部分相干光束位相调控及应用基础研究进展

陈亚红, 刘琳, 蔡阳健*

苏州大学物理与光电·能源学部, 苏州纳米科技协同创新中心, 苏州 215006

* 联系人, E-mail: yangjiancai@suda.edu.cn

2015-11-20 收稿, 2015-12-23 修回, 2015-12-27 接受, 2016-03-25 网络版发表

国家杰出青年科学基金(11525418)和国家自然科学基金(11404234, 11274005)资助

摘要 近年来, 部分相干光束由于其独特的光学特性和丰富的物理内涵而受到广泛关注. 部分相干光束在许多应用领域具有独特的优势, 不同的应用对其光束特性具有不同的需求, 因此需要对部分相干光束进行调控. 本文介绍部分相干光束位相调控及应用基础研究进展, 着重阐述携带涡旋位相以及扭曲位相部分相干光束理论模型、实验产生、光学特性以及相关应用基础. 研究表明位相调控对部分相干光束传输特性起到重要调制作用, 在光束整形、微粒俘获、大气激光通信、光学成像以及非线性光学等领域具有重要的应用前景.

关键词 部分相干光束, 位相调控, 涡旋位相, 扭曲位相, 应用基础

自第一台激光器诞生以来, 激光作为一种全新的光源, 在科研、工业、农业、军事、日常生活中都得到了广泛的应用, 对经济发展和社会进步起到了重要的推动作用. 随着应用领域的不断拓展, 人们对激光光束的性能和需求也日益多样化, 因此研究如何调控光束特性显得尤为重要. 一般认为光束可调参量包括光强、频率/波长、偏振态、位相等. 过去几十年里, 研究人员对光束光强、频率/波长、偏振态、位相调控开展了大量研究, 衍生出了许多新兴学科, 如微纳光学、信息光学、变换光学、二元光学等.

光束本身还有一个重要的可调参量, 即相干性^[1,2]. 光束相干性包括两方面, 一是时间相干性, 二是空间相干性. 时间相干性与光束单色性密切相关, 而空间相干性则与光束方向性密切相关. 本文主要讨论光束的空间相干性. 人们通常认为随着空间相干性的降低, 光束容易发散, 能量不容易集中, 不利于实际应用, 因此相干性调控常常被忽视. 事物总是有它的两面性, 从二十世纪七八十年代开始, 文献[3~12]对光束相干性做了大量研究, 逐渐形成和发

展了相干光学这门学科, 大量研究发现适当降低光束相干性时, 光束会表现出一些奇特的光学性质, 同时能较好的保持光束准直性, 因此在很多应用领域表现出优越性. 如在激光核聚变中, 低相干性光束能够有效克服散斑效应^[13]; 在大气激光通信中, 降低光束相干性可以提高通信的信噪比以及降低比特误差率等^[14,15]; 利用低相干性光源可以实现“鬼”成像和“鬼”干涉等^[16~18]. 此外, 光束相干性调控在光束整形、微粒俘获、非线性光学、相干衍射成像、原子冷却等应用领域都具有独特的优越性^[19~25]. 以上提到的低相干性光束通常被称为部分相干光束.

部分相干光束理论最早是由Wolf等人建立起来, 经过大约半个世纪的发展, 逐渐形成了一套比较完整的体系. 光束调控是贯穿部分相干光束发展的一条主线, 通常认为部分相干光束可调参量包括光强、偏振、位相、相干性等. 最近研究发现部分相干光束具有一个特有的可调参量即空间关联结构^[26~34]. 传统部分相干光束的空间关联结构函数满足高斯-谢尔模关联分布, 最近研究表明空间关联结构不满足高

引用格式: 陈亚红, 刘琳, 蔡阳健. 部分相干光束位相调控及应用基础研究进展. 科学通报, 2016, 61: 1952~1962

Chen Y H, Liu L, Cai Y J. Research progress in phase modulation of partially coherent beam and its fundamental applications (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1952~1962, doi: 10.1360/N972015-01300

斯-谢尔模关联分布的新型部分相干光束具有奇特的传输特性,例如:自聚焦特性、自分裂特性、自整形特性等.空间关联结构调控为光束调控提供了新思路,在文献[26]中详细介绍了部分相干光束空间关联结构调控研究进展.

光强调控能够产生具有特定光强分布的部分相干光束,例如部分相干空心光束、部分相干平顶光束以及部分相干阵列光束等,这些光束在材料热处理、微粒俘获、大气激光通信等领域具有重要的应用价值^[35-38],在文献[35]中对部分相干光束光强调控做了详细介绍.自从Wolf等人^[39,40]建立相干-偏振统一理论以来,部分相干光束偏振调控研究引起人们广泛关注^[41-48],在文献[48]中详细介绍了部分相干光束偏振调控研究进展.

位相是光束的一个重要参量,对于完全相干光束来说,位相通过光束传输过程中的波前来表示,按照不同的波面,光束大致可以分为3种:平面波、球面波以及具有特殊位相的波.平面波和球面波分别是指其波前为平面和球面的光束.而具有特殊位相的波中研究最广泛的莫过于涡旋波,也被称为涡旋光束^[49,50],这种光束的波前呈螺旋形分布.涡旋光束的中心光强大小为0,该点处的位相不确定,因此该点被称为位相奇点.涡旋光束携带轨道角动量,因此在光学成像、微粒操控、量子信息传递、激光通信等领域具有重要的应用^[51-53].而部分相干光束的位相与完全相干光束的位相的概念并不完全相同,对于完全相干光束来说,它在某一点的位相都是确定的,但是对于部分相干光束而言,它在某一点处的位相是随机的,因此部分相干光束的位相其实是统计平均位相.部分相干光束的统计特性可以通过互相干函数来表征,具体可以表示为^[40]

$$\Gamma(\rho_1, \rho_2) = \sqrt{I(\rho_1)I(\rho_2)}g(\rho_1 - \rho_2)f_\phi(\rho_1, \rho_2), \quad (1)$$

其中, $I(\rho)$ 表示 ρ 点处的光强分布, $g(\rho_1 - \rho_2)$ 表示 ρ_1 和 ρ_2 两点之间空间关联结构函数, $f_\phi(\rho_1, \rho_2)$ 为部分相干光束的位相分布,它是 ρ_1 和 ρ_2 两点之间位相的统计平均.部分相干光束可以携带3种不同的位相,即普通位相、涡旋位相以及扭曲位相.比如,各向同性的高斯-谢尔模光束携带普通位相^[54],此时 $f_\phi(\rho_1, \rho_2) = \exp[-ik(\rho_1^2 - \rho_2^2)/(2R_0)]$,其中 R_0 表示各向同性高斯-谢尔模光束波前曲率半径.对于携带涡旋位相的部分相干光束而言,它的位相函数表示为

$$f_\phi(\rho_1, \rho_2) = \exp[i l(\theta_1 - \theta_2)],$$

其中, $\theta = \arctan(\rho_y/\rho_x)$, l 为涡旋位相的拓扑荷数^[55-76].虽然携带涡旋位相部分相干光束和完全相干涡旋光束类似也携带了轨道角动量,但这两种光束的传输特性却完全不同,而且实验产生以及测量方法也有很大不同,本文第二节将介绍携带涡旋位相部分相干光束研究进展.部分相干光束第3种位相是扭曲位相,它的位相函数表示为

$$f_\phi(\rho_1, \rho_2) = \exp[-ik\mu\rho_{1x}\rho_{2y} + ik\mu\rho_{2x}\rho_{1y}],$$

其中, μ 表示扭曲位相因子^[77-105].与涡旋位相不同,扭曲位相并不存在于完全相干光束,是部分相干光束所特有的一种位相.扭曲位相最早是由Simon和Mukunda^[77]提出,它与普通位相存在着本质性的差别:它不能分解为两个独立的一维坐标参量的乘积,它的大小受到正定性条件的限制,其内在的不对称性使得光束光斑在传播过程中产生旋转,并且使光束具有轨道角动量.本文将从携带涡旋位相以及扭曲位相部分相干光束入手,介绍部分相干光束位相调控及应用基础研究进展.

1 携带涡旋位相部分相干光束研究进展

携带涡旋位相部分相干光束最早是由Gori等人^[55]提出,之后Ponomarenko^[56]对它的传输特性做了详细的研究,并分析了该光束在自由空间中 M^2 因子的演化特性. Bogatyryova和Maleev等人^[57,58]发现携带涡旋位相部分相干光束在传输过程中能够产生相干奇点,随着这一新物理效应的发现,涌现了大量关于相干奇点的产生、传输以及演化的研究^[58-67].携带涡旋位相部分相干光束成为近年来的研究热点^[68-76].下面重点介绍携带涡旋位相部分相干光束理论模型、实验产生、相干奇点以及拓扑荷数测量.

1.1 携带涡旋位相部分相干光束理论模型

完全相干涡旋光束可以用电场表征如下:

$$E(\rho, \theta) = A(\rho)\exp[i(l\theta + \beta)], \quad (2)$$

其中, $A(\rho)$ 表示光束电场振幅, $\exp(i l \theta)$ 为涡旋位相, β 为任意的初始位相.对于部分相干光束而言, β 取值随机变化,因此研究部分相干光束需要研究它的统计特性.在空间-时间域中,部分相干光束的统计特性可以通过互相干函数来表征^[1,2,40],即

$$\Gamma(\rho_1, \rho_2) = \langle E(\rho_1) E^*(\rho_2) \rangle, \quad (3)$$

其中, 尖括号表示系综平均, *表示复共轭. 将公式(2)代入到公式(3)可得

$$\Gamma(\rho_1, \rho_2) = A(\rho_1) A(\rho_2) g(\rho_1 - \rho_2) \exp[i l(\theta_1 - \theta_2)], \quad (4)$$

公式(4)即为携带涡旋位相部分相干光束的理论模型, 其中, $g(\rho_1 - \rho_2)$ 为 ρ_1 和 ρ_2 两点之间空间关联结构函数. 对于最常见的Carter-Wolf光源^[40], 它的空间关联结构函数满足高斯-谢尔模关联分布, 即

$$g(\rho_1 - \rho_2) = \exp\left[-(\rho_1 - \rho_2)^2 / (2\sigma_g^2)\right],$$

这种光束也被称为高斯-谢尔模涡旋光束. 最近研究发现部分相干光束的空间关联结构函数不仅局限于高斯-谢尔模关联分布, 事实上可以通过一定的手段对部分相干光束的空间关联函数进行调控, 产生具有特殊空间关联函数的部分相干光束. 在文献[26]中对具有特殊空间关联结构函数部分相干光束的产生、传输及其应用做了详细的介绍. 部分相干光束的传输特性与空间关联结构函数以及位相密切相关, 因此对具有特殊空间关联结构并且携带涡旋位相部分相干光束的研究也显得尤为重要. 最近, 我们在理论和实验上对具有拉盖尔高斯-谢尔模关联结构的部分相干涡旋光束进行了研究^[76], 研究发现在涡旋位相以及空间关联结构函数的共同作用下, 部分相干光束在传输过程中表现出一些新奇特性, 在微粒俘获中具有重要的应用前景.

1.2 携带涡旋位相部分相干光束实验产生

实验产生携带涡旋位相部分相干光束的方法主要分为两种: 一种是直接在产生的部分相干光源后

放置螺旋位相片^[60,75], 第二种是通过空间光调制器加载随机位相片^[70]. 两种方法各有利弊, 前者方法直接有效, 但是只能产生携带低拓扑荷数涡旋位相的部分相干光束, 后者能够产生携带高拓扑荷数涡旋位相的部分相干光束, 但是能量损耗大.

图1(a)为产生高斯-谢尔模涡旋光束的实验装置图, 图中螺旋位相片之前的部分为产生高斯-谢尔模光源的实验装置, 经过螺旋位相片之后, 高斯-谢尔模光束被调制成高斯-谢尔模涡旋光束, 图中的后半部分为测量高斯-谢尔模涡旋光束的实验装置(具体产生和测量细节见文献[75]). 图1(b)所示为实验测量的不同初始相干长度的高斯-谢尔模涡旋光束在焦点处的光强分布, 随着初始相干长度的降低, 光强分布逐渐由空心变为实心分布. 此外, 在相干性固定的情况下, 通过调制高斯-谢尔模涡旋光束的拓扑荷数, 同样可以实现空心光斑到实心光斑的动态调控. 因此, 通过调控携带涡旋位相部分相干光束的相干性和拓扑荷数可以实现光束整形, 在微粒俘获、激光材料加工等领域具有重要的应用前景.

实验产生具有特殊空间关联结构部分相干涡旋光束的实验装置与上述产生高斯-谢尔模涡旋光束的方法类似, 即在具有特殊关联结构部分相干光源后面放置一片螺旋相位片, 但是所产生的具有特殊空间关联结构部分相干涡旋光束的传输特性与高斯-谢尔模涡旋光束有很大的不同, 这是因为光束的传输特性不仅与光束的涡旋相位有关, 而且与光束的空间关联结构函数密切相关. 其中具有拉盖尔高斯-谢尔模关联部分相干涡旋光束的实验产生及其传输特性可以参见文献[76].

图1 (网络版彩色)高斯-谢尔模涡旋光束的实验产生装置及实验结果. (a) 实验装置图; (b) 焦点处光强分布

Figure 1 (Color online) Experimental setup for generating a Gaussian Schell-model vortex beam and experimental results. (a) Experimental setup; (b) intensity distribution in the focal plane

1.3 携带涡旋位相部分相干光束引起的物理效应：相干奇点

对于完全相干涡旋光束，它在传输过程中光强分布始终保持空心分布，光斑中心点的光强为0，该点处位相不确定，因此也被称为位相奇点^[49,50]。而对于携带涡旋位相部分相干光束，随着相干性的降低，其中心光强不再为0，因此位相奇点也不再存在。既然携带涡旋位相部分相干光束不再像完全相干涡旋光束那样带来位相奇点，那么它是否可以激发出新的物理效应？答案是肯定的，2003年Bogatyrkova等人^[57]研究表明部分相干光束携带的涡旋位相可以激发关联函数的位相奇点，如图2所示为由LG₀₁和LG₁₁模组成的部分相干光束关联函数的振幅以及位相分布，从图中我们发现关联函数振幅为0的地方，位相发生了突变，发生突变的点也被称为相干奇点。之后Van Dijk和Visser^[67]对携带涡旋位相部分相干光束的相干奇点进行了详细研究，并证揭示了完全相干光束的位相奇点与部分相干光束的相干奇点相互之间的转化关系。

2004年Palacios等人^[60]实验证实了携带涡旋位相部分相干光束中存在相干奇点。图3为携带涡旋位相部分相干光束在远场处不同相干性对应的光强分布、关联函数振幅和位相分布，正如前文所提，随着相干性的降低，部分相干拉盖尔高斯光束在远场处的光强分布逐渐从空心分布变成了实心分布，位相奇点不再存在。而对于光束的关联函数来说，它的振幅为0的地方位相发生了突变，也就是相干奇点。随着相干性的降低，相干奇点越容易分辨。

此后，日本电气通信大学的Wang等人^[62-64]研究了携带涡旋位相部分相干光束相干奇点的局域性、

图2 LG₀₁和LG₁₁模组成的部分相干光束关联函数的振幅以及位相分布

Figure 2 Amplitude and phase distributions of the correlation function of a partially coherent beam composed of LG₀₁ and LG₁₁ modes

图3 (网络版彩色)携带涡旋位相部分相干光束在远场处的光强分布以及关联函数振幅、位相分布

Figure 3 (Color online) Far-field intensity distribution and corresponding amplitude and phase distributions of the correlation function of a partially coherent beam with a vortex phase

相干流及其守恒定律，随着相干奇点研究的深入发展，将它用于实际应用中也是指日可待。

1.4 携带涡旋位相部分相干光束拓扑荷数的测量

涡旋位相的拓扑荷数决定了光束轨道角动量的大小，同时在调控光束传输特性中起到了至关重要的作用，如何测量部分相干光束的拓扑荷数成了关键重要的问题。测量完全相干涡旋光束拓扑荷数的方法和技术已经相当成熟，主要可以分为两种：一种通过测量完全相干涡旋光束的干涉条纹来确定拓扑荷数的大小；另一种是通过涡旋光束衍射后光强分布的傅里叶变换来确定拓扑荷数的大小。这两种方法是否能够继续用于测量部分相干光束的拓扑荷数呢？答案是否定的，因为随着相干性的降低干涉条纹逐渐消失，因此用干涉的方法是无法确定部分相干光束的拓扑荷数。光强分布傅里叶变换方法也是行不通的，因为随着相干性的降低，光强分布逐渐由空心变为实心，光强分布傅里叶变换的条纹也就逐渐消失，无法确定部分相干光束的拓扑荷数。2012年，我们课题组以及Dholakia分别在理论上提出通过测量焦点处相干度分布的方法确定部分相干光束拓扑荷数的大小^[70,71]，随后Escalante等人^[72]在实验上证实了该理论，图4为不同拓扑荷数部分相干光束相干度的理论与实验分布图，从相干度分布位错环的数量中可以确定拓扑荷数的大小。

对携带涡旋位相部分相干光束的研究还包括它

图4 不同拓扑荷数部分相干光束相干度的理论与实验分布图
Figure 4 Theoretical and experimental results of the degree of coherence of a partially coherent beam with different topological changes

在各种线性与非线性介质中的传输特性^[59,60]、它与物质相互作用引起的物理效应等,这里就不再一一罗列。

2 携带扭曲位相部分相干光束研究进展

扭曲位相是部分相干光束所特有的一种位相,它不存在于完全相干光束中。1993年,Simon和Mukunda等人^[77]首次引入了扭曲位相的概念,Friberg等人^[78]在1994年首次报道了采用声光相干控制技术结合多柱面镜系统产生携带扭曲位相部分相干光束的实验。扭曲位相的迷人之处是它与普通的二次位相因子存在本质的差别,它不能分解为两个独立的一维坐标参量的乘积,并受到正定条件的限制,由于其内在的不对称性使得光斑在传输过程中产生旋转^[78,95]。表征扭曲位相最重要的参数是扭曲位相因子,扭曲位相因子的大小会影响到部分相干光束传输过程中的光强分布、相干度分布、偏振度分布等^[90-97],因此扭曲位相作为部分相干光束一个重要的可调参量,对它的研究具有重要意义。与携带涡旋位相部分相干光束相似,携带扭曲位相的部分相干光束也携带轨道角动量,通过调控部分相干光束的扭曲位相可以改变光束自身携带的轨道角动量^[98-100]。20多年来,携带扭曲位相部分相干光束理论研究快速发展,大量研究表明它在大气激光通信、非线性光学、光学成像、微粒俘获等领域具有重要的应用前景^[20,101-105]。本节主要从携带扭曲位相部分相干光束的理论模型、实验产生以及传输特性几方面介绍相关研究进展。

2.1 携带扭曲位相的部分相干光束理论模型

在构建携带扭曲位相部分相干光束理论模型和处理其传输时,一般采用以下3种方法:一是维格纳分布函数方法^[84-86],二是模式分解方法^[87-89],三是张量方法^[90-91]。Simon等人^[84-86]首先采用维格纳分布函数处理携带扭曲位相部分相干光束的传输和变换,但是维格纳分布函数是一种间接的等效方法,运用起来十分繁琐,而且不能有效地处理携带扭曲位相部分相干光束经过色散介质、非线性介质等复杂光学系统和介质的传输问题。之后Gori等人^[87-89]提出了一套模式分解方法处理携带扭曲位相部分相干光束,这种方法的核心是将部分相干光束分解成一系列连续的非相干高斯光束或者部分相干贝塞尔高斯光束叠加而成,通过模式分解方法处理携带扭曲位相部分相干光束虽然大大简化了计算的复杂性,但是却牺牲了计算的精度。2002年,Lin和Cai^[90]引入张量方法处理携带扭曲位相部分相干光束的传输和变换,由于该方法能够直接在空间域中处理光束传输,因此张量方法能够非常方便地处理携带扭曲位相部分相干光束经过各类复杂光学系统和介质的传输^[90-97,99-103]。

携带扭曲位相部分相干光束互相干函数用张量形式可以表示为^[90]

$$\Gamma(\rho_1, \rho_2) = \exp(-\tilde{\rho}^T \tilde{M}_0^{-1} \tilde{\rho}), \quad (5)$$

其中, $\tilde{\rho}^T = (\rho_1^T, \rho_2^T) = (\rho_{1x}, \rho_{1y}, \rho_{2x}, \rho_{2y})$, $\tilde{M}_0^{-1}$ 为4×4的矩阵,具体表示为

$$\tilde{M}_0^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\sigma_0^2} + \frac{1}{\delta_0^2} \right) \mathbf{I} & -\frac{1}{2\delta_0^2} \mathbf{I} + \frac{ik}{2} \gamma \mathbf{J} \\ -\frac{1}{2\delta_0^2} \mathbf{I} + \frac{ik}{2} \gamma \mathbf{J}^T & \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\sigma_0^2} + \frac{1}{\delta_0^2} \right) \mathbf{I} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$\mathbf{I}$ 为2×2单位矩阵, $\mathbf{J} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ 。利用张量方法处理

携带扭曲位相部分相干光束经过复杂光学系统、线性以及非线性介质传输与变换详见文献^[90-97,99-103]。

2.2 携带扭曲位相部分相干光束实验产生

从扭曲位相被首次提出至今的20多年时间里,对携带扭曲位相部分相干光束的研究绝大多数都是理论研究,实验研究非常少,这是由于扭曲位相内在的不对称性使得实验光路十分复杂,极难成功产

生^[78]。1994年, Friberg等人提出了一种产生携带扭曲位相部分相干光束的思路, 他们通过一系列柱面镜的排列组合, 将各向异性的高斯-谢尔模光束转换成携带扭曲位相的部分相干光束, 图5是他们的实验装置图, 图中用到的6个柱面镜的排列需要严格控制它们的摆放位置和角度, 稍有偏差输出面的光束就会与理想光束千差万别。在实验中他们通过声光调制技术产生了实验中需要用到的各向异性的高斯-谢尔模光束。这种产生携带扭曲位相部分相干光束的实验装置复杂繁琐, 可重复性极低, 据我们所知, 这是携带扭曲位相部分相干光束的实验产生的唯一报道。所以对携带扭曲位相部分相干光束的实验研究还有很大的发展空间, 还需广大研究者不断探索和挖掘。

2.3 携带扭曲位相部分相干光束传输特性

由于扭曲位相本身的不对称性导致携带扭曲位相部分相干光束在自由空间中的传输过程中光斑会发生旋转^[78], 图6为携带扭曲位相各向异性部分相干光束在光源以及远场处的光强分布图, 光斑发生了很明显的旋转。此外在自由空间中扭曲位相的大小还会引起相干度分布、偏振度分布的变化, 扭曲位相调控为部分相干光束调控提供了新的思路。蔡阳健等人研究了扭曲位相对宽光谱部分相干光束光谱特性的影响^[92,93], 研究结果表明控制扭曲位相的大小, 可以调控宽光谱部分相干光束传输过程中的光谱频移现象。

张量方法可以方便地用来处理携带扭曲位相部分相干光束在湍流大气中的传输问题, 研究表明携带扭曲位相的部分相干光束在克服湍流的负面影响上比传统的高斯-谢尔模光束更加有效, 即携带扭曲位相部分相干光束具有更小的光强闪烁^[101]。此外,

图5 实验产生携带扭曲位相部分相干光束的实验装置图

Figure 5 Experimental setup for generating a partially coherent beam with a twist phase

图6 携带扭曲位相部分相干光束在光源处(a)以及远场处的光强分布(b)
Figure 6 Intensity distribution of a partially coherent beam with a twist phase in the source plane (a) and in the focal plane (b)

张量方法还被用来处理携带扭曲位相部分相干光束经过色散介质、带光阑光学系统、单轴晶体、非线性介质中的传输^[94,96,97,103]。此外, 在文献[98~100]中, 携带扭曲位相部分相干光束的轨道角动量得到了充分的研究。研究表明扭曲位相在大气激光通信、二次谐波产生、微粒俘获、光学成像等领域具有重要应用前景^[20,100~104]。

3 部分相干光束位相调控应用基础

前面介绍部分相干光束位相调制能够引起一些新奇的物理效应, 如相干奇点等, 这些新的物理效应或者奇特的传输特性在某些应用领域具有重要应用前景。本节将简单介绍部分相干光束位相调控相关应用基础。

3.1 光束整形

调控部分相干光束相干性、关联函数、偏振度等可以实现光束整形^[26,48], 近年来的研究表明位相调控同样可以实现部分相干光束整形^[75,76,95,96], 即通过调控涡旋位相拓扑数实现空心光斑、平顶光斑和高斯光斑的动态转换或者调控扭曲位相因子产生像散光斑。光束整形被广泛应用在激光加工、激光武器、微纳操控、非线性光学等领域, 因此部分相干光束位相调控在这些领域也具有重要应用前景。

3.2 微粒俘获

我们知道空心光斑和实心光斑分别可以俘获折射率比环境折射率大和比环境折射率小的微粒^[106], 部分相干光束位相调控可以实现光束整形, 得到空心光强分布、平顶光强分布、高斯光强分布的光斑等, 因此部分相干光束位相调控可以方便地实现大折射

率和小折射率微粒的俘获,携带扭曲位相部分相干光束以及携带涡旋位相部分相干光束微粒俘获研究详见文献[20,21].

3.3 大气激光通信

大气激光通信技术由于其单色性好、方向性强、光功率集中、难以窃听、成本低、安装快等特点,一直受到各国的高度重视.光束在大气中传输时受到大气中微小粒子、气溶胶、温度梯度引起折射率随机变化等因素影响,传输过程中出现强度、相位在时间和空间上呈现随机起伏、波前扭曲变形、光强闪烁、光束弯曲和漂移等现象,因此减小或者克服大气带来光束传输的负面影响在大气激光通信中具有重要的应用价值.近年来的研究表明具有特殊光强、相位、偏振态分布的光束以及部分相干光束能够有效地克服或者减小大气湍流带来的负面影响^[14,15,107].最近研究表明部分相干光束位相调控在克服湍流影响方面具有独特的优势.2012年Wang等人^[101]研究发现调控部分相干光束扭曲位相能够有效降低湍流引起的光强闪烁等负面效应,2013年Liu等人^[74]在实验上发现携带涡旋位相部分相干光束在降低大气湍流引起的光强闪烁方面比传统的高斯-谢尔模光束更具优势.因此部分相干光束位相调控在大气激光通信中具有重要的应用前景.在文献[107]中详细介绍了部分相干光束大气湍流传输研究进展.

3.4 光学成像

在经典光学成像中,非相干或者部分相干光束照明所获得的成像质量和分辨率比完全相干光束照明所获得的成像质量和分辨率要好,但是受到经典瑞利极限的限制.近年来研究表明调控部分相干光

束位相能够突破衍射极限,2006年Tamburini等人^[108]在实验上证实携带涡旋位相部分相干光束照明能够突破经典瑞利极限,2012年Tong和Korotkova^[105]发现携带扭曲位相部分相干光束照明同样能够突破瑞利极限,因此部分相干光束位相调控在光学成像中具有重要应用价值.此外,Cai等人^[104]还将携带扭曲位相部分相干光束应用于“鬼”成像,发现通过调控扭曲位相可以实现成像质量以及可见度的调控.部分相干光束位相调控在光学成像中的应用有待进一步的挖掘和突破,尤其是在实验方面.

3.5 非线性光学中的应用

部分相干光束位相调控在非线性光学中也有重要的应用.部分相干光束位相调控为光束和物质相互作用带来了一些新的物理效应.如携带涡旋位相部分相干光束在经过非线性自聚焦介质传输时,能够使得光学涡旋稳定传输^[59];部分相干光束与非线性介质相互作用产生二次谐波过程中,通过调控相干性和扭曲位相可以调控二次谐波转化效率和谐波场特性^[103,109].

4 总结与展望

本文介绍了部分相干光束位相调控及应用基础研究进展,着重阐述了携带涡旋位相以及扭曲位相部分相干光束的理论模型、实验产生、传输特性以及相关物理效应等.部分相干光束位相调制对光束传输特性起到了重要调制作用,在光束整形、微粒俘获、大气激光通信、光学成像以及非线性光学等领域具有重要的应用前景.随着部分相干光束位相调控理论和实验研究的不断深入,相信部分相干光束位相调控应用在各个领域指日可待.

参考文献

- 1 Born M, Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- 2 Mandel L, Wolf E. Optical Coherence and Quantum Optics. Cambridge: Cambridge University Press, 1995
- 3 Carter W, Wolf E. Coherence and radiometry with quasi homogeneous planar sources. J Opt Soc Am, 1977, 67: 785-796
- 4 Collett E, Wolf E. Is complete spatial coherence necessary for the generation of highly directional light beams? Opt Lett, 1978, 2: 27-29
- 5 Wolf E. New theory of partial coherence in the space-frequency domain. Part I: spectra and cross spectra of steady-state sources. J Opt Soc Am, 1982, 72: 343-351
- 6 Wolf E. New theory of partial coherence in the space-frequency domain. Part II: Steady-state fields and higher-order correlations. J Opt Soc Am A, 1986, 3: 76-85

- 7 Wolf E. Invariance of the spectrum of light on propagation. *Phys Rev Lett*, 1986, 56: 1370
- 8 Gori F. Collett-Wolf sources and multimode lasers. *Opt Commun*, 1980, 34: 301–305
- 9 Gori F, Guattari G, Padovani C. Modal expansion for J_0 -correlated Schell-model sources. *Opt Commun*, 1987, 64: 311–316
- 10 Gori F. Mode propagation of the field generated by Collett-Wolf Schell-model sources. *Opt Commun*, 1983, 46: 149–154
- 11 Gori F, Guattari G, Palma C, et al. Observation of optical redshifts and blue shifts produced by source correlations. *Opt Commun*, 1988, 67: 1–4
- 12 De Santis P, Gori F, Guattari G, et al. Synthesis of partially coherent fields. *J Opt Soc Am A*, 1986, 3: 1258–1262
- 13 Kato Y, Mima K, Miyanaga N, et al. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression. *Phys Rev Lett*, 1984, 53: 1057
- 14 Ricklin J C, Davidson F M. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19: 1794–1802
- 15 Ricklin J C, Davidson F M. Atmospheric optical communication with a Gaussian Schell beam. *J Opt Soc Am A*, 2003, 20: 856–866
- 16 Cai Y J, Zhu S Y. Ghost interference with partially coherent radiation. *Opt Lett*, 2004, 29: 2716–2718
- 17 Cai Y J, Zhu S Y. Ghost imaging with incoherent and partially coherent light radiation. *Phys Rev E*, 2005, 71: 056607
- 18 Valencia A, Scarcelli G, D'Angelo M, et al. Two-photon imaging with thermal light. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 063601
- 19 Wolf E, Collett E. Partially coherent sources which produce the same far-field intensity distribution as a laser. *Opt Commun*, 1978, 25: 293–296
- 20 Zhao C L, Cai Y J, Korotkova O. Radiation force of scalar and electromagnetic twisted Gaussian Schell-model beams. *Opt Express*, 2009, 17: 21472–21487
- 21 Zhao C L, Cai Y J. Trapping two types of particles using a focused partially coherent elegant Laguerre–Gaussian beam. *Opt Lett*, 2011, 36: 2251–2253
- 22 Gureyev T, Paganin D, Stevenson A, et al. Generalized Eikonal of partially coherent beams and its use in quantitative imaging. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 068103
- 23 Clark J, Huang X, Harder R, et al. High-resolution three-dimensional partially coherent diffraction imaging. *Nat Commun*, 2012, 3: 993
- 24 Robb G, Firth W. Collective atomic recoil lasing with a partially coherent pump. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 253601
- 25 Zhang J F, Wang Z Y, Cheng B, et al. Atom cooling by partially spatially coherent lasers. *Phys Rev A*, 2013, 88: 023416
- 26 Cai Y J, Chen Y H, Wang F. Generation and propagation of partially coherent beams with nonconventional correlation functions: A review [Invited]. *J Opt Soc Am A*, 2014, 31: 2083–2096
- 27 Gori F, Santarsiero M. Devising genuine spatial correlation functions. *Opt Lett*, 2007, 32: 3531–3533
- 28 Gori F, Ramírez-Sánchez V, Santarsiero M, et al. On genuine cross-spectral density matrices. *J Opt A-Pure Appl Op*, 2009, 11: 085706
- 29 Lajunen H, Saastamoinen T. Propagation characteristics of partially coherent beams with spatially varying correlations. *Opt Lett*, 2011, 36: 4104–4106
- 30 Sahin S, Korotkova O. Light sources generating far fields with tunable flat profiles. *Opt Lett*, 2012, 37: 2970–2972
- 31 Chen Y H, Liu L, Wang F, et al. Elliptical Laguerre-Gaussian correlated Schell-model beam. *Opt Express*, 2014, 22: 13975–13987
- 32 Liang C H, Wang F, Liu X L, et al. Experimental generation of cosine-Gaussian-correlated Schell-model beams with rectangular symmetry. *Opt Lett*, 2014, 39: 769–772
- 33 Chen Y H, Wang F, Liu L, et al. Generation and propagation of a partially coherent vector beam with special correlation functions. *Phys Rev A*, 2014, 89: 013801
- 34 Chen Y H, Gu J X, Wang F, et al. Self-splitting properties of a Hermite-Gaussian correlated Schell-model beam. *Phys Rev A*, 2015, 91: 013823
- 35 Cai Y J. Generation of various partially coherent beams and their propagation properties in turbulent atmosphere: A review. *P SPIE*, 2011, 7924: 792402
- 36 Zhao C L, Cai Y J, Wang F, et al. Generation of a high-quality partially coherent dark hollow beam with a multimode fiber. *Opt Lett*, 2008 33: 1389–1391
- 37 Cai Y J, He S L. Partially coherent flattened Gaussian beam and its paraxial propagation properties. *J Opt Soc Am A*, 2006, 23: 2623–2628
- 38 Cai Y J, Lin Q, Baykal Y, et al. Off-axis Gaussian Schell-model beam and partially coherent laser array beam in a turbulent atmosphere. *Opt Commun*, 2007, 278: 157–167
- 39 Wolf E. Unified theory of coherence and polarization of random electromagnetic beams. *Phys Lett A*, 2003, 312: 263–267
- 40 Wolf E. Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 41 James D F. Change of polarization of light beams on propagation in free space. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11: 1641–1643
- 42 Agrawal G P, Wolf E. Propagation-induced polarization changes in partially coherent optical beams. *J Opt Soc Am A*, 2000, 17: 2019–2023

- 43 Setälä T, Shevchenko A, Kaivola M, et al. Degree of polarization for optical near fields. *Phys Rev E*, 2002, 66: 016615
- 44 Korotkova O, Wolf E. Changes in the state of polarization of a random electromagnetic beam on propagation. *Opt Commun*, 2005, 246: 35–43
- 45 Dong Y M, Cai Y J, Zhao C L, et al. Statistics properties of a cylindrical vector partially coherent beam. *Opt Express*, 2011, 19: 5979–5992
- 46 Dong Y M, Wang F, Zhao C L, et al. Effect of spatial coherence on propagation, tight focusing, and radiation forces of an azimuthally polarized beam. *Phys Rev A*, 2012, 86: 013840
- 47 Wang F, Cai Y J, Dong Y M, et al. Experimental generation of a radially polarized beam with controllable spatial coherence. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 051108
- 48 Cai Y J, Wang F, Zhao C L, et al. Partially Coherent Vector Beams: From theory to Experiment. Singapore: World Scientific, 2013. 221–273
- 49 Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. *Phys Rev A*, 1992, 45: 8185
- 50 Allen L, Padgett M J, Babiker M. The orbital angular momentum of light. *Prog Opt*, 1999, 39: 291–372
- 51 Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nat Photonics*, 2012, 6: 488–496
- 52 Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L. Twisted photons. *Nat Phys*, 2007, 3: 305–310
- 53 Dholakia K, Čižmár T. Shaping the future of manipulation. *Nat Photonics*, 2011, 5: 335–342
- 54 Zhu S J, Chen Y H, Cai Y J. Experimental determination of the radius of curvature of an isotropic Gaussian Schell-model beam. *J Opt Soc Am A*, 2013, 30: 171–176
- 55 Gori F, Santarsiero M, Borghi R, et al. Partially coherent sources with helicoidal modes. *J Mod Optic*, 1998, 45: 539–554
- 56 Ponomarenko S A. A class of partially coherent beams carrying optical vortices. *J Opt Soc Am A*, 2001, 18: 150–156
- 57 Bogatyryova G V, Fel'de C V, Polyanskii P V, et al. Partially coherent vortex beams with a separable phase. *Opt Lett*, 2003, 28: 878–880
- 58 Maleev I D, Palacios D M, Marathay A S, et al. Spatial correlation vortices in partially coherent light: Theory. *J Opt Soc Am B*, 2004, 21: 1895–1900
- 59 Jeng C C, Shih M F, Motzek K, et al. Partially incoherent optical vortices in self-focusing nonlinear media. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 043904
- 60 Palacios D, Maleev I, Marathay A, et al. Spatial correlation singularity of a vortex field. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 143905
- 61 Swartzlander Jr G A, Schmit J. Temporal correlation vortices and topological dispersion. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 093901
- 62 Wang W, Hanson S G, Miyamoto Y, et al. Experimental investigation of local properties and statistics of optical vortices in random wave fields. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 103902
- 63 Wang W, Takeda M. Coherence current, coherence vortex, and the conservation law of coherence. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 223904
- 64 Wang W, Duan Z H, Hanson S G, et al. Experimental study of coherence vortices: Local properties of phase singularities in a spatial coherence function. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 073902
- 65 Swartzlander Jr G A, Hernandez-Aranda R I. Optical Rankine vortex and anomalous circulation of light. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 163901
- 66 Maleev I D, Swartzlander Jr G A. Propagation of spatial correlation vortices. *J Opt Soc Am B*, 2008, 25: 915–922
- 67 Van Dijk T, Visser T D. Evolution of singularities in a partially coherent vortex beam. *J Opt Soc Am A*, 2009, 26: 741–744
- 68 Wang F, Cai Y J, Korotkova O. Partially coherent standard and elegant Laguerre-Gaussian beams of all orders. *Opt Express*, 2009, 17: 22366–22379
- 69 Pires H, Woudenberg J, Van Exter M. Measurements of spatial coherence of partially coherent light with and without orbital angular momentum. *J Opt Soc Am A*, 2010, 27: 2630–2637
- 70 Zhao C L, Wang F, Dong Y, et al. Effect of spatial coherence on determining the topological charge of a vortex beam. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 261104
- 71 Yang Y J, Mazilu M, Dholakia K. Measuring the orbital angular momentum of partially coherent optical vortices through singularities in their cross-spectral density functions. *Opt Lett*, 2012, 37: 4949–4951
- 72 Escalante A Y, Perez-Garcia B, Hernandez-Aranda R I, et al. Determination of angular momentum content in partially coherent beams through cross correlation measurements. *P SPIE*, 2013, 8843: 884302
- 73 Yang Y J, Chen M Z, Mazilu M, et al. Effect of the radial and azimuthal mode indices of a partially coherent vortex field upon a spatial correlation singularity. *New J Phys*, 2013, 15: 113053
- 74 Liu X L, Shen Y, Liu L, et al. Experimental demonstration of vortex phase-induced reduction in scintillation of a partially coherent beam. *Opt Lett*, 2013, 38: 5323–5326
- 75 Wang F, Zhu S J, Cai Y J. Experimental study of the focusing properties of a Gaussian Schell-model vortex beam. *Opt Lett*, 2011, 36: 3281–3283
- 76 Chen Y H, Wang F, Zhao C L, et al. Experimental demonstration of a Laguerre-Gaussian correlated Schell-model vortex beam. *Opt Express*, 2014, 22: 5826–5838

- 77 Simon R, Mukunda N. Twisted Gaussian Schell-model beams. *J Opt Soc Am A*, 1993, 10: 95–109
- 78 Friberg A T, Tervonen E, Turunen J. Interpretation and experimental demonstration of twisted Gaussian Schell-model beams. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11: 1818–1826
- 79 Borghi R, Gori F, Guattari G, et al. Twisted Schell-model beams with axial symmetry. *Opt Lett*, 2015, 40: 4504–4507
- 80 Simon R, Mukunda N. Twist phase in Gaussian-beam optics. *J Opt Soc Am A*, 1998, 15: 2373–2382
- 81 Simon R, Mukunda N, Sundar K. Twisted Gaussian Schell-model beams. I. Symmetry structure and normal-mode spectrum. *J Opt Soc Am A*, 1993, 10: 2008–2016
- 82 Sundar K, Mukunda N, Simon R. Twisted Gaussian Schell-model beams. II. Spectrum analysis and propagation characteristics. *J Opt Soc Am A*, 1993, 10: 2017–2023
- 83 Östlund P, Friberg A T. Radiometry and radiation efficiency of twisted Gaussian Schell-model Sources. *Opt Rev*, 2001, 8: 1–8
- 84 Simon R, Mukunda N. Optical phase space, Wigner representation, and invariant quality parameters. *J Opt Soc Am A*, 2000, 17: 2440–2463
- 85 Bastiaans M J. Wigner distribution function applied to twisted Gaussian light propagating in first-order optical systems. *J Opt Soc Am A*, 2000, 17: 2475–2480
- 86 Ding G L, Yuan X, Lü B D. Propagation characteristics of the ten-parameter family of partially coherent general anisotropic Gaussian Schell-model (AGSM) beams passing through first-order optical system. *J Mod Optic*, 2000, 47: 1483–1499
- 87 Ambrosini D, Bagini V, Gori F, et al. Twisted Gaussian Schell-model beams: a superposition model. *J Mod Optic*, 1994, 41: 1391–1399
- 88 Sundar K, Mukunda N, Simon R. Coherent-mode decomposition of general anisotropic Gaussian Schell-model beams. *J Opt Soc Am A*, 1995, 12: 560–569
- 89 Gori F, Santarsiero M. Twisted Gaussian Schell-model beams as series of partially coherent modified Bessel–Gauss beams. *Opt Lett*, 2015, 40: 1587–1590
- 90 Lin Q, Cai Y J. Tensor ABCD law for partially coherent twisted anisotropic Gaussian-Schell model beams. *Opt Lett*, 2002, 27: 216–218
- 91 Cai Y J, Wang F. Tensor method for treating the propagation of scalar and electromagnetic Gaussian Schell-model beams: A review. *Open Opt J*, 2010, 4: 1–20
- 92 Cai Y J, Lin Q. Spectral shift of partially coherent twisted anisotropic Gaussian Schell-model beams in free space. *Opt Commun*, 2002, 204: 17–23
- 93 Zhu S J, Cai Y J. Spectral shift of a twisted electromagnetic Gaussian Schell-model beam focused by a thin lens. *Appl Phys B*, 2010, 99: 317–323
- 94 Cai Y J, Lin Q, Ge D. Propagation of partially coherent twisted anisotropic Gaussian Schell-model beams in dispersive and absorbing media. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19: 2036–2042
- 95 Cai Y J, He S L. Propagation of a partially coherent twisted anisotropic Gaussian Schell-model beam in a turbulent atmosphere. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 041117
- 96 Cai Y J, Hu L. Propagation of partially coherent twisted anisotropic Gaussian Schell-model beams through an apertured astigmatic optical system. *Opt Lett*, 2006, 31: 685–688
- 97 Liu L, Chen Y H, Guo L N, et al. Twist phase-induced changes of the statistical properties of a stochastic electromagnetic beam propagating in a uniaxial crystal. *Opt Express*, 2015, 23: 12454–12467
- 98 Serna J, Movilla J. Orbital angular momentum of partially coherent beams. *Opt Lett*, 2001, 26: 405–407
- 99 Cai Y J, Zhu S J. Orbital angular moment of a partially coherent beam propagating through an astigmatic ABCD optical system with loss or gain. *Opt Lett*, 2014, 39: 1968–1971
- 100 Lin L, Huang Y S, Chen Y H, et al. Orbital angular moment of an electromagnetic Gaussian Schell-model beam with a twist phase. *Opt Express*, 2015, 23: 30283–30296
- 101 Wang F, Cai Y J, Eyyuboglu H T, et al. Twist phase-induced reduction in scintillation of a partially coherent beam in turbulent atmosphere. *Opt Lett*, 2012, 37: 184–186
- 102 Wang F, Cai Y J. Second-order statistics of a twisted Gaussian Schell-model beam in turbulent atmosphere. *Opt Express*, 2010, 18: 24661–24667
- 103 Cai Y J, Peschel U. Second-harmonic generation by an astigmatic partially coherent beam. *Opt Express*, 2007, 15: 15480–15492
- 104 Cai Y J, Lin Q, Korotkova O. Ghost imaging with twisted Gaussian Schell-model beam. *Opt Express*, 2009, 17: 2453–2464
- 105 Tong Z S, Korotkova O. Beyond the classical Rayleigh limit with twisted light. *Opt Lett*, 2012, 37: 2595–2597
- 106 Zhan Q W. Cylindrical vector beams: From mathematical concepts to applications. *Adv Opt Photon*, 2009, 1: 1–57
- 107 Wang F, Liu X L, Cai Y J. Propagation of partially coherent beam in turbulent atmosphere: A review. *Prog Electromagn Res*, 2015, 15: 123–143
- 108 Tamburini F, Anzolin G, Umbriaco G, et al. Overcoming the Rayleigh criterion limit with optical vortices. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 163903
- 109 Zubairy M S, McIver J K. Second-harmonic generation by a partially coherent beam. *Phys Rev A*, 1987, 36: 202–206

Research progress in phase modulation of partially coherent beam and its fundamental applications

CHEN YaHong, LIU Lin & CAI YangJian

College of Physics, Optoelectronics and Energy & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China

It is well known that the propagation properties of a laser beam are closely determined by its amplitude, polarization, phase and coherence. Usually the coherence length of a laser beam is extremely large and the laser beam is assumed to be a coherent beam, which is characterized by the electric field. A laser beam with small coherence length (i.e., partially coherent beam) is characterized by the correlation function of the electric field and is preferred in many applications, such as inertial confinement fusion, optical imaging, atom cooling, atomic recoil lasing, free-space optical communications, particle trapping, optical scattering, and second-harmonic generation. Partially coherent beam has many exciting optical properties, e.g., the degree of polarization and the state of polarization of a vector partially coherent beam may vary on propagation, spectral shift may appear in a polychromatic partially coherent beam on propagation, and the correlation function of a partially coherent beam can induce self-shaping, self-splitting and self-focusing properties. Partially coherent beam carrying vortex phase possesses orbital angular momentum, and such beam carries unique correlation singularities. Partially coherent beam carrying twist phase also possess orbital angular momentum. The twist phase opens up “a new dimension” in the area of partially coherent field, and it differs in many aspects from the customary quadratic phase factor. The twist phase is bounded in strength and is absent in a coherent beam, and such phase has an intrinsic chiral or handedness property and is responsible for the rotation of the beam spot on propagation. An essential aspect of the twist phase is that it is intrinsically two-dimensional, and it cannot be separated into a sum of one-dimensional contributions. The requirements on the phase properties of partially coherent beam are different in various applications, thus it is necessary to modulate the optical properties of such beam. In this paper, we present a review of the developments on phase modulation and fundamental application of partially coherent beam, and we mainly introduce the theoretical model, experimental generation, optical properties and related applications of partially coherent beam carrying vortex phase or twist phase. It is shown that the propagation properties of partially coherent beam are closely determined by its initial phase, and phase modulation has important and promising applications in beam shaping, particle trapping, free-space optical communication, optical imaging and nonlinear optics.

partially coherent beam, phase modulation, vortex phase, twist phase, fundamental applications

doi: 10.1360/N972015-01300