

部分相干混合位错光束在生物组织传输中的偏振特性*

冯姣姣 段美玲† 单晶 王灵辉 薛婷

(中北大学半导体与物理学院, 太原 030051)

(2024 年 7 月 15 日收到; 2024 年 8 月 13 日收到修改稿)

采用推导的部分相干线刀型-螺旋型混合位错光束在生物组织传输中的交叉谱密度函数与矩阵, 数值模拟了人体真皮组织传输中, 无量纲参数 a 和线刀型位错离轴距离 b 对源平面光束归一化光强和相位分布的影响; 相同两点间、不同两点间光束偏振态的变化, 及其与 4 个光束参数 (a 、 b 、空间相关长度 σ_{xy} , σ_{yy}) 以及传输距离 z 的关系. 结果表明: 归一化光强为非轴对称分布. a 绝对值越大, 主峰越圆润; b 值越大, 次峰越低. 在源平面存在一个相干涡旋和一个线刀型位错; a 的符号和大小会影响相位分布; b 值越大, 线刀型位错离原点越远. 在源平面处, 空间相同两点的偏振度和椭圆率与光束参数选取无关, 方位角仅与 b 和 σ_{yy} 有关; 空间不同两点的偏振态参量都只与 σ_{xy} 和 σ_{yy} 有关. 在足够远处, 偏振态各自趋于一定值. 传输中, a 的绝对值一定正负不影响偏振态的大小; 随着 b 增大, 偏振态曲线极值次数减小, 突变的次数增加; σ_{xy} 取值不同时, 相同两点偏振态变化的差异主要集中在极值附近, 不同两点偏振态变化的差异主要集中在初值和极值附近; $|\sigma_{xx} - \sigma_{yy}|$ 大小引起了偏振态变化规律的多样性.

关键词: 线刀型-螺旋型混合位错光束, 生物组织, 交叉谱密度, 偏振态

PACS: 41.85.-p, 42.25.Bs, 42.25.Ja, 42.62.Be

DOI: 10.7498/aps.73.20240985

1 引言

随着高选择性激光器的涌现并不断推陈出新, 激光在多种介质中的传输特性受到研究者的广泛关注, 如海洋湍流^[1]、大气湍流^[2]、生物组织湍流^[3]和光学介质^[4]等. 其中, 生物组织是非均匀的复杂介质, 研究光与组织相互作用后的光信息变化, 有助于深入探究生物组织的光学新效应. 王亚伟等^[5]通过非线性吸收产生等离子体的方式, 研究了在生物组织传输中, 飞秒激光脉冲于极小空间产生的化学效应、热效应和机械效应. 研究激光与正常的、病变的组织作用后所呈现的偏振特性, 可为发展生

物医学光子诊断与治疗等技术提供理论依据. 上皮层内肿瘤细胞的细胞核尺寸增大是癌症早期显著的特点之一, 在偏振光谱中表现为病变细胞单次散射光的偏振度也得到提高^[6,7]. 偏振技术以其非接触、蕴含丰富信息和无需染色标记等优势, 被研究者广泛应用于生物检测领域. 张钰新等^[8]依据偏振成像的面部皮肤特征和结构, 提出一种非接触检测方法, 当采用不同的偏振成像模式时, 面部皮肤参量的测量结果存在较大差异, 而精准测量皮肤参数对皮肤学研究意义重大. 因此, 探索激光在生物组织传输中的偏振特性成为当前的研究热点之一.

奇点光束因具有光强为零、相位不确定和螺旋状波前相位结构等特点, 在光通信^[9-12]、生物医学^[13,14]、

* 国家自然科学基金 (批准号: 12204439)、山西省基础研究计划 (批准号: 202203021211192) 和山西省应用基础研究项目 (批准号: 201701D121011) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: meilingduan@nuc.edu.cn

光镊技术^[15-17]等领域发挥了重要作用. 波前相位类型包括刃型位错(线刃型位错和圆刃型位错)、螺旋型位错以及混合位错(螺旋型位错与线刃型位错或圆刃型位错的混合), 以上波前位错都与光束的轨道角动量有关^[18]. 近年来, 研究者们针对各类型波前位错光束的空间传输机理进行了一些研究. Cao等^[19]详细研究了各向异性大气湍流中, 部分相干双曲正弦高斯涡旋光束的平均光强、相干度、偏振度的传输特性. 殷子昂和段美玲^[20]分析了在小鼠真皮组织传输中, 线刃型位错高斯-谢尔模型光束在轴上的偏振态变化及其随初始光束参量的变化关系. Gao等^[21]探究了圆刃型位错光束和圆-线刃型位错光束的传输特性, 发现在自由空间和大气湍流传输中, 圆刃型位错的传输特性可以通过添加线刃型位错进行调控. Gao等^[22]比较了在自由空间和大气湍流中圆刃型-螺旋型混合位错光束的演变规律. Wang等^[23]阐明了完全相干和部分相干的线刃型-螺旋型混合位错光束在大气湍流传输中光强演化的特点. 涡旋光束在生物组织传输中, 正则相干涡旋与非正则相干涡旋对传输特性的影响不同, 目前对于包含非正则相干涡旋的混合位错光束在生物组织中传输特性的研究未见报道.

本文选取非正则相干涡旋和线刃型混合位错光束为研究对象, 推导了其在生物组织传输中的交叉谱密度矩阵元, 研究了在人体真皮组织传输中, 无量纲参数、线刃型位错离轴距离、空间相关长度等光束初始参数对线刃型-螺旋型混合位错光束偏

振特性的影响, 并给予一些物理解释.

2 理论模型

部分相干线刃型-螺旋型混合位错光束在源平面($z=0$)处的 2×2 交叉谱密度矩阵为^[24,25]

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

式中,

$$W_{ij}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, 0) = \langle E_i^*(\mathbf{s}_1, 0) \cdot E_j(\mathbf{s}_2, 0) \rangle, \quad i, j = x, y, \quad (2)$$

其中, E_x 和 E_y 表示在直角坐标系中 x 和 y 方向的电场分量, $*$ 表示复共轭, $\mathbf{s}_l = (s_{lx}, s_{ly})$ ($l=1, 2$)为源平面处的两点位置矢量, $\langle \cdot \rangle$ 为系综平均.

在 $z=0$ 处, 线刃型-螺旋型混合位错光束的场分布为^[26]

$$E(\mathbf{s}, z=0) = \frac{(as_x + is_y)(s_x - b)}{w_0^2} \exp\left(-\frac{s_x^2 + s_y^2}{w_0^2}\right), \quad (3)$$

式中 w_0 为束腰宽度, $\mathbf{s} = (s_x, s_y)$ 为源平面的位置坐标. a 为无量纲参量, 决定相干涡旋的相位分布, $a = \pm 1$ 时, 相位呈线性变化, 表现为正则相干涡旋; $a \neq \pm 1$ 时, 相位呈非线性变化, 表现为非正则相干涡旋. b 为线刃型位错离轴量.

引入谢尔项^[27], 可得部分相干线刃型-螺旋型混合位错光束在 $z=0$ 处交叉密度函数为

$$\begin{aligned} W(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, z=0) &= \frac{1}{w_0^4} (as_{1x} - is_{1y})(s_{1x} - b)(as_{2x} + is_{2y})(s_{2x} - b) \\ &\times \exp\left(-\frac{s_{1x}^2 + s_{1y}^2 + s_{2x}^2 + s_{2y}^2}{w_0^2}\right) \exp\left[-\frac{(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^2}{2\sigma_0}\right], \end{aligned} \quad (4)$$

式中, σ_0 为空间相关长度. $z=0$ 处交叉谱密度矩阵元为

$$\begin{aligned} W_{ij}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, z=0) &= A_i A_j B_{ij} \frac{1}{w_0^4} (as_{1x} - is_{1y})(s_{1x} - b) \exp\left(-\frac{s_{1x}^2 + s_{1y}^2}{w_0^2}\right) (as_{2x} + is_{2y})(s_{2x} - b) \\ &\times \exp\left(-\frac{s_{2x}^2 + s_{2y}^2}{w_0^2}\right) \exp\left[-\frac{(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^2}{2\sigma_{ij}}\right], \end{aligned} \quad (5)$$

式中, A_i 和 A_j 分别表示电场分量 E_i 和 E_j 的振幅; B_{ij} 为光源平面 E_i 和 E_j 之间的相位相关因子;

σ_{xx} 和 σ_{yy} 为空间自相关长度; σ_{xy} 和 σ_{yx} 为空间互相关长度. 在非负正定前提下, 互相关长度需满足

条件^[28]:

$$\frac{A_i^2 \sigma_{xx}^2}{\sigma_{xx}^2 + 4w_0^2} - \frac{2A_i A_j |B_{xy}| \sigma_{xy}^2}{\sigma_{xy}^2 + 4w_0^2} + \frac{A_j^2 \sigma_{yy}^2}{\sigma_{yy}^2 + 4w_0^2} \geq 0, \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_{xx}^2}{\sigma_{xx}^2 + 4w_0^2} - \frac{2\sigma_{xy}^2}{\sigma_{xy}^2 + 4w_0^2} + \frac{\sigma_{yy}^2}{\sigma_{yy}^2 + 4w_0^2} \leq 0. \quad (7)$$

由广义惠更斯-菲涅耳原理^[29], 生物组织传输中部分相干线刃型-螺旋型混合位错光束的交叉谱密度矩阵元为

$$W_{ij}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z) = \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2 \iiint W_{ij}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, z=0) \times \exp\left\{-\frac{ik}{2z}[(\mathbf{s}_1 - \boldsymbol{\rho}_1)^2 - (\mathbf{s}_2 - \boldsymbol{\rho}_2)^2]\right\} \times \langle \exp[\psi^*(\boldsymbol{\rho}_1, \mathbf{s}_1) + \psi(\boldsymbol{\rho}_2, \mathbf{s}_2)] \rangle d\mathbf{s}_1 d\mathbf{s}_2, \quad (8)$$

其中, 波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, $\boldsymbol{\rho}_1$ 和 $\boldsymbol{\rho}_2$ 是 z 处横平面的两矢量. $\langle \cdot \rangle$ 表示湍流介质扰动引起的相位起伏, 其表达式为

$$\langle \exp[\psi^*(\boldsymbol{\rho}_1, \mathbf{s}_1) + \psi(\boldsymbol{\rho}_2, \mathbf{s}_2)] \rangle \cong \exp\left(-4\pi^2 k^2 z \int_0^1 dt \int_0^\infty dk k \Phi(k) \times \left\{1 - J_0[|t(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2) + (1-t)(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)|k]\right\}\right), \quad (9)$$

$$\Phi(\kappa) = \frac{4\pi \langle \delta n^2 \rangle L_0^2 (\zeta - 1)}{(1 + \kappa^2 L_0^2)^\zeta} \quad (10)$$

是哺乳动物组织的折射率功率谱, 其中 ζ 与生物组织分形维数有关, κ 为谱空间频率. 零阶贝塞尔函数表达式为

$$J_0(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m (x/2)^{2m}}{(m!)^2}, \quad |x| < \infty, \quad (11)$$

取前两项作为近似值, 可将 (9) 式简写为

$$\langle \exp[\psi^*(\boldsymbol{\rho}_1, \mathbf{s}_1) + \psi(\boldsymbol{\rho}_2, \mathbf{s}_2)] \rangle \cong \exp\left[-\frac{(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^2 + (\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2)^2 + (\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2)}{\rho_0^2}\right], \quad (12)$$

式中, Ψ 为扰动介质的折射率功率谱; $\rho_0 = 0.22 \times (C_n^2 k^2 z)^{-1/2}$ 表示在生物组织传输中的相关长度, C_n^2 是生物组织的折射率结构常数, 表达式为

$$C_n^2 = \frac{\langle \delta n^2 \rangle}{L_0^2 (2 - \zeta)}, \quad (13)$$

L_0 为折射率的外形尺寸, $\langle \delta n^2 \rangle$ 为折射率的均方.

把 (5) 式和 (12) 式代入 (8) 式, 利用积分公式^[30]:

$$\int x^n \exp(-px^2 + 2qx) dx = n! \exp\left(\frac{q^2}{p}\right) \sqrt{\frac{\pi}{p}} \left(\frac{q}{p}\right)^n \times \sum_{k=0}^{E[n/2]} \frac{1}{(n-2k)!k!} \left(\frac{p}{4q^2}\right)^k, \quad n=0, 1, 2, \dots, \quad (14)$$

式中 $E[n/2]$ 表示对 $n/2$ 向下取整. 则 (8) 式可写为

$$W_{ij} = A_i A_j B_{ij} \frac{1}{w_0^4} \left(\frac{ik}{2\pi z}\right)^2 \exp\left[-\frac{(\rho_{1x} - \rho_{2x})^2 + (\rho_{1y} - \rho_{2y})^2}{\rho_0^2}\right] \times \exp\left[-\frac{ik}{2z}(\rho_{1x}^2 + \rho_{1y}^2 - \rho_{2x}^2 - \rho_{2y}^2)\right] \sum_{n=1}^4 M_{nij}, \quad (15)$$

其中,

$$M_{1ij} = -\frac{1}{2} b \pi^2 (A_{ij} C_{ij} F_{ij}^3 H_{ij}^3)^{-1/2} I_{ijy} [i a F_{ij}^{-1} (F_{ij} + 2G_{ijx}^2) + \pi^{1/2} D_y H_{ij}^{-1/2} G_{ijx} L_{ij} C_{ij}^{-2} (H_{ij} + 2I_{ijy}^2)] \exp\left(\frac{B_x^2}{A_{ij}} + \frac{D_y^2}{C_{ij}} + \frac{G_{ijx}^2}{F_{ij}} + \frac{I_{ijy}^2}{H_{ij}}\right) + \frac{1}{2} i a \pi^2 I_{ijy} (A_{ij}^3 C_{ij} F_{ij}^7 H_{ij}^3)^{-1/2} [B_x F_{ij}^2 + 2G_{ijx}^3 L_{ij} + F_{ij} G_{ijx} (2B_x G_{ijx} + 3L_{ij})] \times \exp\left(\frac{B_x^2}{A_{ij}} + \frac{D_y^2}{C_{ij}} + \frac{G_{ijx}^2}{F_{ij}} + \frac{I_{ijy}^2}{H_{ij}}\right) + b^2 \pi^2 (A_{ij} C_{ij} F_{ij} H_{ij}^3)^{-1/2} \left\{ i a F_{ij}^{-1} G_{ijx} I_{ijy} + (2C_{ij} H_{ij})^{-1} [2I_{ijy}^2 L_{ij} + H_{ij} (2D_y I_{ijy} + L_{ij})] \right\} \exp\left(\frac{B_x^2}{A_{ij}} + \frac{D_y^2}{C_{ij}} + \frac{G_{ijx}^2}{F_{ij}} + \frac{I_{ijy}^2}{H_{ij}}\right), \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 M_{2ij} = & \frac{1}{2} ab \pi^2 (A_{ij} C_{ij}^3 F_{ij} H_{ij}^5)^{-1/2} (ab + i F_{ij}^{-1} G_{ijy}) [2I_{ijx}^2 L_{ij} + H_{ij} (2D_x I_{ijx} + L_{ij})] \\
 & \times \exp \left(\frac{B_y^2}{A_{ij}} + \frac{D_x^2}{C_{ij}} + \frac{G_{ijy}^2}{F_{ij}} + \frac{I_{ijx}^2}{H_{ij}} \right) - \frac{1}{2} a \pi^2 (A_{ij} C_{ij}^3 F_{ij} H_{ij}^7)^{-1/2} (ab + i F_{ij}^{-1} G_{ijy}) \\
 & \times [D_x H_{ij}^2 + 2I_{ijx}^3 L_{ij} + H_{ij} I_{ijx} (2D_x I_{ijx} + 3L_{ij})] \exp \left(\frac{B_y^2}{A_{ij}} + \frac{D_x^2}{C_{ij}} + \frac{G_{ijy}^2}{F_{ij}} + \frac{I_{ijx}^2}{H_{ij}} \right) \\
 & + \frac{1}{4} a^2 \pi^2 (A_{ij} C_{ij}^5 F_{ij} H_{ij}^9)^{-1/2} \{ H_{ij}^3 (2D_x^2 + C_{ij}) + 4H_{ij} I_{ijx}^2 L_{ij} (2D_x I_{ijx} + 3L_{ij}) \\
 & + 4I_{ijx}^4 L_{ij}^2 + H_{ij}^2 [2I_{ijx}^2 (2D_x^2 + C_{ij}) + 12D_x I_{ijx} L_{ij} + 3L_{ij}^2] \} \\
 & \times \exp \left(\frac{B_y^2}{A_{ij}} + \frac{D_x^2}{C_{ij}} + \frac{G_{ijy}^2}{F_{ij}} + \frac{I_{ijx}^2}{H_{ij}} \right) + iab \pi^2 G_{ijy} (A_{ij} C_{ij} F_{ij}^3 H_{ij}^3)^{-1/2} \\
 & \times [-b I_{ijx} + (2H_{ij})^{-1} (H_{ij} + 2I_{ijx}^2)] \exp \left(\frac{B_y^2}{A_{ij}} + \frac{D_x^2}{C_{ij}} + \frac{G_{ijy}^2}{F_{ij}} + \frac{I_{ijx}^2}{H_{ij}} \right), \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{3ij} = & (2C_{ij}^2 H_{ij}^4)^{-1} \pi^2 \{ (2C_{ij} H_{ij})^{-1} [2I_{ijx}^2 L_{ij} + H_{ij} (2D_x I_{ijx} + L_{ij})] [2I_{ijy}^2 L_{ij} + H_{ij} (2D_y I_{ijy} + L_{ij})] \\
 & - iab I_{ijy} [2I_{ijx}^2 L_{ij} + H_{ij} (2D_x I_{ijx} + L_{ij})] - b I_{ijx} [2I_{ijy}^2 L_{ij} + H_{ij} (2D_y I_{ijy} + L_{ij})] \} \\
 & \times \exp \left[\frac{H_{ij} (D_x^2 + D_y^2) + C_{ij} (I_{ijx}^2 + I_{ijy}^2)}{C_{ij} H_{ij}} \right], \quad (18)
 \end{aligned}$$

$$M_{4ij} = -\frac{1}{2} a^2 b \pi^2 A_{ij}^{-2} F_{ij}^{-4} [B_x F_{ij}^2 + 2G_{ijx}^3 L_{ij} + F_{ij} G_{ijx} (2B_x G_{ijx} + 3L_{ij})] \exp \left[\frac{F_{ij} (B_x^2 + B_y^2) + A_{ij} (G_{ijx}^2 + G_{ijy}^2)}{A_{ij} F_{ij}} \right], \quad (19)$$

$$A_{ij} = \frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\rho_0^2} - \frac{ik}{2z} + \frac{1}{2\sigma_{ij}^2}, \quad (20)$$

$$B_x = -\frac{ik\rho_{2x}}{2z} + \frac{1}{2\rho_0^2} (\rho_{1x} - \rho_{2x}), \quad (21)$$

$$C_{ij} = \frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\rho_0^2} + \frac{ik}{2z} + \frac{1}{2\sigma_{ij}^2}, \quad (22)$$

$$D_x = \frac{ik\rho_{1x}}{2z} - \frac{1}{2\rho_0^2} (\rho_{1x} - \rho_{2x}), \quad (23)$$

$$F_{ij} = C_{ij} - \frac{L_{ij}^2}{A_{ij}}, \quad (24)$$

$$G_{ijx} = D_x + \frac{B_x L_{ij}}{A_{ij}}, \quad (25)$$

$$H_{ij} = A_{ij} - \frac{L_{ij}^2}{C_{ij}}, \quad (26)$$

$$I_{ijx} = B_x + \frac{D_x L_{ij}}{C_{ij}}, \quad (27)$$

$$L_{ij} = \frac{1}{\rho_0^2} + \frac{1}{2\sigma_{ij}^2}. \quad (28)$$

由对称性, 将 B_x , D_x , G_{ijx} 和 I_{ijx} 中的 x 换成 y 分别可以得到 B_y , D_y , G_{ijy} 和 I_{ijy} . 同理, 根据广义惠更斯-菲涅耳原理^[29], 由 (12) 式和 (4) 式可得生物组织传输中部分相干线刃型-螺旋型混合位错光束的交叉谱密度函数为

$$\begin{aligned}
 W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z) = & \frac{1}{w_0^4} \left(\frac{ik}{2\pi z} \right)^2 \exp \left[-\frac{(\rho_{1x} - \rho_{2x})^2 + (\rho_{1y} - \rho_{2y})^2}{\rho_0^2} \right] \\
 & \times \exp \left[-\frac{ik}{2z} (\rho_{1x}^2 + \rho_{1y}^2 - \rho_{2x}^2 - \rho_{2y}^2) \right] \sum_{n=1}^4 M_n, \quad (29)
 \end{aligned}$$

式中, M_1 , M_2 , M_3 , M_4 可由 (16) 式—(19) 式得到.

光束传输的平均光强可表示为

$$I(\boldsymbol{\rho}, L) = W(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, z). \quad (30)$$

归一化光强为

$$I_N = \frac{I(\boldsymbol{\rho}_i, z)}{I(\boldsymbol{\rho}_i, z)_{\max}}, \quad (31)$$

其中, $I(\rho_i, z)$ ($i = 1, 2$) 表示点 (ρ_i, z) 处光强, $I(\rho_i, z)_{\max}$ 表示其最大值.

光谱相干度为^[31]

$$\mu(\rho_1, \rho_2, z) = \frac{W(\rho_1, \rho_2, z)}{[I(\rho_1, z)I(\rho_2, z)]^{1/2}}. \quad (32)$$

相干涡旋出现时, 某点光谱相干度等于 0, 即该点光谱相干度的实部和虚部都为 0. 可用如下方程组表示为

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[\mu(\rho_1, \rho_2, z)] &= 0, \\ \operatorname{Im}[\mu(\rho_1, \rho_2, z)] &= 0. \end{aligned} \quad (33)$$

其中 $\operatorname{Re}[\cdot]$ 和 $\operatorname{Im}[\cdot]$ 分别为复数的实部、虚部. 由符号法则^[32]可知, 相干涡旋的相位沿逆时针方向递增, 则拓扑荷为正, 反之为负; 相位改变 $2m\pi$, 则拓扑荷大小为 $|m|$. 根据 (29) 式—(33) 式, 可分析光

束的光强和相位分布.

描述光束偏振态的 3 个参量 (交叉偏振度、方位角、椭圆率)^[33] 分别为

$$P(\rho_1, \rho_2, z) = \sqrt{1 - \frac{4\operatorname{Det}W(\rho_1, \rho_2, z)}{[\operatorname{Tr}W(\rho_1, \rho_2, z)]^2}}, \quad P \geq 0, \quad (34)$$

$$\theta(\rho_1, \rho_2, z) =$$

$$\frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\operatorname{Re}[W_{xy}(\rho_1, \rho_2, z)]}{W_{xx}(\rho_1, \rho_2, z) - W_{yy}(\rho_1, \rho_2, z)} \right), \quad (35)$$

$$\varepsilon(\rho_1, \rho_2, z) = A_{\min}/A_{\max}, \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1. \quad (36)$$

其中, Tr 和 Det 分别表示矩阵迹和秩的运算, $A_{\min}$ 和 $A_{\max}$ 分别表示偏振椭圆的短半轴和长半轴:

$$A_{\min}^2(\rho_1, \rho_2, z) = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(W_{xx} - W_{yy})^2 + 4|W_{xy}|^2} - \sqrt{(W_{xx} - W_{yy})^2 + 4|\operatorname{Re}W_{xy}|^2} \right], \quad (37)$$

$$A_{\max}^2(\rho_1, \rho_2, z) = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(W_{xx} - W_{yy})^2 + 4|W_{xy}|^2} + \sqrt{(W_{xx} - W_{yy})^2 + 4|\operatorname{Re}W_{xy}|^2} \right]. \quad (38)$$

交叉偏振度描述光场中两场点间的关联起伏, 当 $\rho_1 = \rho_2$ 时, 交叉偏振度变为传统的单点偏振度. 可根据 (34) 式—(36) 式计算分析光束在人体真皮组织传输中的偏振行为.

3 数值计算与分析

3.1 源平面归一化光强分布

线刃型-螺旋型混合位错光束是线刃型位错和螺旋型位错的混合光束, 当参数 a 和 b 取值不同时, 源平面处的归一化光强分布如图 1 和图 2 所示. 基本计算参数为 $w_0 = 2 \mu\text{m}$, $a = 2$, $b = 1 \mu\text{m}$,

$\sigma_0 = 1 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$. 由图 1 可知, 混合位错光束的光强为非轴对称分布, 分为主峰和次峰. 由图 1(a), (b) 可知, a 的绝对值相同, 正负不影响光强分布; 由图 1(b)—(d) 可知, 光强分布的差异主要在于主峰分布, a 的绝对值越大, 主峰越圆润. 由图 2 可知, b 值越大, 次峰越低.

3.2 源平面相位分布

当参数 a 和 b 取值不同时, 源平面相位分布如图 3 和图 4 所示. 基本计算参数同图 1 和图 2. 由图 3 可知, 混合位错光束在源平面处存在一个相干涡旋和一个线刃型位错; 相干涡旋在坐标原点处,

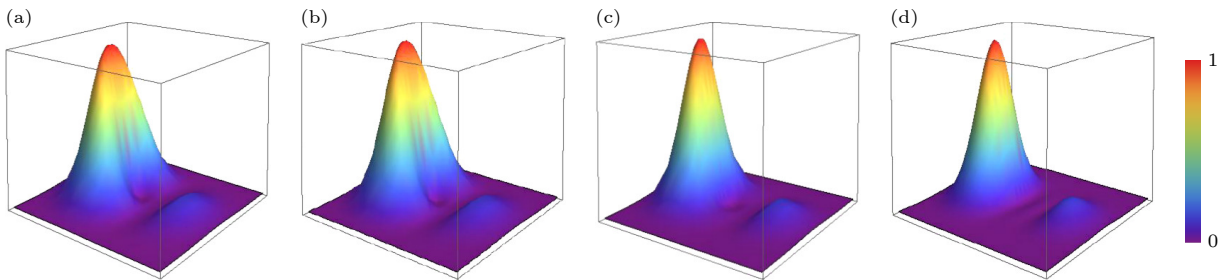


图 1 a 不同时归一化光强分布 (a) $a = -1$; (b) $a = 1$; (c) $a = 2$; (d) $a = 5$

Fig. 1. Normalized light intensity distribution for different a values: (a) $a = -1$; (b) $a = 1$; (c) $a = 2$; (d) $a = 5$.

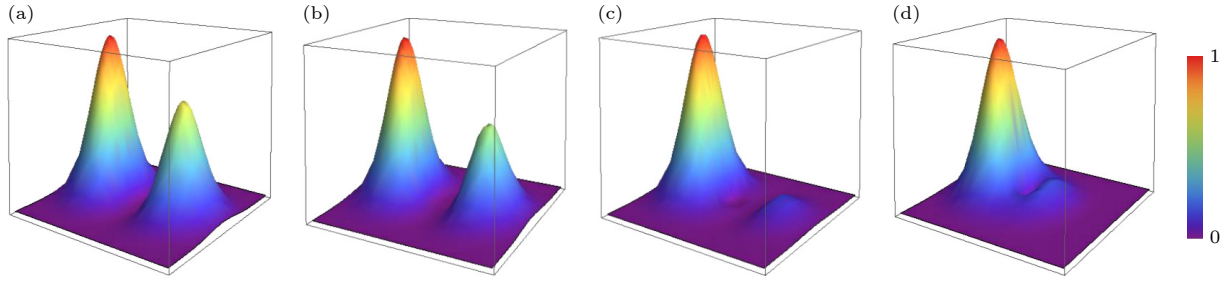

 图 2 b 不同时归一化光强分布 (a) $b = 0.2 \mu\text{m}$; (b) $b = 0.3 \mu\text{m}$; (c) $b = 1 \mu\text{m}$; (d) $b = 3 \mu\text{m}$

Fig. 2. Normalized light intensity distribution for different b values: (a) $b = 0.2 \mu\text{m}$; (b) $b = 0.3 \mu\text{m}$; (c) $b = 1 \mu\text{m}$; (d) $b = 3 \mu\text{m}$.

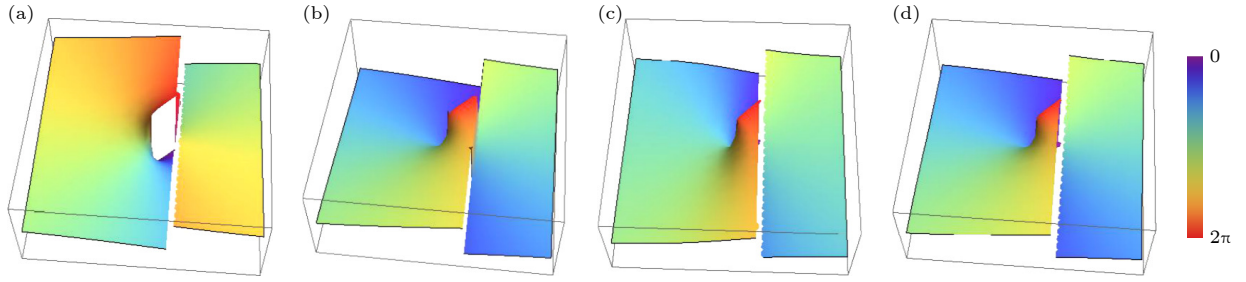

 图 3 a 不同时相位分布 (a) $a = -1$; (b) $a = 1$; (c) $a = 2$; (d) $a = 5$

Fig. 3. Phase distribution for different a values: (a) $a = -1$; (b) $a = 1$; (c) $a = 2$; (d) $a = 5$.

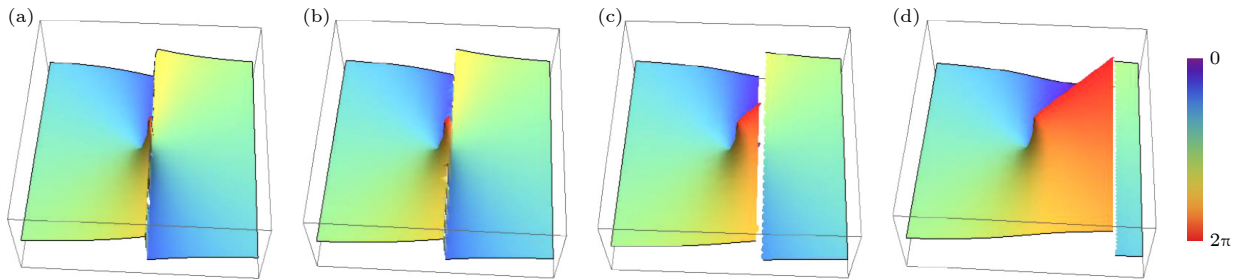

 图 4 b 不同时相位分布 (a) $b = 0.2 \mu\text{m}$; (b) $b = 0.3 \mu\text{m}$; (c) $b = 1 \mu\text{m}$; (d) $b = 3 \mu\text{m}$

Fig. 4. Phase distribution for different b values: (a) $b = 0.2 \mu\text{m}$; (b) $b = 0.3 \mu\text{m}$; (c) $b = 1 \mu\text{m}$; (d) $b = 3 \mu\text{m}$.

$a > 0$ 时, 拓扑荷为+1, $a < 0$ 时, 拓扑荷为-1; 当 $a \neq \pm 1$ 时, 相位变化是非线性的. 由图 3(b)—(d)可知, 相比 $a = 1$, $a = 2$ 或 5 时原点附近的相位色彩呈现出显著的非均匀分布. 与 $a \neq \pm 1$ 时, 相位变化呈非线性变化一致. 由图 4 可知, b 值越大, 线刃型位错距离原点越远.

3.3 偏振态变化

光的偏振是光场中重要的统计参量之一, 加之正常组织与病化组织的微观结构不同, 可通过分析生物组织传输中偏振态的变化来表征生物组织的结构, 从而判断组织的病理状态^[34]. 本节研究部分相干线刃型-螺旋型混合位错光束在人体真皮组织传输中相同两点偏振态 (偏振度 $P(\rho, \rho, z)$ 、方位角 $\theta(\rho, \rho, z)$ 、椭圆率 $\varepsilon(\rho, \rho, z)$) 和不同两点偏振

态 (偏振度 $P(\rho, -\rho, z)$ 、方位角 $\theta(\rho, -\rho, z)$ 、椭圆率 $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$) 随传输距离 z 的变化, 以及光束参数的选取对偏振态变化的影响.

3.3.1 无量纲参数 a

图 5—图 7 分别给出不同无量纲参数 a 的混合位错光束在人体真皮组织传输中, 光束偏振态数值随传输距离 z 的变化. 计算参数为 $b = 1$, $w_0 = 2 \mu\text{m}$, $A_x = A_y = (0.5)^{1/2}$, $B_{xx} = B_{yy} = 1$, $B_{xy} = B_{yx}^* = 0.3 \exp(i\pi/3)$, $\sigma_{xx} = 0.15 \mu\text{m}$, $\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = 0.25 \mu\text{m}$, $\sigma_{yy} = 0.225 \mu\text{m}$, $\rho = (0.1 \mu\text{m}, 0)$, $C_n^2 = 0.44 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$.

由图 5 可知, 在源平面处, 不同 a 值的光束偏振态数值相同; 传输中, 二者各自达到了两次极小和两次极大; 最终 $P(\rho, \rho, z)$ 趋于一大于其初始

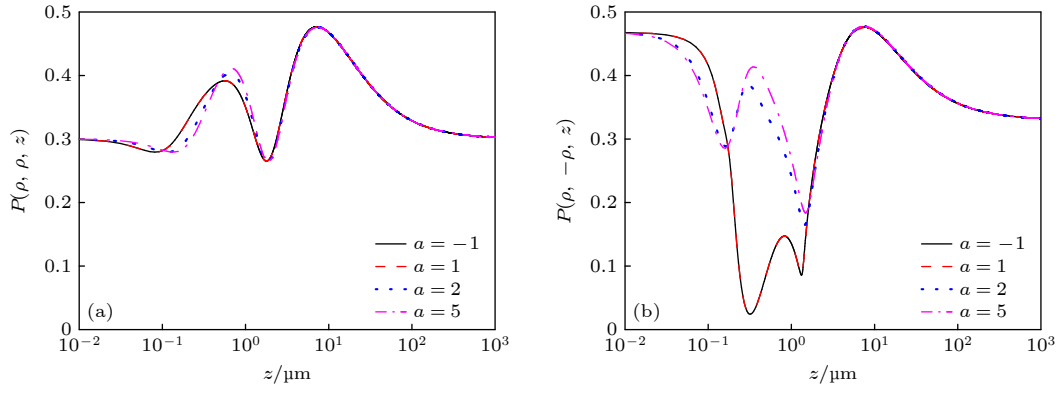

 图 5 a 不同时偏振度随 z 的变化 (a) $P(\rho, \rho, z)$; (b) $P(\rho, -\rho, z)$

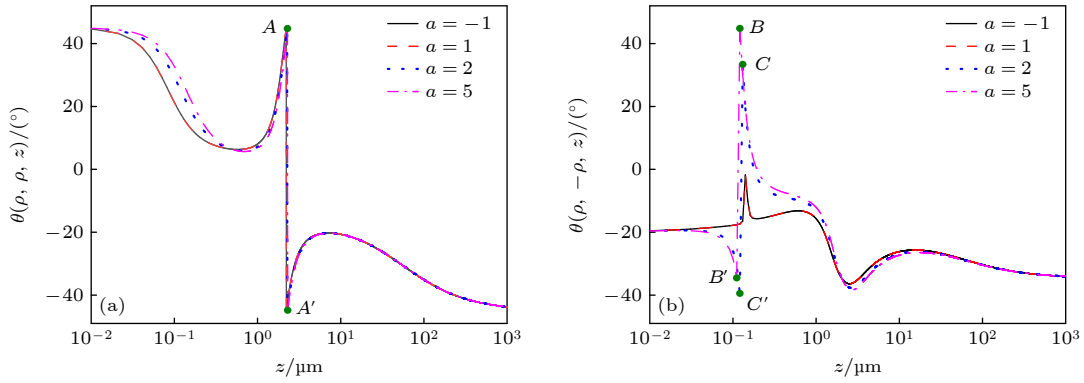
 Fig. 5. Variation of polarization degree with z for different a : (a) $P(\rho, \rho, z)$; (b) $P(\rho, -\rho, z)$.

 图 6 a 不同时方位角随 z 的变化 (a) $\theta(\rho, \rho, z)$; (b) $\theta(\rho, -\rho, z)$

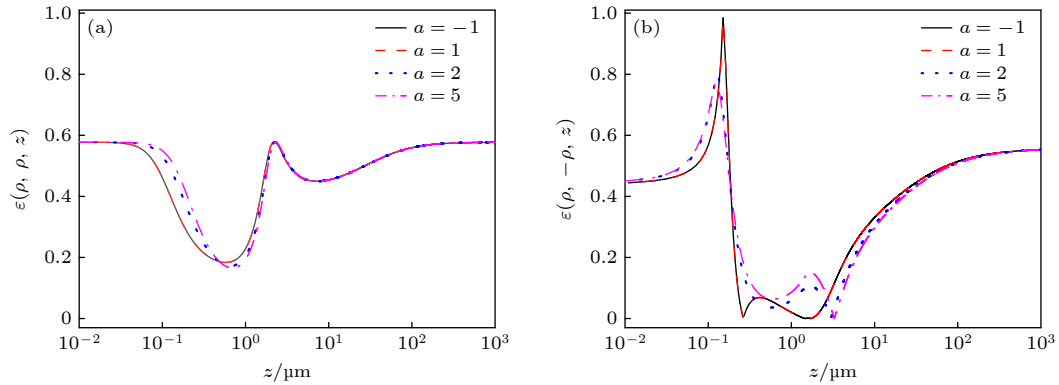
 Fig. 6. Variation of orientation angle with z for different a : (a) $\theta(\rho, \rho, z)$; (b) $\theta(\rho, -\rho, z)$.

 图 7 a 不同时椭圆率随 z 的变化 (a) $\varepsilon(\rho, \rho, z)$; (b) $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$

 Fig. 7. Variation of ellipticity with z when a is different: (a) $\varepsilon(\rho, \rho, z)$; (b) $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$.

值的定值, $P(\rho, -\rho, z)$ 趋于一小于其初始值的定值. 当 $a = -1$ 和 $a = 1$ 时, 两 $P(\rho, \rho, z)$ 曲线重合, $P(\rho, -\rho, z)$ 也一样; 而 a 的绝对值不同时, 偏振度的变化趋势相似, 大小的差异主要集中在生物组织浅处; a 的绝对值较大时, $P(\rho, \rho, z)$ 的两极小值或两极大值间距减小, $P(\rho, -\rho, z)$ 的两极小值间距增大.

由图 6(a) 可知, $\theta(\rho, \rho, z)$ 初始值为正, 传输中先减小后增大, 再由正的极大值突变为负的极小值, 之后又增大, 最终减小到一负的定值. $\theta(\rho, \rho, z)$ 的突变位置都约为 $z = 2.27 \mu\text{m}$, 突变量都约为 $|AA'| = 89.6^\circ$. 由图 6(b) 可知, $\theta(\rho, -\rho, z)$ 初始值为负, 最终趋于一小于初值且为负的定值. 传输中 $\theta(\rho, -\rho, z)$ 的突变量随 a 绝对值的减小而减小, 而

突变位置逐渐远离. 如 $a = 5$ 时, 在 $z = 0.12 \mu\text{m}$ 处有突变量 $|BB'| = 79.6^\circ$; $a = 2$ 时, 在 $z = 0.13 \mu\text{m}$ 处有突变量 $|CC'| = 72.8^\circ$; 当 $a = \pm 1$, 突变趋于消失. 比较图 6(a), (b) 可知, 传输中 $\theta(\rho, -\rho, z)$ 受到 a 取值不同的影响比 $\theta(\rho, \rho, z)$ 更强烈.

由图 7 可知, 传输中 $\varepsilon(\rho, \rho, z)$ 先减小后增大, $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$ 先增大后减小, 后者的起伏变化相较前者更复杂. a 的取值对两者的影响不同, $\varepsilon(\rho, \rho, z)$ 的差别在于达到极大值之前, a 值增大, 变化滞后, 极小值减小; $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$ 的差别在于最终趋于定值之前, a 值增大, 两极大值间距增大, 达到极小值的位置滞后.

综上所述, a 的绝对值相同, 正负不影响上述偏振态的变化, 这可由 (34) 式—(36) 式得证. 由此可知, 光束拓扑荷的大小一定, 正负对偏振态的变化无影响. 这可能缘于螺旋型位错光束的相位分布为围绕奇点的螺旋形结构, 当仅旋转方向相反时, 具有旋转对称性, 偏振态的变化行为具有对称性.

3.3.2 线刃型位错离轴距离 b

图 8—图 10 为不同位错离轴距离 b 的混合位错光束在人体真皮组织传输中, 光束偏振态数值随传输距离 z 的变化. 计算参数为 $a = 2$, 其他同图 5.

由图 8 可知, $P(\rho, \rho, z)$ 和 $P(\rho, -\rho, z)$ 的初始值与 b 无关, 传输中前者先小幅增大再减小, 后者先减小再增大, 且当离轴距离增大时两者达到极值数量趋于减小. 比如 $b = 0.2 \mu\text{m}$ 和 $0.3 \mu\text{m}$ 时有 5 次极值; $b = 1 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$ 时 $P(\rho, \rho, z)$ 接近 4 次极值, $P(\rho, -\rho, z)$ 有 4 次极值. 此外, 极值大小也与 b 值有关, 以 $z = 1 \mu\text{m}$ 之前的极大值为例, b 值越小, $P(\rho, \rho, z)$ 越大, $P(\rho, -\rho, z)$ 越小; b 值越大, $P(\rho, \rho, z)$ 越小, $P(\rho, -\rho, z)$ 越大. 总之, 离轴距离增大, 传输中光束偏振度的起伏变化将减弱.

由图 9(a) 可知, 随着 b 增大, $\theta(\rho, \rho, z)$ 初始值将由负转为正, 传输中发生突变的次数将由两次减为一次. 由图 9(b) 可知, $\theta(\rho, -\rho, z)$ 的初始值为负值, 传输中较小 b 时连续变化, 较大 b 时经历一次突变, 且突变位置临近较小 b 时第一次达到极小

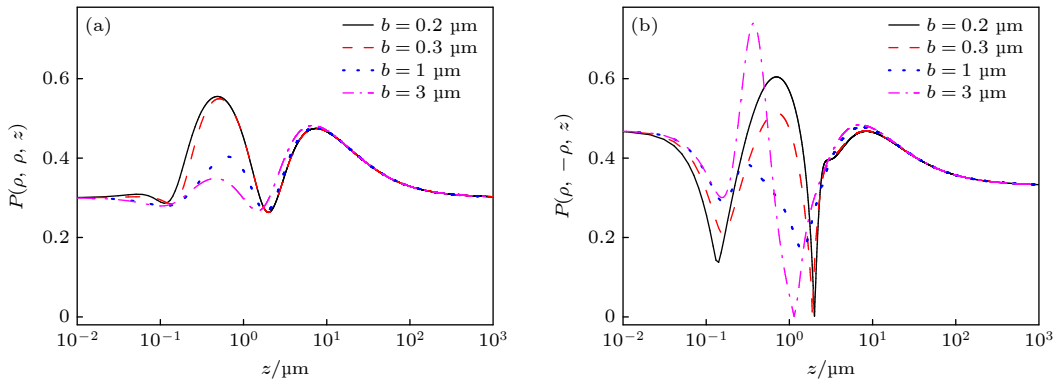


图 8 b 不同时偏振度随 z 的变化 (a) $P(\rho, \rho, z)$; (b) $P(\rho, -\rho, z)$

Fig. 8. Variation of polarization degree with z for different b : (a) $P(\rho, \rho, z)$; (b) $P(\rho, -\rho, z)$.

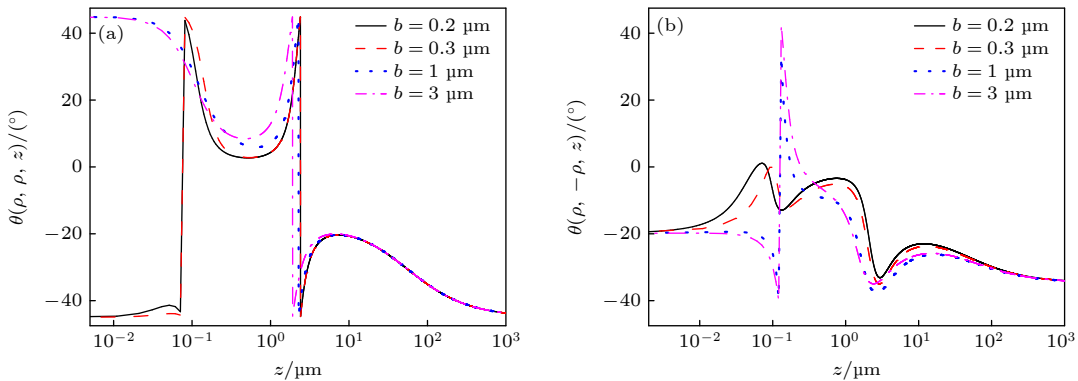


图 9 b 不同时方位角随 z 的变化 (a) $\theta(\rho, \rho, z)$; (b) $\theta(\rho, -\rho, z)$

Fig. 9. Variation of orientation angle with z for different b : (a) $\theta(\rho, \rho, z)$; (b) $\theta(\rho, -\rho, z)$.

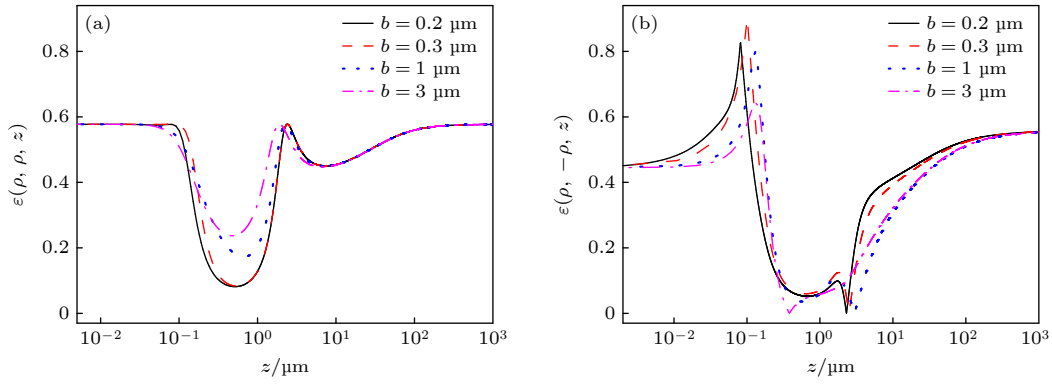


图 10 b 不同时椭圆率 ε 随 z 的变化 (a) $\varepsilon(\rho, \rho, z)$; (b) $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$
Fig. 10. Variation of ellipticity with z for different b : (a) $\varepsilon(\rho, \rho, z)$; (b) $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$.

时. 此外, b 相同时, 由于空间两点位置不同, 光场关联作用不同, $\theta(\rho, \rho, z)$ 和 $\theta(\rho, -\rho, z)$ 的初始值不同, 传输中二者变化趋势与幅度也不同.

由图 10(a) 可知, b 值较小时, $\varepsilon(\rho, \rho, z)$ 达到两次极大和极小; b 值较大时, $\varepsilon(\rho, \rho, z)$ 达到一次极大两次极小, 且 b 值越大, 达到极值越早. 由图 10(b) 可知, 相比 b 值较小的情况, b 值较大的 $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$ 变化曲线更加光滑.

总之, 线刃型位错离轴距离大小对传输中相同两点和不同两点的光束偏振态起伏变化的影响显著. 这可能缘于离轴距离较小时, 线刃型位错傍轴, 对传输中光束偏振态变化的影响占主导; 离轴距离较大时, 线刃型-螺旋型混合位错光束偏振态的变化将趋于螺旋型光束的变化规律.

3.3.3 空间互相关长度 σ_{xy}

图 11—图 13 是不同空间互相关长度 σ_{xy} 的部分相干混合位错光束在人体真皮组织传输中, 光束偏振态数值随传输距离 z 的变化. 计算参数为 $a = 2$,

其他同图 5.

由图 11 可知, 在源平面处, $P(\rho, \rho, z)$ 与 σ_{xy} 取值无关; σ_{xy} 越大, $P(\rho, -\rho, z)$ 越大; σ_{xy} 相同, $P(\rho, -\rho, z)$ 值更大. 传输中, 二者变化趋势相同, 起始时 $P(\rho, \rho, z)$ 缓缓减小, $P(\rho, -\rho, z)$ 较快减小; σ_{xy} 越大, 前者前 3 个极值越小, 最后一个极值越大; 后者两边两个极值越大, 中间两个极值越小. 最终, $P(\rho, \rho, z)$ 趋于接近其初始值的定值, $P(\rho, -\rho, z)$ 趋于小于其初始值的定值.

由图 12 可知, 在源处, $\theta(\rho, \rho, z)$ 为正, $\theta(\rho, -\rho, z)$ 为负; σ_{xy} 相同, 前者绝对值大于后者; σ_{xy} 取值不同, 几乎不影响 $\theta(\rho, \rho, z)$ 的初值; 增大 σ_{xy} , $\theta(\rho, -\rho, z)$ 的绝对值有小幅增大. 紧接着, $\theta(\rho, \rho, z)$ 减小到极小又增大, 而后由正的极大突变为负, 再继续增大到极大, 最终减小为一负的绝对值接近初始时的定值; 而 $\theta(\rho, -\rho, z)$ 将初值稳定一段距离后较快减小, 而后由负的极小突变为正, 再继续时而快速时而平缓地减小到极小, 最终趋于一小于初值的定值.

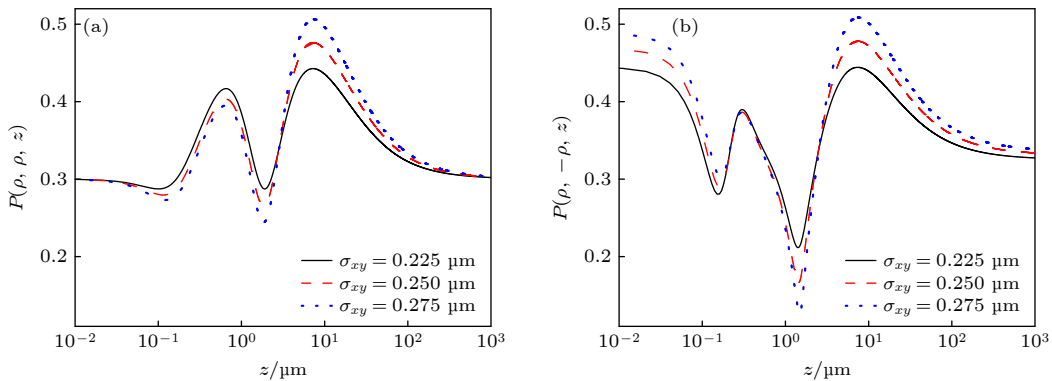


图 11 σ_{xy} 不同时偏振度随 z 的变化 (a) $P(\rho, \rho, z)$; (b) $P(\rho, -\rho, z)$
Fig. 11. Polarization degree vs. z for different σ_{xy} : (a) $P(\rho, \rho, z)$; (b) $P(\rho, -\rho, z)$.

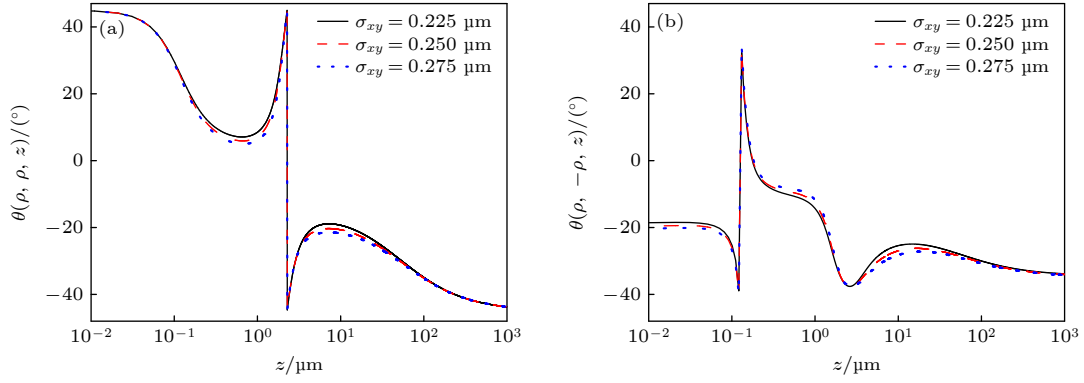


图 12 σ_{xy} 不同时方位角随 z 的变化 (a) $\theta(\rho, \rho, z)$; (b) $\theta(\rho, -\rho, z)$
Fig. 12. Orientation angle vs. z for different σ_{xy} : (a) $\theta(\rho, \rho, z)$; (b) $\theta(\rho, -\rho, z)$.

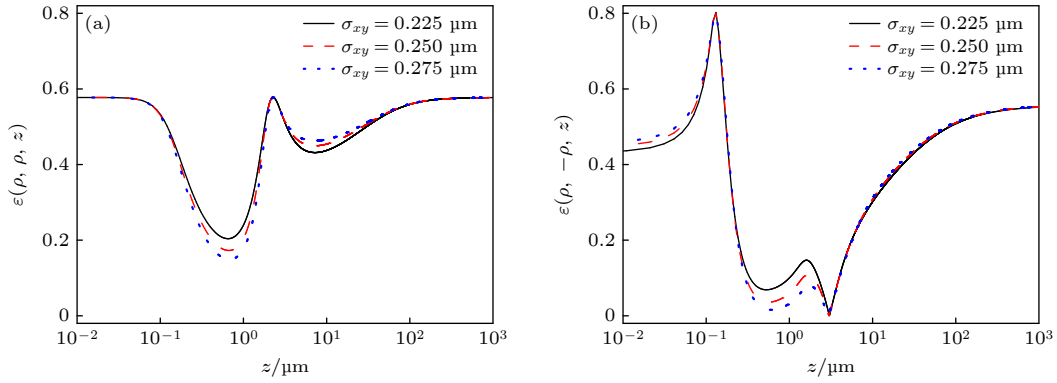


图 13 σ_{xy} 不同时椭圆率随 z 的变化 (a) $\varepsilon(\rho, \rho, z)$; (b) $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$
Fig. 13. Ellipticity vs. z for different σ_{xy} : (a) $\varepsilon(\rho, \rho, z)$; (b) $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$.

由图 13 可知, σ_{xy} 取值不影响 $\varepsilon(\rho, \rho, z)$ 的初值, 而 $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$ 的初值与 σ_{xy} 取值呈单调递增关系. 传输中两者变化趋势不同, $\varepsilon(\rho, \rho, z)$ 先减小, $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$ 先增大; 在各自达到稳定之前, 后者较前者有更多的起伏变化, 图 13(a) 显示 $\varepsilon(\rho, \rho, z)$ 达到一次极大两次极小, 图 13(b) 显示 $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$ 达到两次极大两次极小; 由 σ_{xy} 取值不同引起的两者变化差异主要集中在各自的极值附近.

综合图 11—图 13 可见, 空间自相关长度 σ_{xy} 取值对部分相干线刃型-螺旋型混合位错光束不同两点偏振态的影响更显著. 传输中, 由 σ_{xy} 取值不同引起的相同两点偏振态的变化差异主要集中在各自的极值附近; 不同两点偏振态的变化差异主要集中在初值和各自的极值附近.

3.3.4 空间自相关长度 σ_{yy}

图 14—图 16 是不同空间自相关长度 σ_{yy} 的部分相干混合位错光束在人体真皮组织传输中, 光束偏振态数值随传输距离 z 的变化. 计算参数为 $a = 2$,

其他同图 5.

由图 14(a), (b) 可知, 在源平面, 不同 σ_{yy} 的光束, $P(\rho, \rho, z)$ 大小相同, $P(\rho, -\rho, z)$ 大小取决于空间自相关长度 σ_{xx} 和 σ_{yy} 的差值, $|\sigma_{xx} - \sigma_{yy}|$ 越大, $P(\rho, -\rho, z)$ 越大; 相比 $\sigma_{xx} < \sigma_{yy}$ 的情况, $\sigma_{xx} \geq \sigma_{yy}$ 时的 $P(\rho, -\rho, z)$ 值更大; 最终 $P(\rho, \rho, z)$ 趋于一定值, $P(\rho, -\rho, z)$ 趋于的定值大小与 σ_{yy} 的依赖关系为单调递减. 传输中, $P(\rho, \rho, z)$ 和 $P(\rho, -\rho, z)$ 的变化趋势相似, 差别在于变化幅度不同; 在组织浅处, 两者变化只与 $|\sigma_{xx} - \sigma_{yy}|$ 大小有关, 比如 $P(\rho, \rho, z)$ 在 $0 < z < 3 \mu\text{m}$ 的变化和 $P(\rho, -\rho, z)$ 在 $0.1 \mu\text{m} < z < 2.5 \mu\text{m}$ 的变化; 在稍深处, 两者大小与 $(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})$ 的正负有关, $\sigma_{xx} \geq \sigma_{yy}$ 时的两者值相比 $\sigma_{xx} < \sigma_{yy}$ 时的更大, 且 $|\sigma_{xx} - \sigma_{yy}|$ 越大, 两者值越大.

由图 15 可知, $\theta(\rho, \rho, z)$ 和 $\theta(\rho, -\rho, z)$ 的大小及变化趋势与 $(\sigma_{yy} - \sigma_{xx})$ 有关. 在源平面, 当 $\sigma_{yy} < \sigma_{xx}$ 时, $\theta(\rho, \rho, z) < 0$, $\theta(\rho, -\rho, z) > 0$; 反之, $\theta(\rho, \rho, z) > 0$, $\theta(\rho, -\rho, z) < 0$; $\theta(\rho, \rho, z)$ 大小与 σ_{yy} 取值无关, $\theta(\rho, -\rho, z)$ 随 σ_{yy} 单调增大. 传输中,

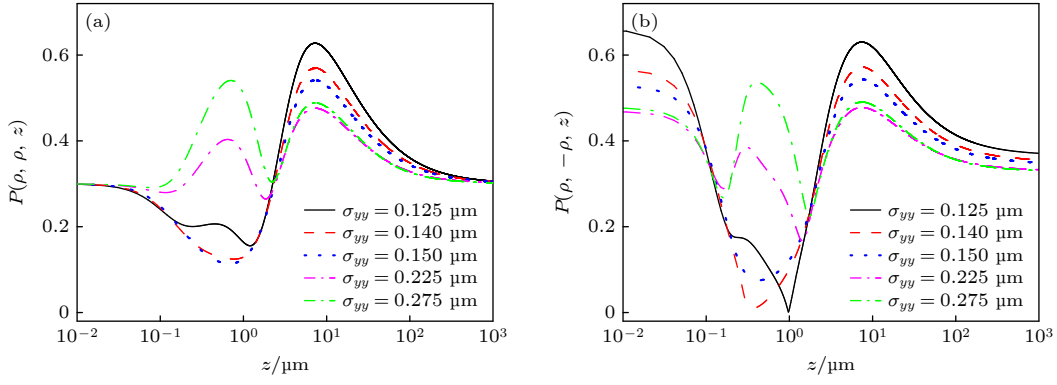

 图 14 σ_{yy} 不同时偏振度随 z 的变化 (a) $P(\rho, \rho, z)$; (b) $P(\rho, -\rho, z)$

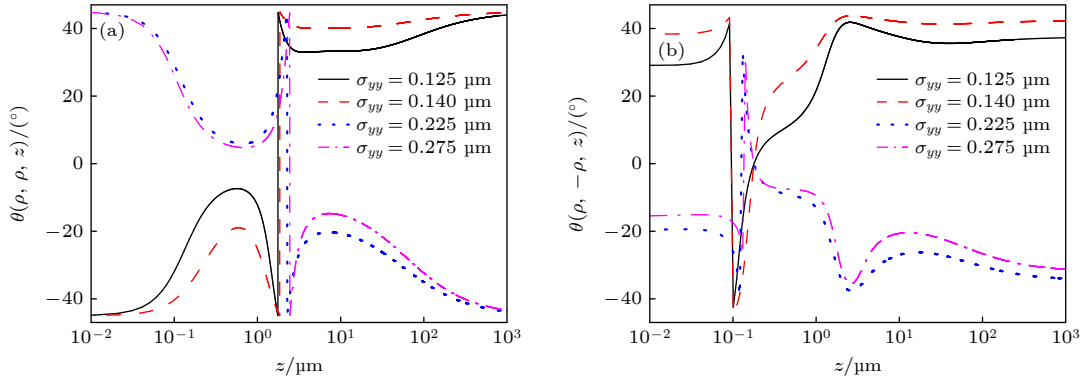
 Fig. 14. Polarization degree vs. z for different σ_{yy} : (a) $P(\rho, \rho, z)$; (b) $P(\rho, -\rho, z)$.

 图 15 σ_{yy} 不同时方位角随 z 的变化 (a) $\theta(\rho, \rho, z)$; (b) $\theta(\rho, -\rho, z)$

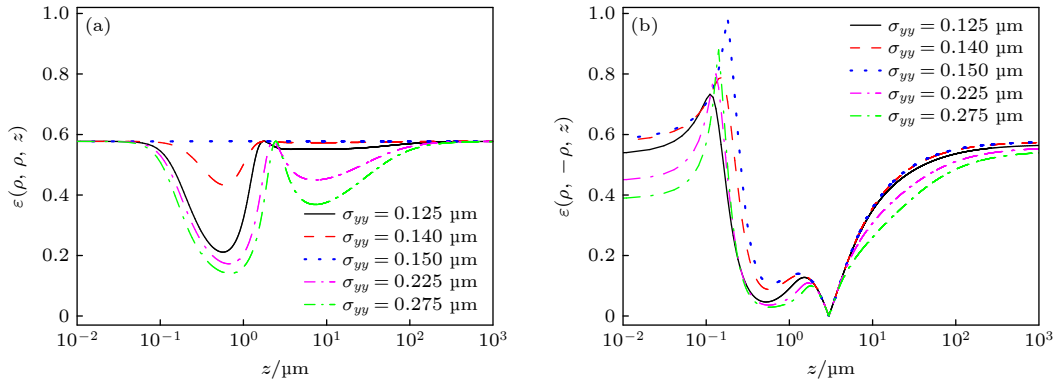
 Fig. 15. Orientation angle vs. z for different σ_{yy} : (a) $\theta(\rho, \rho, z)$; (b) $\theta(\rho, -\rho, z)$.

 图 16 σ_{yy} 不同时椭圆率随 z 的变化 (a) $\varepsilon(\rho, \rho, z)$; (b) $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$

 Fig. 16. Ellipticity vs. z for different σ_{yy} : (a) $\varepsilon(\rho, \rho, z)$; (b) $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$.

$\theta(\rho, \rho, z)$ 的突变位置随 σ_{yy} 增大而滞后, 最终趋于与初始值正负相反的定值; $\theta(\rho, -\rho, z)$ 的突变量随 $|\sigma_{yy} - \sigma_{xx}|$ 的增大而减小, 突变位置相比同一 σ_{yy} 时的 $\theta(\rho, \rho, z)$ 的更早, 最终趋于与初始值正负相同且绝对值更大的定值. 比较图 15(a), (b) 可知, 在 $0 < z < 1 \mu\text{m}$ 传输中, $\theta(\rho, -\rho, z)$ 的变化更多样, 即在生物组织浅处, 与 $\theta(\rho, \rho, z)$ 相比, $\theta(\rho, -\rho, z)$ 的变化更灵敏.

图 16(a) 表明, $\varepsilon(\rho, \rho, z)$ 的初始值与 σ_{yy} 大小无关. 传输中, 当 $\sigma_{yy} = \sigma_{xx}$ 时, $\varepsilon(\rho, \rho, z)$ 保持定值, 是因为此时 $W_{xx} = W_{yy}$, 可由 (36) 式—(38) 式得证; 当 $\sigma_{yy} \neq \sigma_{xx}$ 时, 经历两次极小一次极大的变化, $|\sigma_{yy} - \sigma_{xx}|$ 越小, 极小值越大; 最终趋于各自的初始值. 图 16(b) 表明, $|\sigma_{yy} - \sigma_{xx}|$ 越小, $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$ 初始值越大; 传输中, 经历两次极小两次极大的变化; 当 $\sigma_{yy} = \sigma_{xx}$ 时, $\varepsilon(\rho, -\rho, z)$ 的极大值接近 1,

极小值接近 0; 最终趋于一定值.

综合图 14—图 16 可知, 空间自相关长度对线刃型-螺旋型混合位错光束偏振态的影响取决于 $|\sigma_{yy} - \sigma_{xx}|$ 的大小. 在 $0 < z < 1 \mu\text{m}$ 传输中不同两点的偏振态变化更多样, 即在生物组织浅处, 相比相同两点的偏振态的变化, 不同两点的变化更灵敏. 这由于交叉偏振度表征光场中不同两点间的关联起伏变化, 而传统的单一点偏振度表征某一点的起伏变化, 决定前者变化的因素比后者更多.

4 结 论

以广义惠更斯-菲涅耳原理为基础推导了生物组织传输中部分相干线刃型-螺旋型混合位错光束的交叉谱密度函数和交叉谱密度矩阵元, 并探讨了源平面上归一化光强和相位的分布规律; 无量纲参数 a 、线刃型位错离轴距离 b 、空间互相关长度 σ_{xy} 和空间自相关长度 σ_{yy} 取不同值时, 空间两点不同情况时光束偏振态随传输距离 z 的变化规律. 研究表明, 在源平面处, 光强为非轴对称分布; a 绝对值一定正负对光强分布没有影响, a 绝对值越大, 相干涡旋的作用越大; b 值越大, 光强次峰值越低. 另一方面, 源平面存在一拓扑荷大小为 1 的相干涡旋和一线刃型位错, a 值为正时, 拓扑荷为 +1, a 值为负时, 拓扑荷为 -1; b 值越大, 线刃型位错距离原点越远. 在源平面处, 相同两点的偏振度和椭圆率与 4 个参数选取均无关, 而方位角只与 a 和 σ_{xy} 无关; 不同两点的偏振态与 a 和 b 无关, 却与 σ_{xy} 和 σ_{yy} 有关. 传输中, 与相同两点偏振态相比, 不同两点的偏振度和椭圆率起伏幅度较大, 方位角起伏较小. 最终, 偏振态各自趋于一定值, 无论初始值还是最终值, 不同两点的偏振度、方位角的绝对值更大, 椭圆率更小. 绝对值相同时参数 a 的正负不影响偏振态的变化; a 绝对值的大小影响偏振态变化的快慢, 对变化趋势的影响不明显; 随着 b 增大, 传输中光束偏振度的起伏变化将减弱, 方位角发生突变的次数改变. 这可能缘于 b 较小时, 线刃型位错傍轴并对传输中光束偏振态变化的影响占主导; b 较大时, 线刃型-螺旋型混合位错光束偏振态的变化将趋于螺旋型光束的变化规律. σ_{xy} 取值不同引起的相同两点偏振态的变化差异主要集中在各自的极值附近; 不同两点偏振态的变化差异主要集中在初值和各自的极值附近. 空间自相关长度对线

刃型-螺旋型混合位错光束偏振态的影响取决于 $|\sigma_{yy} - \sigma_{xx}|$ 的大小. 在生物组织浅处, 与相同两点的偏振态的变化相比, 不同两点的变化更灵敏. 这是缘于决定交叉偏振度的因素比单点偏振度的更多更复杂, 它体现出光场更丰富的物理信息. 该结果将为拓展奇点光束在生物组织成像技术及疾病诊疗领域的应用提供理论基础和指导.

参考文献

- [1] Zhou Y, Cheng K, Sun X, Zhao M R, Chen G 2022 *J. Mod. Opt.* **69** 233
- [2] Yang N, Zhao L, Xu Y, Xu Y G 2022 *Laser Infrared* **52** 1167 (in Chinese) [杨宁, 赵亮, 许颖, 徐勇根 2022 激光与红外 **52** 1167]
- [3] Qiao W L, Zhou L, Liu Z H, Gong Y H, Jiang L, Lu Y Y, Zhao H T 2022 *Spectrosc. Spect. Anal.* **42** 1070 (in Chinese) [乔文龙, 周亮, 刘朝晖, 龚勇辉, 姜乐, 吕媛媛, 赵鹤童 2022 光谱学与光谱分析 **42** 1070]
- [4] Zhao C G, Yin X J, Yang C, Wang J, Li J H 2023 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **65** 1054
- [5] Wang Y W, Liu Y, Bu M, Wang L F 2008 *Laser Infrared* **38** 7 (in Chinese) [王亚伟, 刘莹, 卜敏, 王立峰 2008 激光与红外 **38** 7]
- [6] Du L Y, Zhan X, Lei Y R, Song H, Wen Y Q 2009 *Infrared Laser Eng.* **38** 466 (in Chinese) [杜玲艳, 詹旭, 雷跃荣, 宋弘, 文字桥 2009 红外与激光工程 **38** 466]
- [7] Sdobnov A, Ushenko V A, Trifonyuk L, Dubolazov O V, Ushenko Y A, Ushenko A G, Soltys I V, Gantyuk V K, Bykov A, Meglinski I 2023 *Opt. Laser. Eng.* **171** 107806
- [8] Zhang Y X, Fan Z P, Zhai H Y, He H H, Wang Y, He C, Ma H 2023 *Chin. J. Lasers* **50** 111 (in Chinese) [张钰新, 樊志鹏, 翟好宇, 何宏辉, 王毅, 何超, 马辉 2023 中国激光 **50** 111]
- [9] Zhang W H, Wang L, Wang W N, Zhao S M 2019 *OSA Continuum* **2** 3281
- [10] Liang Q Y, Yang D Y, Zhang Y X, Zheng Y, Hu L F 2020 *OSA Continuum* **3** 2429
- [11] Huang H, Shou Q, Chen Z C 2020 *Laser Optoelectron. Prog.* **57** 244 (in Chinese) [黄慧, 寿倩, 陈志超 2020 激光与光电子学进展 **57** 244]
- [12] Ye D, Li J Y, Li Z C, Zhang Y 2024 *Laser Technol.* **48** 261 (in Chinese) [叶东, 李俊瑶, 李宗辰, 张颐 2024 激光技术 **48** 261]
- [13] Biton N, Kupferman J, Arnon S 2021 *Sci. Rep.* **11** 2047
- [14] Duan M L, Du J, Zhao Z G, Huang X D, Gao Y Q, Ding C L 2021 *Acta Photonica Sin.* **50** 0929001 (in Chinese) [段美玲, 杜娇, 赵志国, 黄小东, 高燕琴, 丁超亮 2021 光子学报 **50** 0929001]
- [15] Chen K, Ma Z Y, Hu Y Y 2023 *Chin. Phys. B* **32** 024208
- [16] Zhou Y Q, Cui Z W, Han Y P 2022 *Opt. Express* **30** 23448
- [17] Yan X Y, Yang Y F, He Y, Li L L, Wang J J 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 184 (in Chinese) [闫哲玉, 杨艳芳, 何英, 李路路, 王俊杰 2022 光学学报 **42** 184]
- [18] Gao P H, Lu M H, Li J Y 2023 *Opt. Continuum* **2** 2374
- [19] Cao J, Tong R F, Huang K, Li Y Q, Xu Y G 2024 *J. Opt. Soc. Am. A* **41** 371
- [20] Yin Z A, Duan M L 2024 *Opt. Tech.* **50** 99 (in Chinese) [殷子昂, 段美玲 2024 光学技术 **50** 99]
- [21] Gao P H, Bai L, Li J L 2020 *OSA Continuum* **3** 2997

- [22] Gao P H, Lie J H, Cheng K, Duan M L 2017 *Opt. Appl.* **47** 471
- [23] Wang Y K, Bai L, Gao P H 2019 *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference Taiyuan, China, July 18–21, 2019* pp1–3
- [24] Wolf E 2007 *Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light* (Cambridge: Cambridge University Press) pp59–60
- [25] Wolf E, Pu J X 2014 *Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light* (Beijing: Peking University Press) p210 (in Chinese) [Wolf E, 蒲继雄 2014 光的相干与偏振理论导论 (北京: 北京大学出版社) 第 210 页]
- [26] Kotlyar V, Kovalev A, Porfirev A 2017 *Phys. Rev. A* **95** 053805
- [27] Ishimaru A 1977 *Appl. Opt.* **16** 3190
- [28] Roychowdhury H, Korotkova O 2005 *Opt. Commun. A* **249** 379
- [29] Andrews L C, Phillips R L 2005 *Laser Beam Propagation Through Random Media* (Washington: SPIE Press) p820
- [30] Shirron J J 1997 *Siam. Rev.* **39** 803
- [31] Mandel L, Wolf E 1995 *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge: Cambridge University Press) p170
- [32] Freund I, Shvartsman N 1994 *Phys. Rev. A* **50** 5164
- [33] He G M, Duan M L, Yin Z A, Shan J, Feng J J 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0217002 (in Chinese) [贺改梅, 段美玲, 殷子昂, 单晶, 冯姣姣 2024 *光学学报* **44** 0217002]
- [34] Deng Y, Zeng S Q, Luo Q M, Zhang Z H, Fu L 2008 *Opt. Lett.* **33** 77

Polarization properties of partially coherent mixed dislocation beams transmitting in biological tissues^{*}

Feng Jiao-Jiao Duan Mei-Ling[†] Shan Jing Wang Ling-Hui Xue Ting

(School of Semiconductors and Physics, North University, Taiyuan 030051, China)

(Received 15 July 2024; revised manuscript received 13 August 2024)

Abstract

Objective The optical information change of beams acting on biological tissue can get an insight into the new optical effects of tissue, and even can provide a theoretical basis for developing biphotonic medical diagnosis and therapy technologies. Polarization technology is also widely used in the field of biological detection due to its advantages of non-contact, rich information and without staining markers. In this work, the polarization behaviors of partially coherent screw-linear edge mixed dislocation beam transmitting in biological tissue are analyzed and explored. Simultaneously, in order to more clearly and more intuitively understand a mixed dislocation beam, both the normalized intensities and phase distributions at source plane for different parameters a and b are also discussed. We hope that the obtained results will provide theoretical and experimental foundation for expanding the application of singularity beams in biological tissue imaging technology.

Method By combining the Schell term with the field distribution of the screw-linear edge mixed dislocation beam at the source plane, and based on the generalized Huygens-Fresnel principle, the analytical expressions of the cross-spectral density matrix elements of partially coherent screw-linear edge dislocation beam propagating in biological tissues are derived. Adopting the unified theory of coherence and polarization, the polarization behaviors of the beams can be investigated in detail.

Results At the source plane, the intensity has a non axisymmetric distribution, and there exists a coherent vortex with a topological charge size of 1 and a linear edge dislocation. The sign of a is related to the rotation direction of the phase singularity. The larger the value of b , the farther the linear edge dislocation is from the origin. At the source plane, the degree of polarization and ellipticity between the two identical points are independent of the four parameters: dimensionless parameter a , off-axis distance of edge dislocation b , spatial

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12204439), the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202203021211192), and the Applied Basic Research Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 201701D121011).

[†] Corresponding author. E-mail: meilingduan@nuc.edu.cn

self-correlation length σ_{yy} , and spatial mutual-correlation length σ_{xy} , the orientation angle is only independent of a and σ_{xy} ; the polarization of two different points is independent of a and b , but is related to σ_{yy} and σ_{xy} . In transmission, the polarization degrees and ellipticity of two different points fluctuate greatly and the orientation angle displays less fluctuation. Finally, all the polarization state parameters tend to be their corresponding values, respectively.

Conclusions The results show that when b is smaller, the linear edge dislocation is paraxial and plays an important role in the polarization state change; when b is larger, the polarization state changes of the screw-linear edge mixed dislocation beam will tend to be the pattern of spiral beams. The absolute value of the difference between σ_{yy} and σ_{xy} is also one of main factors influencing the polarization state. The sign of a does not affect the change in polarization state, but its magnitude can influence the change of speed. Due to more complex factors determining the correlation fluctuations between different points in the light field, the changes of two different points are more sensitive than those of the two identical points in shallow biological tissue. Beams with different parameters can be selected for different application requirements.

Keywords: mixed screw-linear edge dislocation beam, biological tissue, cross-spectral density, polarization state

PACS: 41.85.-p, 42.25.Bs, 42.25.Ja, 42.62.Be

DOI: [10.7498/aps.73.20240985](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240985)



部分相干混合位错光束在生物组织传输中的偏振特性

冯皎皎 段美玲 单晶 王灵辉 薛婷

Polarization properties of partially coherent mixed dislocation beams transmitting in biological tissues

Feng Jiao-Jiao Duan Mei-Ling Shan Jing Wang Ling-Hui Xue Ting

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 184101 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240985

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240985>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

部分相干幂指数相位涡旋光束的传输特性研究

Propagation properties of partially coherent power-exponent-phase vortex beam

物理学报. 2022, 71(1): 014203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211411>

部分相干多离轴涡旋矢量光束的传输特性

Propagation properties of partially coherent vector beam with multiple off-axis vortex phases

物理学报. 2024, 73(3): 034201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231484>

基于生物阻抗谱成像的生物组织检测方法

Biological tissue detection based on electrical impedance spectroscopic tomography

物理学报. 2022, 71(4): 048706 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211600>

太赫兹时域光谱中脉冲太赫兹波全息探测

Holographic detection of pulsed terahertz waves in terahertz time-domain spectroscopy

物理学报. 2022, 71(18): 188704 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220983>

不同温度下bcc-Fe中螺位错滑移及其与 $\square$ 位错环相互作用行为

Screw dislocation slip and its interaction with $\square$ dislocation loop in bcc-Fe at different temperatures

物理学报. 2021, 70(6): 068701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201659>

部分相干衍射成像综述

Review of partially coherent diffraction imaging

物理学报. 2021, 70(21): 214201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211020>