国家自然科学基金重点项目的支持（高维光子轨道角动量量子态的产生、测量与操控的研究，11534008）。我们提出了一种利用角向双缝干涉来测量OAM态的新方法，这种方法可以非常直观的获得OAM光的螺旋相位干涉图样，因此不仅可以实现OAM态的精确测量，还能给出OAM光清晰的横向螺旋相位结构图像[Optics Letters 40, 788 (2015)]。同时，通过简单引入一个固定相位，便可以实现对OAM正负号的区分。这一方法还可以推广到其他涡旋光场的测量，例如分数阶OAM光[Photonics Research 4, 187 (2016)]和Bessel光[Applied Optics 57, B39 (2018)]。尤其是对分数阶OAM光，之前没有方法能够准确测量出具体分数阶数值，采用我们的角向双缝干涉方法，可以非常有效地实现测量。对于光场的横向模式，Laguerre-Gauss解可以构成正交完备基。而Laguerre-Gauss光包含两个参量，一个是角向的OAM值，另外一个是径向参数p。因此，要实现对光场横向模式的分析，必须要同时能够测出OAM值和径向参数p。我们与美国罗彻斯特大学合作，利用光学分数傅立叶变换调控光场的Gouy相位，引入偏振透镜，实现了稳定、可扩展的Laguerre-Gauss光测量方法[Optics Express 26, 33057 (2018)]。该方法的出现，使得光场横向模式分析成为可能，并且可以拓展到单光子水平，在光学精密测量、多自由度成像、高维通信、高维量子信息等领域有着重要的应用潜力。1. 基于相干原子介质对结构光场传输特性研究

基于电磁感应透明（EIT）系统，研究了艾里光束的自愈合特性与波前相位的关系。振幅、相位、偏振、轨道角动量等参数是描述光场的主要物理量。我们前期的研究工作[Optics Letters 39, 2723 (2014)]表明，在EIT介质中，控制光携带的图像的强度信息可以克隆到探测光上，但是相位信息不会实现复制。我们将这一原理应用到Airy光实验中，选择艾里光束做泵浦光，探测光是平面波。经过EIT 图像克隆系统后，泵浦光的空间强度信息被复制到了探测光上，即得到了一束只具有艾里光束强度分布的赝艾里光。我们将该光束的主瓣挡住，研究经过一段距离的传输后主瓣的自愈合情况。发现该光束仍然能够自愈合，即艾里光束的自愈合特性与波前相位没有关系。这一结果可以帮助我们更加深刻地理解艾里光束的奇异特性。这一结果发表在[Optics Letters 40, 5066(2015)]上。基于四波混频系统，研究了艾里光束的频率变换。基于非简并四波混频过程，实现了艾里光束在不同频率之间的变换，这一方案可以克服空间光调制器损伤阈值低、波长范围窄的缺点，能够拓展结构光场的频率范围。这一结果为利用非线性过程进行光场调控提供了实验基础。这一结果发表在[Optics Letters 39, 4557(2014)]上。 |

**四、客观评价**

|  |
| --- |
| 【限2页。围绕科学发现点的原创性、公认度和科学价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价内容要有客观依据，主要包括国内外同行在重要学术刊物（专著）和重要国际学术会议等公开发表的学术性评价意见，国内外重要科技奖励等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。】1. 首次提出利用光学筛子实现涡旋光场对的产生

关于利用光学筛子结构精确制备拉盖尔高斯光场、艾里光场的论文[Optica 2,1028 (2015)]，被SCI引用18次，得到电子束调控、生物成像等领域著名学者的关注和评价。国际凝聚态物理学著名学者Jun Yuan教授在论文[PRL 119, 094802 (2017)]引用我们的结果（引文[26]）“***More recent methods make use of photon sieves [25–27] and Vogel spiral arrays [28,29] as diffractive elements for vortex beam generation.***”国际超材料与表面结构领域著名学者Chengwei Qiu教授在论文[Physiscal Review Applied 12, 064007 (2019)]中引用我们的结果（引文[32]）“***Over the past 20 years, a wide variety of techniques to produce vortex beam have been elucidated. Besides classic methods, based on spiral phase plates [30] or computer-generated holograms [31], the recent introduction alternative methods, namely, photon sieves [32,33] and Vogel spiral arrays [34,35], have paved the way towards the generation of OAM-carrying matter waves with electrons, atoms, or neutrons.***” 国际生物数字全息领域著名学者YongKeun Park在论文[Nat Commun 10, 1304 (2019)]中引用我们的结果（引文[25]）：“***The previous methods have tailored the sizes and distributions of the pinholes for generating static holograms[24,25] with given design principles.***”1. 提出多种横向模式和涡旋光场的检测方法

我们提出了一种利用角向双缝干涉来测量OAM态的新方法，这种方法可以非常直观的获得OAM光的螺旋相位干涉图样，因此**不仅可以实现OAM态的精确测量，还能给出OAM光清晰的横向螺旋相位结构图像**[***Optics Letters 40, 788 (2015)***]。同时，通过简单引入一个固定相位，便可以实现对OAM正负号的区分。审稿人对此给予了高度评价：*The authors present a* ***very nice and simple*** *way to determine …… I believe the method for measuring the sign of OAM presented in this paper is* ***interesting to the optical community****, as it* ***provides a new tool*** *for measurement of the OAM quantity which is of importance.* 华南师范大学信息光电子科技学院郭邦红研究员在其发表的论文中评价我们的方法为“***significant strategy for measuring the TC of a vortex beam***”。山东师范大学物理与电子科学学院院长蔡阳健教授在提及涡旋光场探测时，多次引用我们的工作。这一方法还可以推广到其他涡旋光场的测量，例如分数阶OAM光[***Photonics Research 4, 187 (2016)]***和Bessel光[***Applied Optics 57, B39 (2018)***]。尤其是对分数阶OAM光，之前没有方法能够准确测量出具体分数阶数值，采用我们的角向双缝干涉方法，可以非常有效地实现测量。1. 基于相干原子介质对结构光场传输特性研究

 深入研究了Airy光在介质中的自愈特性[Optics Letters 40, 5066(2015)]，**文章**引用24次，他引22次。**国内外同行在重要学术刊物上对本工作的给出了积极的评价。审稿人对本工作的评价**：“*In both cases, self-healing property of beams is observed. They also investigated the self-healing and propagation of these two cases in the EIT cloning scheme, the EIT narrowing and non-diffractive phenomena were observed.* ***The phenomena reported in this manuscript are original and interesting.***  研究了在原子介质中通过四波混频产生Airy光场[Optics Letters 39, 4557(2014)]。**文章被**引用15次，他引8次。**国内外同行在重要学术刊物上对本工作的均给出积极的评价。审稿人对我们的方法给出了很高的评价：**“*I find the results presented in this manuscript* ***novel and interesting for general optical community****.”“This is an* ***original and interesting work****, I can recommend its publication”*。 |

**五、代表性论文专著目录**

**（不超过8条，其中代表性论文不超过5篇，代表性专著不超过3部）**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 论文专著名称 | 刊名 | 作者 | 年卷页码（xx年xx卷xx页） | 发表时间 | 通讯作者 | 第一作者 | 国内作者 | 他引总次数 | 检索数据库 | 知识产权是否归国内所有 |
| 1 | Measuring mode indices of a partially coherent vortex beam with Hanbury Brown and Twiss type experiment | APPLIED PHYSICS LETTERS | Liu Ruifeng;Wang Feiran;Chen Dongxu;Wang Yunlong; Zhou Yu;Gao Hong;Zhang Pei;and Li Fuli. | 2016年108卷051107页 | 2016年2月 | 张沛 | 刘瑞丰 | 刘瑞丰；王斐然；陈东旭；王云龙；周 宇；高 宏；张 沛；李福利。 | 25 | SCI | 是 |
| 2 | Probing the topological charge of a vortex beam with dynamic angular double slits | OPTICSLETTERS | Fu Dongzhi;Chen Dongxu;Liu Ruifeng;Wang Yunlong; Gao Hong;Li Fuliand Zhang Pei. | 2015年40卷788-791页 | 2015年3月 | 张沛 | 付栋之 | 付栋之；陈栋旭；刘瑞丰；王云龙；高 宏；李福利；张 沛。 | 22 | SCI | 是 |
| 3 | Investigating the self-healing property of an optical Airy beam | OPTICSLETTERS | Zhang Liyun;Ye Fengjuan;Cao Mingtao;Wei Dong;Zhang Pei;Gao Hongand Li, Fuli. | 2015年40卷5066-5069页 | 2015年11月 | 卫栋，高宏 | 张丽昀 | 张丽昀；叶凤娟；曹明涛；卫 栋；张 沛；高 宏；李福利。 | 22 | SCI | 是 |
| 4 | Probing the fractional topological charge of a vortex light beam by using dynamic angular double slits | PHOTONICS RESEARCH | Zhu Jing;Zhang Pei;Fu Dongzhi;Chen Dongxu;Liu Ruifeng;Zhou Yingnan;Gao Hongand Li, Fuli. | 2016年4卷187-190页 | 2016年10月 | 张沛 | 朱静 | 朱 静；张 沛；付栋之；陈东旭；刘瑞丰；周英男；高 宏；李福利。 | 21 | SCI | 是 |
| 5 | Generation of Airy beams by four-wave mixing in Rubidium vapor cell | OPTICSLETTERS | Wei Dong;Yu Ya;Cao Mingtao;Zhang Liyun;Ye Fengjuan;Guo Wenge;Zhang Shougang;Gao Hongand Li Fuli. | 2014年39卷4557-4560页 | 2014年8月 | 卫栋 | 卫栋 | 卫 栋；余 娅；张丽昀；叶凤娟；郭文阁；张首刚；高 宏；李福利。 | 10 | SCI | 是 |
| 合 计 | 100 | SCI | 是 |

**六、主要完成人情况表**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 高宏 | 排 名 | 1 |
| 行政职务 | 学院院长 |
| 技术职称 | 教授 |
| 工作单位 | 西安交通大学物理学院 |
| 完成单位 | 西安交通大学 |
| 对本项目主要学术贡献：指导了本项目所有研究的开展，与卫栋副教授共同开展了Airy光在原子介质中的传输特性研究：1、提出了Airy光束自愈合的机理与其空间相位无关的思想，并基于原子介质的相干克隆机制进行了实验验证。【代表作3】2、提出了基于原子介质通过四波混频产生Airy光束的方法，并验证了Airy光束在原子介质中的传输性质。【代表作5】 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 张 沛 | 排 名 | 2 |
| 行政职务 | 学院副书记，国家级实验教学示范中心主任 |
| 技术职称 | 教授 |
| 工作单位 | 西安交通大学物理学院 |
| 完成单位 | 西安交通大学 |
| 对本项目主要学术贡献：提出了一种利用角向双缝干涉来测量OAM态的新方法，通过观察干涉图样，可以获得OAM阶数的信息【代表作2】。简单引入一个固定相位，便可以实现对OAM正负号的区分。这种方法还可以推广到任意沿角向相位变化的光场，如贝塞尔光和分数阶OAM光【代表作4】。我们的方法可以非常直观的获得OAM光的螺旋相位干涉图样，因此不仅可以实现OAM态的精确测量，还能给出OAM光清晰的横向螺旋相位结构图像，为涡旋光的检测和识别提供了一种简单且直观的途径。 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 刘瑞丰 | 排 名 | 3 |
| 行政职务 | 无 |
| 技术职称 | 副教授 |
| 工作单位 | 西安交通大学物理学院 |
| 完成单位 | 西安交通大学 |
| 对本项目主要学术贡献： 提出并在实验上实现了利用量子光学的Hanbury Brown and Twiss效应，简单快速的测量部分相干光的交叉关联函数，从而准确获得OAM光所携带的信息【代表作1】；通过新型的旋转角双缝干涉法对光场OAM态进行了精确测量【代表作2】。该类方法对光场OAM态的识别对特殊结构光场的产生、操控与识别技术的发展起到推动作用。  |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 卫栋 | 排 名 | 4 |
| 行政职务 | 无 |
| 技术职称 | 副教授 |
| 工作单位 | 西安交通大学物理学院 |
| 完成单位 | 西安交通大学 |
| 对本项目主要学术贡献：与高宏教授共同开展了Airy光在原子介质中的传输特性研究：1、提出了Airy光束自愈合的机理与其空间相位无关的思想，并基于原子介质的相干克隆机制进行了实验验证。【代表作3】2、提出了基于原子介质通过四波混频产生Airy光束的方法，并验证了Airy光束在原子介质中的传输性质。【代表作5】 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 王云龙 | 排 名 | 5 |
| 行政职务 | 无 |
| 技术职称 | 助理教授 |
| 工作单位 | 西安交通大学物理学院 |
| 完成单位 | 西安交通大学 |
| 对本项目主要学术贡献：在张沛教授的指导与刘瑞丰副教授的合作下，共同开展了关于OAM态的测量研究：1、提出了利用关联函数实现热光OAM态的新方法，并参与了其中的实验研究。【代表作1】2、参与了利用角向双缝干涉来测量OAM态的新方法研究。【代表作2】 |

**七、主要完成单位情况表**

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 | 西安交通大学 |
| 对本项目主要学术贡献： 西安交通大学是本项目的唯一完成单位，为本项目的完成提供了场地、水电、仪器设备等硬件条件。同时学校在软件方面也为项目提供了重要支持，图书馆的书籍和电子数据库是进行科学研究的重要资源，特别是在文献检索方面为项目的开展提供了非常好的条件；学校的科研管理部门、财务部门为项目的日常管理和服务提供了重要帮助。 |

**完成人合作关系说明**

**所有完成人均属于西安交通大学物理学院教工，隶属于陕西省量子信息和光电量子器件重点实验室。完成人长期合作，共同承担多项国家级课题，合作发表多篇论文。**

**完成人合作关系情况汇总表**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 合作方式 | 合作者/项目排名 | 合作时间 | 合作成果 | 证明材料 |
| 1 | 论文合著 | 高 宏（1），张 沛（2），刘瑞丰（3），王云龙（5）。 | 2016 | Measuring mode indices of a partially coherent vortex beam with Hanbury Brown and Twiss type experiment | 代表性论文1 |
| 2 | 论文合著 | 高 宏（1），张 沛（2），刘瑞丰（3），王云龙（5）。 | 2015 | Probing the topological charge of a vortex beam with dynamic angular double slits | 代表性论文2 |
| 3 | 论文合著 | 高 宏（1），张 沛（2），卫 栋（4）。 | 2015 | Investigating the self-healing property of an optical Airy beam | 代表性论文3 |
| 4 | 论文合著 | 高 宏（1），张 沛（2），刘瑞丰（3）。 | 2016 | Probing the fractional topological charge of a vortex light beam by using dynamic angular double slits | 代表性论文4 |
| 5 | 论文合著 | 高 宏（1），卫 栋（4）。 | 2014 | Generation of Airy beams by four-wave mixing in Rubidium vapor cell | 代表性论文5 |
| （不限条目） |  |  |  |  |  |