

DOI:10.16136/j.joel.2023.01.0222

柱矢量涡旋光束在梯度折射率光纤中的光谱相干度分布

尹晓金, 赵春刚, 李晋红*

(太原科技大学 应用科学学院, 山西 太原 030024)

摘要:基于广义惠更斯-菲涅尔原理,构建了柱矢量涡旋光束在径向梯度折射率 (gradient-index, GRIN) 光纤中传输的解析表达式,并研究了其在径向 GRIN 光纤中的光谱相干度分布。研究结果表明,柱矢量涡旋光束的光谱相干度沿径向关于光纤纤芯中心对称分布。在光纤焦平面处,随着相干长度 σ 的降低,光谱相干度分布出现的暗环数逐渐增多,且拓扑荷 m 越大,光谱相干度分布随相干长度 σ 的变化越明显。相干长度 σ 一定且拓扑荷 m 相同时,不同波长 λ 的光谱相干度分布规律相同。GRIN 系数 β 影响光谱相干度的周期。

关键词:柱矢量涡旋光束; 径向梯度折射率 (GRIN) 光纤; 光谱相干度

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)01-0062-06

Distribution of spectral degree of coherence for cylindrical vector vortex beams in gradient-index fiber

YIN Xiaojin, ZHAO Chungang, LI Jinhong*

(School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: Based on the generalized Huygens-Fresnel principle, the analytical expression of cylindrical vector vortex beams in a radially gradient-index (GRIN) fiber is built, and its distribution of the spectral degree of coherence in a radially GRIN fiber is studied. The results show that the distribution of spectral degree of coherence of cylindrical vector vortex beams is symmetrical along the core of the fiber. At the focal plane of the radially GRIN fiber, with the decrease of coherence length σ , the number of dark rings of the spectral degree of coherence distribution increases gradually, and the change of the spectral degree of coherence distribution is more obvious with the increase of topological charge m . The distribution of the spectral degree of coherence with different wavelengths λ is the same when the coherence length σ is constant and topological charge m is the same. The spectral degree of coherence period changes with refractive index coefficient β .

Key words: cylindrical vector vortex beams; radially gradient-index (GRIN) fiber; spectral degree of coherence

0 引言

在传统光纤通信中,研究人员通过频分复用、码分复用、时分复用和空分复用等复用技术提升通信容量。然而随着通信需求的日益增长,势需要探索更大容量、更高速率的通信系统。由于

不同拓扑荷涡旋光束携带的轨道角动量相互正交性的特点,将其应用于通信中不仅可以增加信道容量和提升频谱利用率,还可以加强通信保密性^[1,2]。轨道角动量复用技术为提升通信容量和加密通信找到一个新的方向,同时提供了一种新的复用模式:模式复用。目前,许多研究人员正致

* E-mail: 2021013@tyust.edu.cn

收稿日期: 2022-03-31 修订日期: 2022-04-26

基金项目: 山西省青年科学研究项目(202103021223271)、校级博士科研启动金(20222009)和山西省中央引导地方科技发展资金项目(YDZX20201400001386)资助项目

力于对涡旋光通信的研究,通过设计和制作不同的模式复用和解复用器件实现对涡旋光的复用和解复用^[3-8]。袁小聪课题组设计了一种达曼光栅将不同方向入射的光束变为不同拓扑荷的轨道角动量,利用轨道角动量相互正交特性实现不同拓扑荷的轨道角动量在光纤中传输同时在光纤出射端利用达曼光栅实现对不同拓扑荷轨道角动量的解复用,进而增大光纤的传输容量。

Sonja Franke-Arnold 利用空间光调制器展示了编码为光束轨道角动量的信息传输。利用空间光调制器生成或测量八种不同轨道角动量状态的激光束。

偏振作为光的一个重要特性,利用偏振的正交性同样可以成倍地提升通信容量^[9-11]。柱矢量光束不同阶数之间相互垂直同时同一阶数存在两个相互正交的偏振态,进一步为增大通信容量提供了理论基础。范滇元院士课题组报告了一种基于金属-电介质-金属超表面的柱矢量光束复用/解复用的离轴偏振控制器件,成功演示了一种四通道柱矢量光束复用通信,同时结合波分复用和偏振分复用,达到传输速率为 1.56 Tbit/s,误码率为 10^{-6} 。

除了提升光束携带信息的能力外,传输介质对提升通信容量也十分重要。从传输介质的角度讲,现代通信主要分为大气通信和光纤通信。光纤由于具有大容量、高传输速率、低损耗和低误码率等特点已成为现代不可或缺的通信工具。与阶跃多模光纤相比,梯度折射率光纤 (gradient-index, GRIN) 具有自聚焦、色散低和弯曲损耗小等特点,适用于高速和短距离通信^[12-15],是提升光纤容量的一个研究方向。

本文将柱矢量光束与涡旋光束相结合构成柱矢量涡旋光束,柱矢量涡旋光束分为径向偏振涡旋光和角向偏振涡旋光,这两种光束均携带轨道角动量,且偏振方向分别沿径向和角向相互正交。将柱矢量涡旋光应用于径向 GRIN 光纤,探测其在 GRIN 光纤中的传输情况。本文研究了部分相干柱矢量涡旋光束在径向 GRIN 光纤传输中的光谱相干度分布情况。第1节基于广义惠更斯-菲涅尔原理^[16],构建了光束在径向 GRIN 光纤中传输的解析表达式;第2节数值模拟了光束在径向 GRIN 光纤中的光谱相干度分布;最后对光谱相干度分布的规律做出总结。

1 理论模型

部分相干光束在源平面处的交叉谱密度矩阵可表示为^[17]:

$$\mathbf{W}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, 0) = \begin{bmatrix} W_{xx}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, 0) & W_{xy}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, 0) \\ W_{yx}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, 0) & W_{yy}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, 0) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中,矩阵元 $W_{ij}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, 0) = \langle \mathbf{E}^*(\mathbf{s}_1, 0) \mathbf{E}_j(\mathbf{s}_2, 0) \rangle$ ($i, j = x, y$), $\mathbf{s}_1$ 和 $\mathbf{s}_2$ 是源平面处的二维位置矢量, $\mathbf{E}_x$ 和 $\mathbf{E}_y$ 是电场矢量, $*$ 表示复共轭, $\langle \cdot \rangle$ 表示统计系综。

部分相干径向偏振涡旋光束在源平面处的交叉谱密度矩阵元可表示为^[18]:

$$W_{ij}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, 0) = [s_{1x} + i \operatorname{sgn}(m) s_{1y}]^{|m|} [s_{2x} - i \operatorname{sgn}(m) s_{2y}]^{|m|} \times \frac{s_{1x}s_{2x} + s_{1y}s_{2y}}{w^2} \exp\left(-\frac{s_1^2 + s_2^2}{w^2}\right) \times \exp\left[-\frac{(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

式中, m 为拓扑荷, w 表示束腰宽度, σ 表示相干长度。当 $m = 0$ 时,光束退化为部分相干径向偏振光束。

根据广义惠更斯-菲涅尔原理,部分相干光束通过 ABCD 光学系统的矩阵元表达式为^[16]

$$W_{ij}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z) = \left(\frac{k}{2\pi B}\right)^2 \iint \iint W_{ij}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, 0) d\mathbf{s}_{1x} d\mathbf{s}_{1y} d\mathbf{s}_{2x} d\mathbf{s}_{2y} \times \exp\left\{-\frac{ik}{2B}[A(s_1^2 - s_2^2) - 2(\mathbf{s}_1 \boldsymbol{\rho}_1 - \mathbf{s}_2 \boldsymbol{\rho}_2 + D(\boldsymbol{\rho}_1^2 - \boldsymbol{\rho}_2^2))]\right\}, \quad (3)$$

式中, $\boldsymbol{\rho}_1 = (\rho_{1x}, \rho_{1y})$, $\boldsymbol{\rho}_2 = (\rho_{2x}, \rho_{2y})$ 是输出平面上的任意两点, $k = 2\pi/\lambda$ 是波数, λ 为波长。将式(2)代入式(3),经过计算可得径向偏振涡旋光束在 ABCD 光学系统中传输时的矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} W_{xx} & W_{xy} \\ W_{yx} & W_{yy} \end{bmatrix}_{(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z)} = \begin{bmatrix} GG_1 H_{\delta+2}(l_1) H_{\eta}(l_2) & GG_2 H_{\delta+1}(l_1) H_{\eta+1}(l_2) \\ GG_1 H_{\delta+1}(l_1) H_{\eta+1}(l_2) & GG_2 H_{\delta}(l_1) H_{\eta+2}(l_2) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中

$$G = \left(\frac{k}{Bw}\right)^2 \exp\left(-\frac{ikD}{2B}(\boldsymbol{\rho}_1^2 - \boldsymbol{\rho}_2^2)\right) \exp\left(-\frac{k^2 \boldsymbol{\rho}_2^2}{4B^2 M_1}\right) \times \exp\left[\left(\frac{ik\rho_{1x}}{2B\sqrt{M_2}} - \frac{ik\rho_{2x}}{4\sigma^2 B M_1 \sqrt{M_2}}\right)^2\right] 2^{-\frac{5}{2} \frac{|m|+9}{2}} i^{-2|m|-2} \times \exp\left[\left(\frac{ik\rho_{1y}}{2B\sqrt{M_2}} - \frac{ik\rho_{2y}}{4\sigma^2 B M_1 \sqrt{M_2}}\right)^2\right] M_1^{-\frac{|m|+3}{2}} \times \sum_{d_1=0}^{|m|} \sum_{d_2=0}^{|m|} \frac{|m|! i^{d_1}}{d_1! (|m|-d_1)!} \times \frac{|m|! i^{d_2}}{d_2! (|m|-d_2)!} \operatorname{sgn}(m)^{d_1} [-\operatorname{sgn}(m)]^{d_2}, \quad (5)$$

$$G_1 =$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{r_1=0}^{|m|-d_2+1} \sum_{r_2=0}^{d_2} \binom{|m|-d_2+1}{r_1} \binom{d_2}{r_2} \times \\
& H_{r_1}(k_1) H_{r_2}(k_2) \sum_{n_1=0}^{\frac{|m|-d_2+1-r_1}{2}} \sum_{n_2=0}^{\frac{d_2-r_2}{2}} (-1)^{n_1+n_2} \times \\
& M_2^p(j) |m|+1-r_1-2n_1-r_2-2n_2 q_1, \quad (6) \\
& G_2 = \\
& \sum_{r_1=0}^{|m|-d_2+1} \sum_{r_2=0}^{d_2} \binom{|m|-d_2}{r_1} \binom{d_2+1}{r_2} H_{r_1}(k_1) H_{r_2}(k_2) \times \\
& \sum_{n_1=0}^{\frac{|m|-d_2-r_1}{2}} \sum_{n_2=0}^{\frac{d_2+1-r_2}{2}} (-1)^{n_1+n_2} \times \\
& M_2^p(j) |m|+1-r_1-2n_1-r_2-2n_2 q_2, \quad (7) \\
& \delta = 2|m|-d_1-d_2-r_1-2n_1, \quad (8) \\
& \eta = d_1+d_2-r_2-2n_2, \quad (9)
\end{aligned}$$

式中, $H(\cdot)$ 表示 Hermite 多项式, $\binom{\cdot}{\cdot}$ 表示二项式系数。

$$M_1 = \frac{1}{w^2} + \frac{1}{2\sigma^2} - \frac{ikA}{2B}, \quad (10)$$

$$q_1 = \frac{(|m|-d_2+1-r_1)!}{n_1! (|m|-d_2+1-r_1-2n_1)!} \times \frac{(d_2-r_2)!}{n_2! (d_2-r_2-2n_2)!}, \quad (11)$$

$$l_1 = \frac{k\rho_{2x}}{4\sigma^2 BM_1 \sqrt{M_2}} - \frac{k\rho_{1x}}{2B \sqrt{M_2}}, \quad (12)$$

$$k_1 = \frac{k\rho_{2x}}{\sqrt{2}B \sqrt{M_1}}, \quad (13)$$

$$M_2 = \frac{1}{w^2} + \frac{1}{2\sigma^2} + \frac{ikA}{2B} - \frac{1}{4M_1\sigma^4}, \quad (14)$$

$$q_2 = \frac{(|m|-d_2-r_1)!}{n_1! (|m|-d_2-r_1-2n_1)!} \times \frac{(d_2+1-r_2)!}{n_2! (d_2-r_2+1-2n_2)!}, \quad (15)$$

$$l_2 = \frac{k\rho_{2y}}{4\sigma^2 BM_1 \sqrt{M_2}} - \frac{k\rho_{1y}}{2B \sqrt{M_2}}, \quad (16)$$

$$k_2 = \frac{k\rho_{2y}}{\sqrt{2}B \sqrt{M_1}}, \quad (17)$$

$$j = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma^2 \sqrt{M_1}}, \quad (18)$$

$$p = -\frac{2|m|+4-r_1-2n_1-r_2-2n_2}{2}. \quad (19)$$

部分相干角向偏振涡旋光束交叉谱密度矩阵与部分相干径向偏振涡旋光束交叉谱密度矩阵表达式关系为:

$$\begin{bmatrix} W_{xx} & W_{xy} \\ W_{yx} & W_{yy} \end{bmatrix}_{\text{azimuthally}} = \begin{bmatrix} W_{yy} & -W_{yx} \\ -W_{xy} & W_{xx} \end{bmatrix}_{\text{radially}}. \quad (20)$$

当 $m=0$ 时, 光束退化为部分相干角向偏振光束。

在近轴条件下, 径向 GRIN 光纤的 ABCD 传输矩阵为^[19]:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta z) & \frac{\sin(\beta z)}{n_0 \beta} \\ -n_0 \beta \sin(\beta z) & \cos(\beta z) \end{bmatrix}. \quad (21)$$

由式(6)可知, 径向 GRIN 光纤的 ABCD 传输矩阵有周期性, 周期为 $L = 2\pi/\beta$, β 是 GRIN 系数, n_0 是纤芯中心折射率, 包层折射率为 n_1 , 纤芯半径为 $2.5 \mu\text{m}$, $n_0 = 1.46977$, $n_1 = 1.45702$, $\beta = 5.257 \text{ mm}^{-1}$, 从而部分相干柱矢量涡旋光束通过径向 GRIN 光纤的表达式确定。

光谱相干度定义为^[17, 20]

$$\mu(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, z) = \frac{\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, z)}{\sqrt{\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_1, z)} \sqrt{\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{p}_2, \mathbf{p}_2, z)}}. \quad (22)$$

由式(5)和式(7)可知, 部分相干径向偏振涡旋光和角向偏振涡旋光的光谱相干度分布相同。

2 数值模拟与分析

图 1 为部分相干柱矢量涡旋光束通过径向 GRIN 光纤的光谱相干度分布图, 计算参数为 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $w = 100/k$, $\sigma = 10 \mu\text{m}$, $\mathbf{p}_1 = -\mathbf{p}_2$ 。从图 1 可以看出部分相干柱矢量涡旋光束的光谱相干度变化呈周期性。在一个传输周期内, 光束的光谱相干度关于焦平面对称分布, 同时关于光纤纤芯中心对称分布, 当 $m=0$ 和 $m=1$ 时, 光束光谱相干度分布中存在暗环。经过一个传输周期后, 光谱相干度会恢复到初始分布状态。通过对光谱相干度的分析证明部分相干柱矢量涡旋光束经过 GRIN 光纤传输后相干度未发生变化。

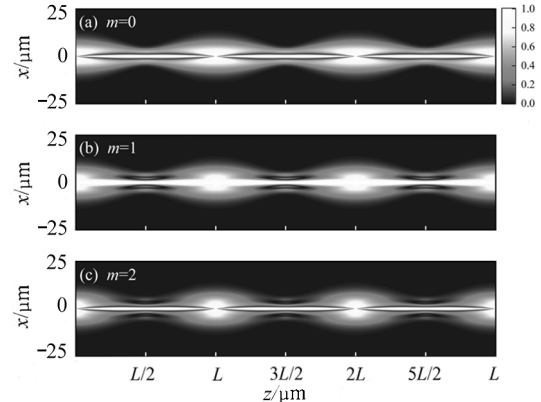


图 1 部分相干柱矢量涡旋光束在径向 GRIN 光纤中传输的光谱相干度分布示意图

Fig. 1 Spectral degree of coherence distribution of partially coherent cylindrical vector vortex beams in radially GRIN fiber

图2为不同相干长度 σ 的柱矢量涡旋光束在径向GRIN光纤中焦平面处的光谱相干度分布图,图2中,(a)对应 $m=0$, (b)对应 $m=1$, (c)对应 $m=2$, (a1)–(c1)对应 $\sigma=10\mu\text{m}$, (a2)–(c2)对应 $\sigma=20\mu\text{m}$, (a3)–(c3)对应 $\sigma=30\mu\text{m}$,其他计算参数与图1相同。由图2(a)可知,部分相干柱矢量涡旋光束不携带涡旋相位($m=0$)时,随着相干长度 σ 的变化,光谱相干度始终存在一个暗环。部分相干柱矢量光束携带涡旋相位后($m=1, 2$),随着相干长度 σ 的增大,光谱相干度分布中出现的暗环数逐渐减少,且拓扑荷 m 越大,光谱相干度分布随相干长度 σ 的变化越明显,说明随着 m 的增大,相干长度 σ 的选择需要在合适的长度,虽然随着 m 的增大,光谱相干度分布变化较大,但在光纤纤芯中心处,光谱相干度始终为1。

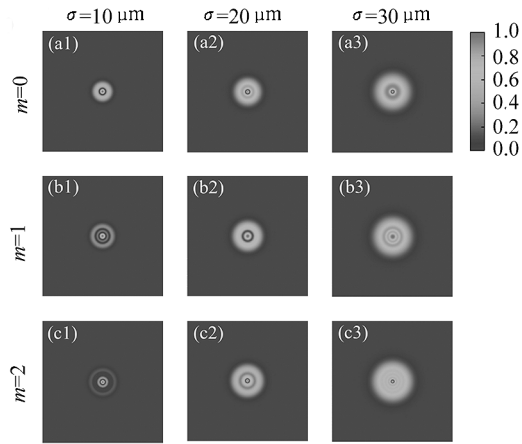


图2 不同相干长度 σ 的柱矢量涡旋光束在径向GRIN光纤中焦平面处的光谱相干度分布:

(a) $m=0$; (b) $m=1$; (c) $m=2$

Fig. 2 Spectral degree of coherence distribution of partially coherent cylindrical vector vortex beams with different spatial correlation lengths σ in focal plane of radially GRIN fiber: (a) $m=0$; (b) $m=1$; (c) $m=2$

接着研究了波长对光谱相干度的影响,在光通信的研究中,波分复用技术被广泛应用,因此研究波长对光谱相干度具有重要的价值。图3为不同波长 λ 的部分相干柱矢量涡旋光束在径向GRIN光纤中焦平面处的光谱相干度分布图,图3中,(a) $m=0$, (b) $m=1$, (c) $m=2$, (a1)–(c1) $\lambda=0.564\mu\text{m}$, (a2)–(c2) $\lambda=0.633\mu\text{m}$, (a3)–(c3) $\lambda=1.550\mu\text{m}$,其他计算参数与图1相同,图3使用

的颜色标尺与图2相同。从图3(a)可以看出不同波长 λ 的部分相干柱矢量涡旋光束在径向GRIN光纤的焦平面处光谱相干度分布具有1个暗环。从图3(b)中可以看出光谱相干度分布具有2个暗环。从图3(c)中可以看出光谱相干度分布具有3个暗环。说明部分相干柱矢量涡旋光束在径向GRIN光纤中焦平面处,相干长度 σ 一定且拓扑荷 m 相同时,不同波长 λ 的部分相干柱矢量涡旋光束的光谱相干度分布规律相同。

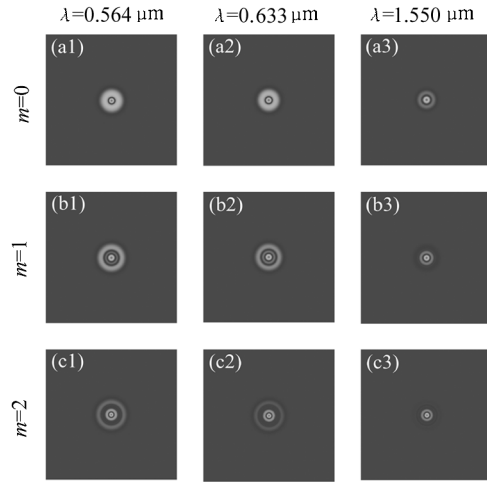


图3 不同波长 λ 的部分相干柱矢量涡旋光束在径向GRIN光纤中焦平面处的光谱相干度分布:

(a) $m=0$; (b) $m=1$; (c) $m=2$

Fig. 3 Spectral degree of coherence distribution of partially coherent cylindrical vector vortex beams with different wavelengths λ in focal plane of radially GRIN fiber: (a) $m=0$; (b) $m=1$; (c) $m=2$

图4为不同相干长度 σ 和不同波长 λ 的柱矢量涡旋光束在径向GRIN光纤中焦平面处的光谱相干度分布图,图4中,(a) $\lambda=0.564\mu\text{m}$, (b) $\lambda=0.633\mu\text{m}$, (c) $\lambda=1.550\mu\text{m}$, (a1)–(c1) $\sigma=10\mu\text{m}$, (a2)–(c2) $\sigma=20\mu\text{m}$, (a3)–(c3) $\sigma=30\mu\text{m}$, $m=1$,其他计算参数与图1相同,图4使用的颜色标尺与图2相同。从图4(a)和(b)可知随着相干长度 σ 的降低,光谱相干度分布中逐渐出现暗环,且暗环数逐渐增多。从图4(c)可知随着相干长度 σ 的降低,光谱相干度分布始终保持2个暗环。图4说明不同波长 λ 光束的光谱相干度对相干长度 σ 变化的响应不同。

图5为光纤的GRIN系数 β 不同时,部分相干柱

矢量涡旋光束的光谱相干度分布剖面图,图 5(a)–(c)中 β 分别为 5 mm^{-1} 、 7 mm^{-1} 和 9 mm^{-1} , $m = 1$, 其他计算参数与图 1 相同。从图 5(a)–(c)可以看出部分相干柱矢量涡旋光束传输相同的距离时,(a)–(c)中分别有 4 个、6 个、8 个完整周期,说明光束传输周期由径向 GRIN 光纤的 GRIN 系数 β 决定。

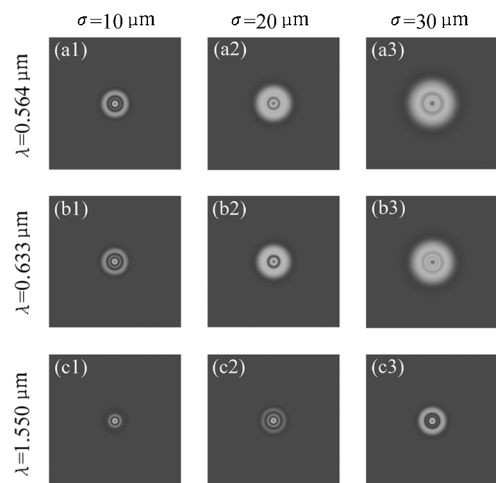


图 4 不同相干长度 σ 和不同波长 λ 的柱矢量涡旋光束在径向 GRIN 光纤中焦平面处的光谱相干度分布:(a) $\lambda = 0.564\text{ }\mu\text{m}$; (b) $\lambda = 0.633\text{ }\mu\text{m}$; (c) $\lambda = 1.550\text{ }\mu\text{m}$

Fig. 4 Spectral degree of coherence distribution of cylindrical vector vortex beams with different wavelengths λ and spatial correlation lengths σ in focal plane of radially GRIN fiber

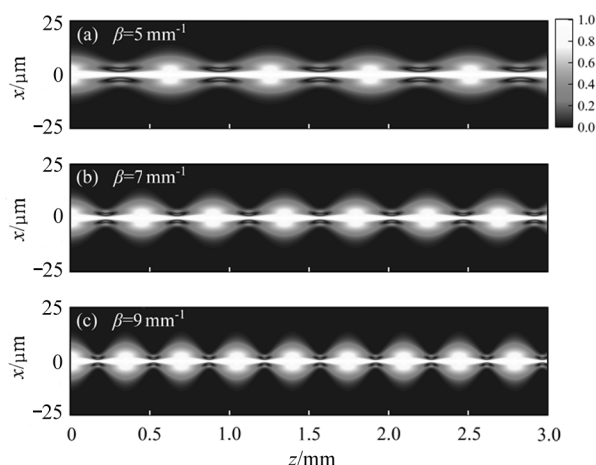


图 5 部分相干柱矢量涡旋光束通过不同 β 的径向 GRIN 光纤的光谱相干度分布

Fig. 5 Spectral degree of coherence distribution of partially coherent cylindrical vector vortex beams in radially GRIN fiber with different refractive index coefficient β

3 结 论

本文使用广义惠更斯-菲涅尔原理,构建了部分相干柱矢量涡旋光束通过径向 GRIN 光纤的解析表达式,并数值模拟了部分相干柱矢量涡旋光束光谱相干度分布的特性。研究结果表明柱矢量涡旋光束的光谱相干度沿径向关于光纤纤芯中心对称分布。在径向 GRIN 光纤中的焦平面处,随着相干长度 σ 的降低,光谱相干度分布出现的暗环数逐渐增多,且拓扑荷 m 越大,光谱相干度分布随相干长度 σ 的变化越明显。相干长度 σ 一定且拓扑荷 m 相同时,不同波长 λ 的光谱相干度分布规律相同。GRIN 系数 β 会改变光谱相干度的变化周期, β 越大光谱相干度周期越短。此研究结果对涡旋光束的传输具有指导意义,以及对大容量高速率光纤保密通信领域有参考价值。

参考文献:

- [1] WILLNER A E, PANG K, SONG H, et al. Orbital angular momentum of light for communications[J]. Applied Physics Reviews, 2021,8:041312.
- [2] WANG J. Advances in communications using optical vortices[J]. Photonics Research, 2016,4(5):B14-B28.
- [3] WILLNER A E, ZHAO Z, Liu C, et al. Perspectives on advances in high-capacity, free-space communications using multiplexing of orbital angular momentum beams[J]. APL Photonics, 2021,6(3):030901.
- [4] LEE D, SASAKI H, FUKUMOTO H, et al. An evaluation of orbital angular momentum multiplexing technology[J]. Applied Sciences, 2019,9(9):1729.
- [5] XIE Z, GAO S, LEI T, et al. Integrated (de)multiplexer for orbital angular momentum fiber communication[J]. Photonics Research, 2018,6(7):743-749.
- [6] SHI C, DUBOIS M, WANG Y, et al. High-speed acoustic communication by multiplexing orbital angular momentum [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017,114(28):7250-7253.
- [7] WILLNER A E, HUANG H, YAN Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. Advances Optics Photonics, 2015, 7(1):66-106.
- [8] BOZINOVIC N, YUE Y, REN Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. Science, 2013, 340(6140):1545-1548.
- [9] GNAUCK A H, WINZER P J, CHANDRASEKHAR S, et al. Spectrally efficient long-haul WDM transmission using 224 Gb/s polarization-multiplexed 16-QAM [J]. Journal of

- Lightwave Technology, 2011, 29(4): 373-377.
- [10] ZHOU X, YU J, HUANG M F, et al. 64-Tb/s, 8 b/s/Hz, PDM-36QAM transmission over 320 km using both pre- and post-transmission digital signal processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(4): 571-577.
- [11] SANO A, MASUDA H, KOBAYASHI T, et al. Ultra-high capacity WDM transmission using spectrally-efficient PDM 16-QAM modulation and C- and extended L-band wideband optical amplification[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(4): 578-586.
- [12] FLAES D E B, STOPKA J, TURTAEV S, et al. Robustness of light-transport processes to bending deformations in graded-index multimode waveguides[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(23): 233901.
- [13] KUNKEL W M, LEGER J R. Gradient-index design for mode conversion of diffracting beams[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13480-13488.
- [14] PONOMARENKO S A. Self-imaging of partially coherent light in graded-index media[J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 566-568.
- [15] GARLOS-REINO C, PEREZ M V, BAO C. Gradient-index optics fundamentals and applications[M]. Berlin: Springer, 2002: 209.
- [16] SIEGMAN A E. Lasers[M]. California: University Science Books, 1986: 777-811.
- [17] WOLF E. Unified theory of coherence and polarization of random electromagnetic beams[J]. Physics Letters A, 2003, 312(5): 263-267.
- [18] LI J, LI J, GUO L, et al. Polarization characteristics of radially polarized partially coherent vortex beam in anisotropic plasma turbulence[J]. Waves in Random Complex, 2020, 31(6): 1931-1944.
- [19] ROYCHOWDHURY H, AGRAWAL G P, WOLF E. Changes in the spectrum, in the spectral degree of polarization, and in the spectral degree of coherence of a partially coherent beam propagating through a gradient-index fiber[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23(4): 940-948.
- [20] WU G, CAI Y. Modulation of spectral intensity, polarization and coherence of a stochastic electromagnetic beam[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8700-8714.

作者简介:

李晋红 (1980—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光传输与控制、奇点光学和光场调控等方面的研究。