DOI:10.16136/j.joel.2023.05.0287

多高斯关联扭曲光束在 GRIN 光纤中的轨道角 动量演化

王 静^{1,2*},张雅凯¹,钱仙妹²,朱文越²,李晋红^{1,2}

(1.太原科技大学 应用科学学院,太原 030024; 2.中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室,合肥 230031)

摘要:轨道角动量(orbital angular momentum,OAM)的引入丰富了光通信领域内的调制维度,为寻找更高效快捷的通信方式提供了新思路,相较于传统携带涡旋相位的涡旋光束,部分相干扭曲光束携带的OAM性质更为复杂。本文针对椭圆多高斯关联扭曲光束在梯度折射率(gradient-index,GRIN)光纤中的OAM传输,基于GRIN光纤的ABCD光学传输矩阵,着重分析了多高斯关 联扭曲光束在GRIN光纤传输的OAM的传输演化特性。研究结果表明,光束的光强、OAM通量 密度以及归一化OAM通量密度在光纤传输过程中均呈现周期性变化,通过对关联结构以及扭曲 因子的调控不仅可以改变光束OAM通量密度的分布,还可以调控单光子携带OAM的大小。本 文的研究有助于丰富扭曲部分相干光束在GRIN光纤中传输的理论结果,在光纤通信中具有潜在 的应用前景。

关键词:轨道角动量(OAM);多高斯关联;扭曲相位;GRIN 光纤;部分相干 中图分类号:TN929.11 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2023)05-0516-06

Orbital angular momentum evolution of a multi-Gaussian correlated twisted beam in GRIN fiber

WANG Jing^{1,2*}, ZHANG Yakai¹, QIAN Xianmei², ZHU Wenyue², LI Jinhong^{1,2}

School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: The introduction of orbital angular momentum (OAM) enriches the modulation dimension in the field of optical communication and provides a new idea for finding a more efficient and fast communication way. The nature of the OAM carried by partially coherent twisted beams is more complex than that carried by conventional vortex beams with vortex phases. In view of the OAM of elliptical multi-Gaussian correlated twisted beams transmitted in the gradient-index (GRIN) fiber, based on the *ABCD* optical transmission matrix of GRIN fiber, this paper investigates the spectral intensity and OMA variation characteristics of the light beam transmitted in it. The results show that the intensity, OAM flux density and normalized OAM flux density vary periodically during fiber transmission. The modulation of the correlation structure and the twisted factor can not only change the distribution of the beam OAM flux density, but also modulate the OAM carried by a single photon. The research in this paper helps to enrich the theoretical results of partial coherent twisted beam transmission in GRIN fibers, which has potential applications in fiber optic communication.

Key words:orbital angular momentum (OAM); multi-Gaussian correlated; twisted phase; gradient-index (GRIN) fiber; partially coherent

* E-mail:wangjingtyust@163.com

收稿日期:2022-04-20 修订日期:2022-06-12

基金项目:国家自然科学基金(11904253)、中国科学院大气光学重点实验室开放课题基金(HTAD-JJ-19-02)、山西省中央引导地方 科技发展资金项目(YDZX20201400001386)和太原科技大学科研启动基金(20202013)资助项目

0 引 言

轨道角动量(orbital angular momentum, OAM)因在光通信系统中具有广阔的应用前景而 在最近成为了激光领域中的研究热点之一[1]。携 带 OAM 的光束被称为 OAM 光束,除了通信领 域,OAM 光束在光学扳手^[2]、量子存储^[3]等领域 也具有广泛的应用。众所周知,涡旋光束是一种 经典的 OAM 光束,其具有螺旋状的相位结构,每 光子携带的 OAM 数为 lh,其中 l 表示拓扑荷数,h 表示约化普朗克常数。像散光束可以携带很大的 OAM,其每个光子可携带的OAM最高可达 10000 h^[4]。除了涡旋光束和像散光束之外,扭曲高 斯谢尔模(twisted Gaussian Schell model, TGSM) 光束也被证明携带有 OAM,其由 SIMON 和 MUKUNDA 首次在 1993 年提出^[5],这类光束的显 著特点是其在传输过程中光强、相干度分布可以 绕传播轴旋转,研究人员对 TGSM 光束的特性持 续探索,发现这类光束在鬼成像[6]、粒子捕获[7]等 领域也有着许多应用。

随着对 TGSM 光束特性研究的深入,常规的 TGSM 光束已不能满足人们继续研究的需求,学 术界亟待具有新型关联结构的扭曲光束的出现。 2007年,GORI 等^[8]介绍了一种新型标量部分相干光 束的构造方法。此后,多高斯谢尔模(muti-Gaussian Schell model,MGSM)光束^[9]、非均匀关联光束等新 型部分相干光束相继基于此方法产生。2015年, BORGHI 等^[10]提出了一种轴对称的高斯谢尔模 光束能否携带扭曲相位的判定方法,此后有很多 的新型扭曲部分相干光束被提出并进行了研究。 如扭曲阵列光束^[11]、扭曲多高斯谢尔模(twisted muti-Gaussian Schell model,TMGSM)光束^[12]、扭 曲厄米高斯光束^[13]等。

随着信息技术的不断发展,现行通信系统中 的信道容量和速率已逐渐不能满足人们的日常生 活需求。扭曲部分相干光束携带有 OAM,OAM 具有无限多个相互正交且互不干扰的模式,通过 OAM 复用让每个模式携带一路信号,可极大提升 通信系统的信道容量及传输速率。扭曲部分相干 光束属于多模光束,可在多模光纤中进行传输,梯 度折射率(gradient-index,GRIN)光纤是一种经典 的多模光纤,在高分辨率成像^[14]等领域具有潜在 的应用前景。近年来,科研人员已经研究了多种 光束在 GRIN 光纤中的传输^[15,16]。然而,对扭曲 部分相干光束在 GRIN 光纤中的 OAM 演化特性 尚无人研究。本文基于张雅凯等^[12]的研究工作, 对多高斯关联扭曲光束在 GRIN 光纤中的光强及 OAM演化特性进行了模拟和分析,研究结果将在 光纤通信领域具有广泛的应用前景。

1 理论模型

对部分相干光束的研究一般从交叉谱密度 (cross spectral density,CSD)函数来展开,标量部分 相干光束的二阶统计特性可以由CSD函数表 示为^[17]

$$W(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2) = \sqrt{S(\mathbf{r}_1)S(\mathbf{r}_2)} \eta(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)\chi(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2) ,$$
(1)

式中, $S(\mathbf{r})$ 为光束振幅轮廓函数, $\mathbf{r}_1 = (r_{1x}, r_{1y}), \mathbf{r}_2$ = (r_{2x}, r_{2y}) 表示源平面中任意两点的位置向量, η ($\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$)为光束的相干结构函数, $\chi(r_1, r_2)$ 表示光束 的相位结构函数。

根据广义-惠更斯菲涅尔原理,光束通过像散 ABCD 光学系统的 CSD 公式可以表示为:

$$W(\boldsymbol{\rho}_{1},\boldsymbol{\rho}_{2},\boldsymbol{z}) = \frac{1}{\lambda^{2}B^{2}} \times \\ \iint W(\boldsymbol{r}_{1},\boldsymbol{r}_{2}) \exp\left[-\frac{\mathrm{i}k}{2B}(A\boldsymbol{r}_{1}^{2}-2\boldsymbol{r}_{1}\boldsymbol{\rho}_{1}+D\boldsymbol{\rho}_{1}^{2})\right] \times \\ \exp\left[\frac{\mathrm{i}k}{2B}(A\boldsymbol{r}_{2}^{2}-2\boldsymbol{r}_{2}\boldsymbol{\rho}_{2}+D\boldsymbol{\rho}_{2}^{2})\right] \mathrm{d}^{2}\boldsymbol{r}_{1} \mathrm{d}^{2}\boldsymbol{r}_{2} , \qquad (2)$$

式中, $\rho_1 = (\rho_{1x}, \rho_{1y}), \rho_2 = (\rho_{2x}, \rho_{2y})$ 是接收平面中任 意两个位置向量, λ 表示光束波长, $k = 2\pi/\lambda$ 是波数, A、B、C、D均为光学矩阵的元素。

本文研究扭曲部分相干光束,此类光束具有 OAM。对于标量部分相干光束,OAM 通量密度表 示 OAM 在光束横截面上的空间分布,沿 z 轴的 OAM 通量密度可以表示为^[18]:

$$O(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{z}) = -\frac{\varepsilon_0}{k} \mathrm{Im} [\rho_{1y} \partial_{\rho_{2x}} W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, \boldsymbol{z}) - \rho_{1x} \partial_{\rho_{2y}} W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, \boldsymbol{z})]_{\boldsymbol{\rho}_1 = \boldsymbol{\rho}_2 = \boldsymbol{\rho}}, \qquad (3)$$

式中, ϵ_0 代表自由空间介电常数, $\partial_{\rho_{2x}}$ 与 $\partial_{\rho_{2y}}$ 表示对 ρ_{2x} 和 ρ_{2y} 的偏导,此参量的取值与光强有很大的关 系,为了更好地理解 OAM 如何分布在光束的截面 上,定义归一化的 OAM 通量密度为:

$$O_n(\boldsymbol{\rho}, z) = \frac{\hbar \omega O(\boldsymbol{\rho}, z)}{\boldsymbol{S}_p(\boldsymbol{\rho}, z)}, \qquad (4)$$

式中, $\omega = 2\pi c / \lambda$ 表示光束的角频率, $S_{\rho}(\rho, z)$ 为 z 方向的坡印廷矢量:

$$\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{\rho}}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{z}) = \frac{k}{\mu_0 \omega} W(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{z}) , \qquad (5)$$

式中,µ₀表示真空磁导率。接下来考虑一种具有多 高斯关联的扭曲光束,在源平面处,具有椭圆轮廓的 TMGSM 光束的 CSD 函数解析式可表示如下^[12]:

$$W(\boldsymbol{r}_1,\boldsymbol{r}_2) = \frac{1}{C_0} \sum_{m=1}^{M} {M \choose m} \frac{(-1)^{m-1}}{m} \times$$

式中, $C_0 = \sum_{m=1}^{M} {M \choose m} \frac{(-1)^{m-1}}{m}$ 为归一化参数,

 $\binom{M}{m}$ 表示二项式系数, M表示多高斯模数, σ_x , σ_y 分别为x, y方向上的束腰宽度, δ 为光束的相干长度, μ 表示扭曲因子。将式(6)代入式(2)中, 就能得到光束在接收平面上的 CSD 函数解析式:

$$W(\boldsymbol{\rho}_{1}, \boldsymbol{\rho}_{2}, z) = \sum_{m=1}^{M} {\binom{M}{m}} \frac{(-1)^{m-1}}{m} \times \frac{k^{2}}{4B^{2}C_{0}\sqrt{N_{1}N_{3}(N_{4}-\Omega_{2})(N_{5}-\Omega_{1})}} \times \exp\left[\frac{iDk}{2B}(\boldsymbol{\rho}_{2}^{2}-\boldsymbol{\rho}_{1}^{2}) - \frac{u_{1}^{2}}{4N_{1}} - \frac{v_{1}^{2}}{4N_{3}}\right] \times \exp\left[\frac{(iv_{2}-\Pi_{2})^{2}}{4(N_{4}-\Omega_{2})} + \frac{(iu_{2}-\Pi_{3})^{2}}{4(N_{5}-\Omega_{1})}\right], \quad (7)$$

其中

$$N_{1} = \frac{1}{4\sigma_{x}^{2}} + \frac{1}{2m\delta^{2}} + \frac{iAk}{2B}, N_{2} = \frac{1}{4\sigma_{x}^{2}} + \frac{1}{2m\delta^{2}} - \frac{iAk}{2B}, N_{3} = \frac{1}{4\sigma_{y}^{2}} + \frac{1}{2m\delta^{2}} + \frac{iAk}{2B}, N_{4} = \frac{1}{4\sigma_{y}^{2}} + \frac{1}{2m\delta^{2}} - \frac{iAk}{2B}, u_{1} = \frac{k\rho_{1x}}{B}, u_{2} = \frac{k\rho_{2x}}{B}, v_{1} = \frac{k\rho_{1y}}{B}, v_{2} = \frac{k\rho_{2y}}{B}, \Omega_{1} = \frac{1}{4N_{1}m^{2}\delta^{4}} - \frac{\mu^{2}}{4N_{3}}, \Omega_{2} = \frac{1}{4N_{3}m^{2}\delta^{4}} - \frac{\mu^{2}}{4N_{1}}, \Pi_{1} = \frac{iu_{1}}{2N_{1}m\delta^{2}} - \frac{v_{1}\mu}{2N_{3}}, \Pi_{2} = \frac{iv_{1}}{2N_{3}m\delta^{2}} + \frac{u_{1}\mu}{2N_{1}}, \eta_{1} = \frac{i\mu}{2N_{3}m\delta^{2}} - \frac{i\mu}{2N_{1}m\delta^{2}}, N_{5} = N_{2} - \frac{\eta_{1}^{2}}{4(N_{4} - \Omega_{2})}, \Pi_{3} = \Pi_{1} + \frac{(\Pi_{2} - iv_{2})\eta_{1}}{2(N_{4} - \Omega_{2})}$$

$$(8)$$

光强分布可由 CSD 函数表示为:

$$S(\boldsymbol{\rho}, z) = W(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, z) , \qquad (9)$$

GRIN 光纤的 ABCD 传输矩阵可由下式表示[16]:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta z) & \frac{\sin(\beta z)}{n_0 \beta} \\ -n_0 \beta \sin(\beta z) & \cos(\beta z) \end{bmatrix}, (10)$$

式中,β表示 GRIN 系数,n。表示光纤中心折射率。 将式(10)代入式(7)并结合式(3)、(4)、(9),即可得 到椭圆扭曲多高斯光束通过 GRIN 光纤的 OAM 通 量密度、归一化 OAM 通量密度及光强表达式。

2 值模拟与分析

在本节中,将式(7)分别代入式(3)、(4)、(9)中, 即可得到光束在 GRIN 光纤中传输时的 OAM 通量 密度、归一化 OAM 通量密度以及光强的数值模拟结

果,并对其在传输过程中的演化特性进行了分析。 将计算参数设定为: $\lambda = 632.8$ nm, $\sigma_x = 50/k$, $\sigma_y =$ 25 / k , $\delta = 50$ / k , M = 5 , $\mu = -4 \times 10^{-5} k^2$, $\beta =$ 5.25726 mm⁻¹, $n_0 = 1.46977$, $L = \pi/\beta_{\circ}$ [A] 1(a)-(c)分别描述了光束在 GRIN 光纤中传输时在 z-x 截 面上的光强、OAM 通量密度以及归一化 OAM 通量 密度图。观察图1可知,光束在传输过程中,其光 强、OAM 通量密度和归一化 OAM 通量密度均始终 保持着以L为周期的变化,这种现象的产生与GRIN 光纤的自聚焦特性紧密相关。观察图 1(b)z-x 截面 上 OAM 通量密度的演化,结合部分相干光的模式叠 加可知,轴上OAM 始终为0是由多阶的拉盖尔高斯 涡旋光束的奇点叠加造成的^[19]。图 1(c)中,归一化 OAM 通量密度表示光束在空间特定位置上单光子 的平均 OAM,在传输过程中呈现轴上低、边缘高的 分布,这与 MGSM 涡旋光束的分布类似^[20]。







图 2 详细分析了 TMGSM 光束在 GRIN 光纤中 传输不同距离时 x - y 截面的光强、OAM 通量密度以 及归一化 OAM 通量密度分布。其中,图 2(a)、(c)、 (e)中 $\sigma_x = \sigma_y = 50/k$,表示光束振幅轮廓为圆对称;图 2(b)、(d)、(f)中, $\sigma_x = 50/k$, $\sigma_y = 25/k$,表示光束振幅 轮廓为椭圆对称。观察图 2(a)得,在传输过程中,光 束在 GRIN 光纤的自聚焦作用下光斑逐渐减小,中 心亮斑区域不断扩大,在焦平面 z=0.5L 处达到最大,呈现出平顶强度分布,这与一般的 MGSM 光束是一致的^[9]。为进一步观察扭曲相位对光束造成的影响,在图 2(b)中光束初始表现为椭圆轮廓,观察到光束在传输过程中发生了旋转,在焦平面处旋转角度达到了 $\pi/2$ 。观察图 2(c),可以发现 OAM 通量密度均呈环形轮廓,中心产生奇点,OAM 通量密度的分布轮廓逐渐减小,传输到焦平面处时,轮廓变到最

小,而中心奇点区域变大,这一现象与部分相干涡旋 光束的 OAM 通量密度变化规律相似^[18],验证了扭 曲光束可由部分相干涡旋光束叠加产生的结论^[19]。 在图 2(d)中,由于光束受初始不同束腰宽度的影响, 诱导 OAM 通量密度分布表现为围绕奇点的两瓣分 布;除此之外,随着传输距离的增加,OAM 通量密度 分布发生了旋转,与光强分布的旋转规律一致,在焦 平面处旋转角度达到了 π/2。观察图 2(e)可发现,在





光束圆对称的情况下,归一化 OAM 通量密度随着传 输距离的增加其数值发生了增长。在光束椭圆对称 时,归一化 OAM 通量密度在传输到焦平面时也出现 了 π/2 的旋转。由于传输过程中光强各向异性的影 响,在图 2(d2)和(f2)中,OAM 通量密度和归一化 OAM 通量密度出现了负值区域,但总量保持守恒。 结果说明,OAM 的空心圆对称分布高度依赖光强的 各向同性,即圆对称的振幅轮廓分布,这与经典力学 中 OAM 的概念是契合的。

图 3 演示了在不同初始相干性的情况下,椭圆 TMGSM 光 束 在 GRIN 光 纤 中 分 别 传 输 到 z = 0.25 L 及z = 0.5 L 处时的OAM通量密度分布及归 一化 OAM 通量密度分布图。不难发现,改变相干长 度将影响 OAM 通量密度及归一化 OAM 通量密度 分布。由图 3(c)和(d)可知,增大相干长度,光束在 焦点位置有更小的光斑,OAM 通量密度轮廓减小而 数值增大;归一化 OAM 通量密度的分布轮廓始终是 中心低边缘高的空心分布,仅数值发生改变。





(a)(b) z=0.25L; (c)(d) z=0.5L;
(a)(c) OAM 通量密度; (b)(d) 归一化 OAM 通量密度
Fig. 3 The elliptical TMGSM beam with different

coherence length propagation distribution in the x-y section:

(a) (b) z=0.25L; (c) (d) z=0.5L;
(a) (c) OAM flux density;

(b)(d) Normalized OAM flux density

图 4 演化了不同扭曲因子的光束在 GRIN 光纤 中分别传输到 z=0.25L 及 z=0.5L 处时的 OAM 通量密度分布及归一化 OAM 通量密度分布图。在 z=0.25L 时,随着扭曲因子的增大,OAM 通量密度 轮廓也随之增大。在 z=0.5L 时,发现当扭曲因子 增加到了之前的两倍和三倍之后,其 OAM 通量密度 和归一化 OAM 通量密度的数值均增加到之前的两 倍和三倍,表明扭曲因子的变化可以显著影响到光 束 OAM 的大小,并且扭曲因子的大小和 OAM 的大 小呈现正相关。



图 4 不同扭曲因子的光束在 *x*-y 截面上的传输分布图:

(a) (b) z=0.25L; (c) (d) z=0.5L; (a) (c) OAM 通量密度;
 (b) (d) 归一化 OAM 通量密度

Fig. 4 The beam with different twisted factors propagation distribution in the x-y section: (a) (b) z=0.25L;
(c) (d) z=0.5L; (a) (c) OAM flux density;

(b)(d) Normalized OAM flux density

3 结 论

本文在 GRIN 光纤 ABCD 光学传输矩阵的基础 上,研究了椭圆 TMGSM 光束的光强、OAM 通量密 度以及归一化 OAM 通量密度在 GRIN 光纤中传输 时在各种参数影响下的变化特性。研究结果表明, 光束在 GRIN 光纤中传输时,其光强、OAM 通量密 度和归一化 OAM 通量密度均呈现周期为 L 的变 化,且在 0.5L 处均发生了 π/2 的旋转。圆对称的 TMGSM 光束的 OAM 通量密度分布与部分相干涡 旋光束类似为空心圆对称分布,表明了扭曲光束与 涡旋光束的内在叠加关系。且归一化 OAM 通量密 度分布呈现中心低、边缘高,与 MGSM 涡旋光束相 似。改变多高斯模数,传输距离、相干长度、扭曲因 子可以改变 OAM 通量密度的分布,并影响单光子的 OAM。本文的研究表明最易调控 TMGSM 光束 OAM 大小的参数为扭曲因子,其与 OAM 大小呈正 相关,相关结构和扭曲因子的调制不仅可以改变光 束 OAM 通量密度的分布,而且可以调制单个光子携 带的 OAM。本文的研究对扭曲部分相干光束的应 用开发具有理论指导意义,在光纤通信领域中具有 潜在的应用前景。

参考文献:

- BOZINOVIC N, YUE Y, REN Y, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers
 Science, 2013, 340(6140):1545-1548.
- [2] 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.
- [3] NICOLAS A, VEISSIER L, GINERi L, et al. A quantum memory for orbital angular momentum photonic qubits[J]. Nature Photonics, 2013, 8(3):234-238.
- [4] KOTLYAR V,KOVALEV A,PORFIREV A. Astigmatic laser beams with a large orbital angular momentum[J]. Optics Express,2018,26(1):141.
- [5] SIMON R, MUKUNDA N. Twisted Gaussian Schell-model beams[J]. Journal of the Optical Society of America, 1993,10(1):95-109.
- [6] CAI Y,LIN Q,KOROTKOVA O. Ghost imaging with twisted Gaussian Schell-model beam [J]. Optics Express, 2009,17(4):2453-2464.
- [7] ZHAO C, CAI Y, KOROTKOVA O. Radiation force of scalar and electromagnetic twisted Gaussian Schell-model beams[J]. Optics Express, 2009, 17(24): 21472-21487.
- [8] GORI F, SANTARSIERO M. Devising genuine spatial correlation functions[J]. Optics Letters, 2007, 32(24): 3531-3533.
- [9] SAHIN S, KOROTKOVA O. Light sources generating far fields with tunable flat profiles[J]. Optics Letters, 2012, 37(14):2970-2972.
- [10] BORGHI R, GORI F, GUATTARI G, et al. Twisted Schellmodel beams with axial symmetry [J]. Optics Letters, 2015, 40(19): 4504-4507.

- [11] WANG J,HUANG H, CHEN Y, et al. Twisted partially coherent array sources and their transmission in anisotropic turbulence [J]. Optics Express, 2018, 26 (20): 25974-25988.
- [12] ZHANG Y K,GUO M J,LI J H,et al. Propagation characteristics of twisted multi-Gaussian beams in gradient index fibers[J]. Laser Technology, 2022, 46(5):594-600.
 张雅凯,郭苗军,李晋红,等.扭曲多高斯光束在梯度 折射率光纤中的传输特性[J].激光技术, 2022, 46(5):594-600.
- [13] LIU L, WANG H, LIU L, et al. Propagation properties of a twisted hermite-Gaussian correlated Schell-model beam in free space[J]. Frontiers in Physics, 2022, 10:847649.
- [14] PONOMARENKO S. Self-imaging of partially coherent light in graded-index media[J]. Optics Letters, 2015, 40 (4):566-568.
- [15] ZHAO C G.LI J H.GUO M J.et al. Change in the spectral degree of coherence for random electromagnetic vortex beam propagating through fiber[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2022, 33(3): 321-329.
 赵春刚,李晋红,郭苗军,等.随机电磁涡旋光束在光纤中光谱相干度的变化[J].光电子•激光, 2022, 33(3): 321-329.
- [16] WANG J, YANG S, GUO M, et al. Change in phase singularities of a partially coherent Gaussian vortex beam propagating in a GRIN fiber[J]. Optics Express, 2020, 28 (4):4661-4673.
- [17] Wolf E. Introduction to the theory of coherence and polarization of light[M]. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [18] KIM S,GBUR G. Angular momentum conservation in partially coherent wave fields[J]. Physical Review A,2012, 86(4):043814.
- [19] GORI F, SANTARSIERO M. Twisted Gaussian Schell-model beams as series of partially coherent modified Bessel-Gauss beams [J]. Optics Letters, 2015, 40 (7): 1587-1590.
- [20] ZHANG Y, KOROTKOVA O, CAI Y, et al. Correlation-induced orbital angular momentum changes [J]. Physical Review A, 2020, 102(6):063513.

作者简介:

王 静 (1989-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事激光光场 调控与大气光学传输领域的研究.