

部分相干径向偏振光束传输中相干性研究

陈顺意 丁攀峰 蒲继雄

Research on the coherence of partially coherent radially polarized beam during propagation

Chen Shun-Yi Ding Pan-Feng Pu Ji-Xiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 134201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.134201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I13>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

抑制孔径间距误差影响的相干场成像质量提升方法研究

Improving coherent field imaging quality by suppressing the influence of transmitting aperture spacing error

物理学报.2015, 64(12): 124203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124203>

第三代同步辐射光源 X 射线相干性测量研究

Coherence of X-ray in the third synchrotron radiation source

物理学报.2014, 63(10): 104202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104202>

相干场成像原理局限性分析

Analyses on limitations of coherent field imaging principle

物理学报.2014, 63(10): 104203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104203>

光束相干合成中填充因子对远场光强分布的影响

Influence of filling factor on far-field intensity distribution in coherent beam combination

物理学报.2014, 63(9): 094202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094202>

相干场成像技术接收镜精度对传递函数的影响

Optical transfer function of coherent field imaging based on deviation of receptors

物理学报.2013, 62(22): 224201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224201>

## 部分相干径向偏振光束传输中相干性研究\*

陈顺意 丁攀峰† 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建省光传输与变换重点实验室, 厦门 361021)

(2014年12月22日收到; 2015年1月16日收到修改稿)

根据广义惠更斯理论及相干偏振统一理论, 研究部分相干径向偏振光束在自由空间中传输时, 不同参考点处复相干度随传输距离的变化规律. 研究表明, 部分相干径向偏振光束在自由空间中传输, 不同参考点处, 复相干度模值随距离的变化规律有所差别. 当参考点位于原点时, 随着传输距离增大,  $\mu_{xx}$  模值及  $\mu_{xy}$  模值分布形式不变, 分布范围增大; 当参考点位于  $x$  轴上时,  $\mu_{xx}$  模值由单峰值向三峰两谷对称形式演化,  $\mu_{xy}$  模值由单侧两峰向四峰四谷对称形式演化, 完成演化所需传输距离与参考点距离  $x$  轴中心的远近有关, 参考点距离  $x$  轴中心越近, 完成演化所需的传输距离越短; 当参考点位于  $y$  轴时, 随着距离增大,  $\mu_{xx}$  模值分布形式不变, 分布范围增大,  $\mu_{xy}$  模值由上侧两峰向四峰四谷对称形式演化, 演化所需传输距离与参考点距  $y$  轴中心远近有关, 参考点距  $y$  轴中心越近, 完成演化所需的传输距离越短; 当参考点位于其他位置时(非特殊位置),  $\mu_{xx}$  模值及  $\mu_{xy}$  模值分布规律, 遵从各自参考点在  $x$  轴,  $y$  轴上的分布规律的结合即参考点位于其他位置时,  $\mu_{xx}$  模值及  $\mu_{xy}$  模值分别随距离变化逐渐演化成三峰结构、四峰结构.

**关键词:** 部分相干径向偏振光束, 复相干度, 参考位置

**PACS:** 42.25.Kb, 42.25.Ja, 42.25.Bs

**DOI:** 10.7498/aps.64.134201

## 1 引言

径向偏振光束是一种在光束截面上除中心点外, 其余点具有沿径向线偏振特性的光束, 并且其电矢量振动在横截面上具有完美对称性, 中心点光强为零. 自1972年, Mushiake等<sup>[1]</sup>首先在实验中得到了径向偏振光束后, 近些年来, 国内外学者对径向偏振光束又有了更进一步的研究. 2005年, Quabis等研究了产生高质量径向偏振空心光束的方法<sup>[2]</sup>. 2006年, Diehl等对强聚焦径向偏振光束的特性进行了研究<sup>[3]</sup>. 同年, Salamin推导出了径向偏振高斯激光束紧密聚焦场的解析表达式<sup>[4]</sup>. 在国内, 2007年, Deng等研究了径向虚宗量偏振光束的传输特性<sup>[5]</sup>, 同年, 他们还通过矢量角谱理发现径向偏振光束的电磁场完全由横向磁场和沿轴

向的纵向电场组成<sup>[6]</sup>. 经过聚深焦后的径向偏振光<sup>[7]</sup>, 具有很强的轴向电场<sup>[8]</sup>, 这使得径向偏振光束能够对粒子进行捕捉, 而广泛应用于光镊中. 此外, 径向偏振光束的独特特性在金属切割、提高光显微分辨率及粒子加速上也具有重大应用<sup>[9-11]</sup>. 部分相干光束的存在具有普遍性, 理论和实验都证明在相同条件的大气湍流下, 部分相干光束在传播过程中比完全相干光束更具优势<sup>[12-14]</sup>, 前人将不同光束结合部分相干特性已做了许多研究, 2008年, 季小玲等对部分相干厄米-高斯光束在大气湍流中传输时的空间相干性进行分析<sup>[15]</sup>, 2010年, 他们还部分相干平顶光束在湍流中传输的等效曲率半径进行了研究<sup>[16]</sup>, 2013年, 蒲继雄等将部分相干特性结合 Airy 光束, 研究其传输特性<sup>[17]</sup>. 本文将径向偏振光束与部分相干特性结合, 研究部分相干径向偏振光束在自由空间传输的相干特性.

\* 国家自然科学基金(批准号: 61307001, 61178015)和福建省自然科学基金(批准号: 2013J05094, 2014J05007)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dingpanfeng@163.com

## 2 理论分析

通常, 源平面处的随机电磁光束的交叉谱密度矩阵表示为<sup>[18]</sup>

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

其中矩阵元表示为

$$\begin{aligned} W_{ij}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) &= \langle E_i^*(\mathbf{r}_1, \omega) E_j(\mathbf{r}_2, \omega) \rangle, \\ i &= x, y, \quad j = x, y, \quad (2) \end{aligned}$$

式中  $E_i(\mathbf{r}, \omega)$  代表源场  $\mathbf{r}$  处, 角频率为  $\omega$  的电场在  $i$  方向上的分量, 角括号代表系综平均. 不失一般性, 设源平面上部分相干径向偏振光束为高斯谢尔模型光束, 其统计平均振幅及横向相干度分别表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{r}}{w} \exp\left(-\frac{r^2}{w}\right), \quad (3)$$

$w$  为光束束腰,  $r$  为半径大小. 横向相干度为(坐标上撇号与源平面的点相对应)

$$\begin{aligned} \mu_{ij}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) &= \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{\delta^2}\right], \\ i, j &= x', y', \quad (4) \end{aligned}$$

其中  $\delta$  为横向相干长度, 由于部分相干径向偏振光束电场的两个分量互易, 因此  $\delta_{xx} = \delta_{yy} = \delta_{xy} = \delta_{yx} = \delta$ . 在直角坐标系下两个正交分量的统计振幅可表示为

$$\begin{aligned} E_x(x', y') &= \frac{x'}{w} \exp\left(-\frac{x'^2 + y'^2}{w}\right), \\ E_y(x, y) &= \frac{y'}{w} \exp\left(-\frac{x'^2 + y'^2}{w}\right). \quad (5) \end{aligned}$$

将(5)式代入(2)式, 源平面处的交叉谱密度矩阵元表示为

$$\begin{aligned} & W_{xx}^{(0)}(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2) \\ &= \frac{x'_1 x'_2}{w^2} \exp\left[-\frac{x'^2_1 + y'^2_1 + x'^2_2 + y'^2_2}{w^2} - \frac{(x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2}{\delta^2}\right], \\ & W_{xy}^{(0)}(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2) \\ &= \frac{x'_1 y'_2}{w^2} \exp\left[-\frac{x'^2_1 + y'^2_1 + x'^2_2 + y'^2_2}{w^2} - \frac{(x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2}{\delta^2}\right], \\ & W_{yx}^{(0)}(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2) \end{aligned}$$

$$= \frac{y'_1 x'_2}{w^2} \exp\left[-\frac{x'^2_1 + y'^2_1 + x'^2_2 + y'^2_2}{w^2} - \frac{(x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2}{\delta^2}\right],$$

$$\begin{aligned} & W_{yy}^{(0)}(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2) \\ &= \frac{y'_1 y'_2}{w^2} \exp\left[-\frac{x'^2_1 + y'^2_1 + x'^2_2 + y'^2_2}{w^2} - \frac{(x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2}{\delta^2}\right]. \quad (6) \end{aligned}$$

与源平面的点相区别, 观测平面上的点用  $x, y$  表示. 由广义惠更斯-菲涅耳衍射积分, 可以得到传输一段距离  $z$  后观测平面上的交叉谱密度矩阵元的表示<sup>[19]</sup>

$$\begin{aligned} W_{ij} &= \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2 \iiint \int dx'_1 dy'_1 dx'_2 dy'_2 \\ &\times W_{ij}^{(0)}(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2) \\ &\times \exp\left\{-\frac{ik}{2z} \left[(x_1 - x'_1)^2 + (y_1 - y'_1)^2\right]\right\} \\ &\times \exp\left\{-\frac{ik}{2z} \left[(x_2 - x'_2)^2 + (y_2 - y'_2)^2\right]\right\}, \\ i, j &= x, y, \quad (7) \end{aligned}$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$  为入射光束的波数,  $\lambda$  为入射光束波长. 通过对上式进行冗长的积分计算及简化, 可得 ( $\rho$  为观测平面上点的位置矢量)

$$\begin{aligned} & W_{xx}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z) \\ &= C_0 \exp\left[-\frac{k^2(x_1^2 + y_1^2)}{4z^2\alpha^2} + \frac{p^2 + q^2}{4\gamma^2}\right] \\ &\times \left[\frac{\pi}{2\gamma^4} + \frac{p\pi}{2\gamma^4} \left(\frac{p}{2\gamma^2} + \frac{ik\delta^2 x_1}{2z}\right)\right], \\ & W_{xy}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z) \\ &= C_0 \exp\left[-\frac{k^2(x_1^2 + y_1^2)}{4z^2\alpha^2} + \frac{p^2 + q^2}{4\gamma^2}\right] \\ &\times \left[\left(\frac{p}{2\gamma^2} + \frac{ik\delta^2 x_1}{2z}\right) \frac{q\pi}{2\gamma^4}\right], \\ & W_{yx}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z) \\ &= C_0 \exp\left[-\frac{k^2(x_1^2 + y_1^2)}{4z^2\alpha^2} + \frac{p^2 + q^2}{4\gamma^2}\right] \\ &\times \left[\frac{p\pi}{2\gamma^4} \left(\frac{q}{2\gamma^2} + \frac{ik\delta^2 y_1}{2z}\right)\right], \\ & W_{yy}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z) \\ &= C_0 \exp\left[-\frac{k^2(x_1^2 + y_1^2)}{4z^2\alpha^2} + \frac{p^2 + q^2}{4\gamma^2}\right] \\ &\times \left[\frac{\pi}{2\gamma^4} + \frac{q\pi}{2\gamma^4} \left(\frac{q}{2\gamma^2} + \frac{ik\delta^2 y_1}{2z}\right)\right], \quad (8) \end{aligned}$$

式中,

$$C_0 = \frac{\pi}{\alpha^4 \delta^2 w^2} \left( \frac{k}{2\pi z} \right)^2 \times \exp \left[ \frac{-ik}{2z} (x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2) \right],$$

$$p = i \frac{k}{z} \left( \frac{1}{\alpha^2 \delta^2} x_1 - x_2 \right), \quad q = i \frac{k}{z} \left( \frac{1}{\alpha^2 \delta^2} y_1 - y_2 \right),$$

$$\alpha^2 = \frac{1}{w^2} + \frac{1}{\delta^2} + \frac{ik}{2z}, \quad \beta^2 = \frac{1}{w^2} + \frac{1}{\delta^2} - \frac{ik}{2z},$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - \frac{1}{\alpha^2 \delta^4}. \quad (9)$$

复相干度定义为

$$\mu_{ij}(\rho_1, \rho_2, z) = \frac{W_{ij}(\rho_1, \rho_2, z)}{[W_{ii}(\rho_1, \rho_2, z) W_{jj}(\rho_1, \rho_2, z)]^{1/2}},$$

$i, j = x, y.$  (10)

表示观测面上,  $\rho_1$  点电场  $i$  方向分量与  $\rho_2$  点电场  $j$  方向分量之间的相干度. 其中  $\mu_{xx}$  与  $\mu_{yy}$  类似, 而  $\mu_{xy}$  与  $\mu_{yx}$  类似, 因此只需研究具有代表性的  $\mu_{xx}$  和  $\mu_{xy}$  即可.

### 3 传输中的相干性

根据理论分析, 观测平面处复相干度与参考位置有关, 为使研究具有完整性, 以下由参考点位于观测平面的原点、 $x$  轴、 $y$  轴及其他位置四部分分析参考位置对自相干度  $\mu_{xx}$  及交叉相干度  $\mu_{xy}$  模值的影响. 模拟中统一采用参数: 入射光束束腰宽度  $w = 0.5$  mm, 入射光波长  $\lambda = 632.8$  nm, 相干长度  $\delta = 0.2w$ .

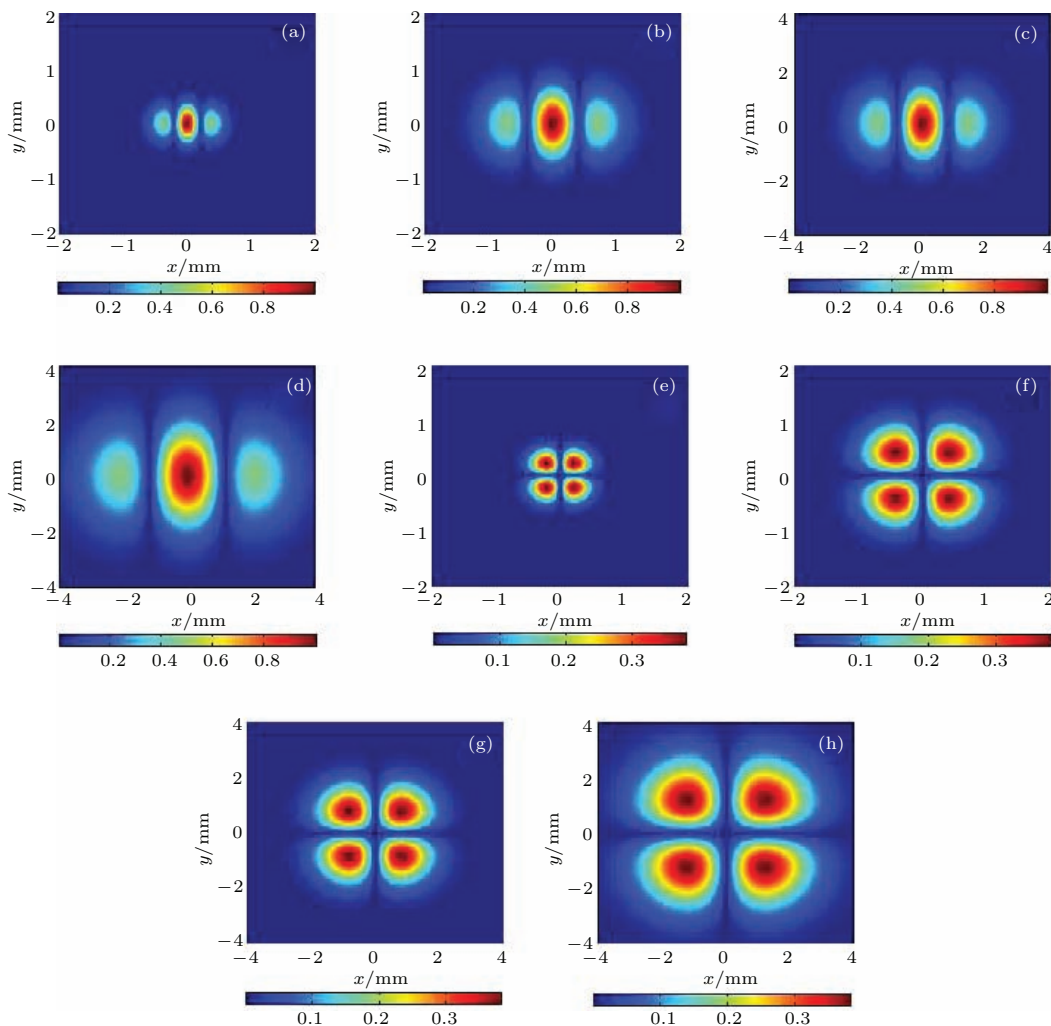


图1 (网刊彩色) 部分相干径向偏振光束传输不同距离  $z$  后观测平面处  $\mu_{xx}, \mu_{xy}$  模值分布图(参考点为  $(0, 0)$  点) (a)—(d) 为  $\mu_{xx}$  模值分布: (a)  $z = 0.5$  m, (b)  $z = 1$  m, (c)  $z = 2$  m, (d)  $z = 3$  m; (e)—(h) 为  $\mu_{xy}$  模值分布: (e)  $z = 0.5$  m, (f)  $z = 1$  m, (g)  $z = 2$  m, (h)  $z = 3$  m

Fig. 1. (color online) Module value distribution of  $\mu_{xx}, \mu_{xy}$  of Partially Coherent Radially Polarized Beam in different transmission distance, reference point  $(0, 0)$ . (a)—(d) for  $\mu_{xx}$ : (a)  $z = 0.5$  m, (b)  $z = 1$  m, (c)  $z = 2$  m, (d)  $z = 3$  m; (e)—(h) for  $\mu_{xy}$ : (e)  $z = 0.5$  m, (f)  $z = 1$  m, (g)  $z = 2$  m, (h)  $z = 3$  m.

### 3.1 参考点位于原点

首先, 研究参考点位于原点处  $\mu_{xx}$  与  $\mu_{xy}$  模值分布随传输距离的变化, 如图 1 所示, 图 1(a)—(d) 为  $\mu_{xx}$  模值分布, (e), (f) 为  $\mu_{xy}$  模值分布. 图 1(a)—(d) 与 (e)—(h) 传输距离一一对应, 且逐渐增大.

从图 1 可以看出,  $\mu_{xx}$  模值分布呈一个主峰, 两个次峰的三峰两谷分布, 且关于原点对称, 同时随着传输距离的增大如图 1(a)—(d),  $\mu_{xx}$  模值的分布范围增大, 但并不改变其分布形式; 而对于  $\mu_{xy}$  如图 1(e)—(h), 其模值呈四峰四谷分布, 同样关于原

点对称, 随着传输距离的增大,  $\mu_{xy}$  分布形式不变, 但分布范围有所增大. 此外, 若继续增大传输距离,  $\mu_{xx}$ ,  $\mu_{xy}$  整体模值大小基本不变, 所以参考点位于 (0, 0) 时, 对于确定的观测平面  $|\mu_{xy}| \ll |\mu_{xx}|$ .

### 3.2 参考点位于 $x$ 轴

当参考点位于  $x$  轴上时, 为研究参考点位于  $x$  轴不同位置对复相干度模值分布的影响, 选取两个参考点 (0.2w, 0), (1w, 0) 进行对比分析.

关于参考点位于  $x$  轴不同位置对自相干度  $\mu_{xx}$  模值分布的影响, 如图 2 所示.

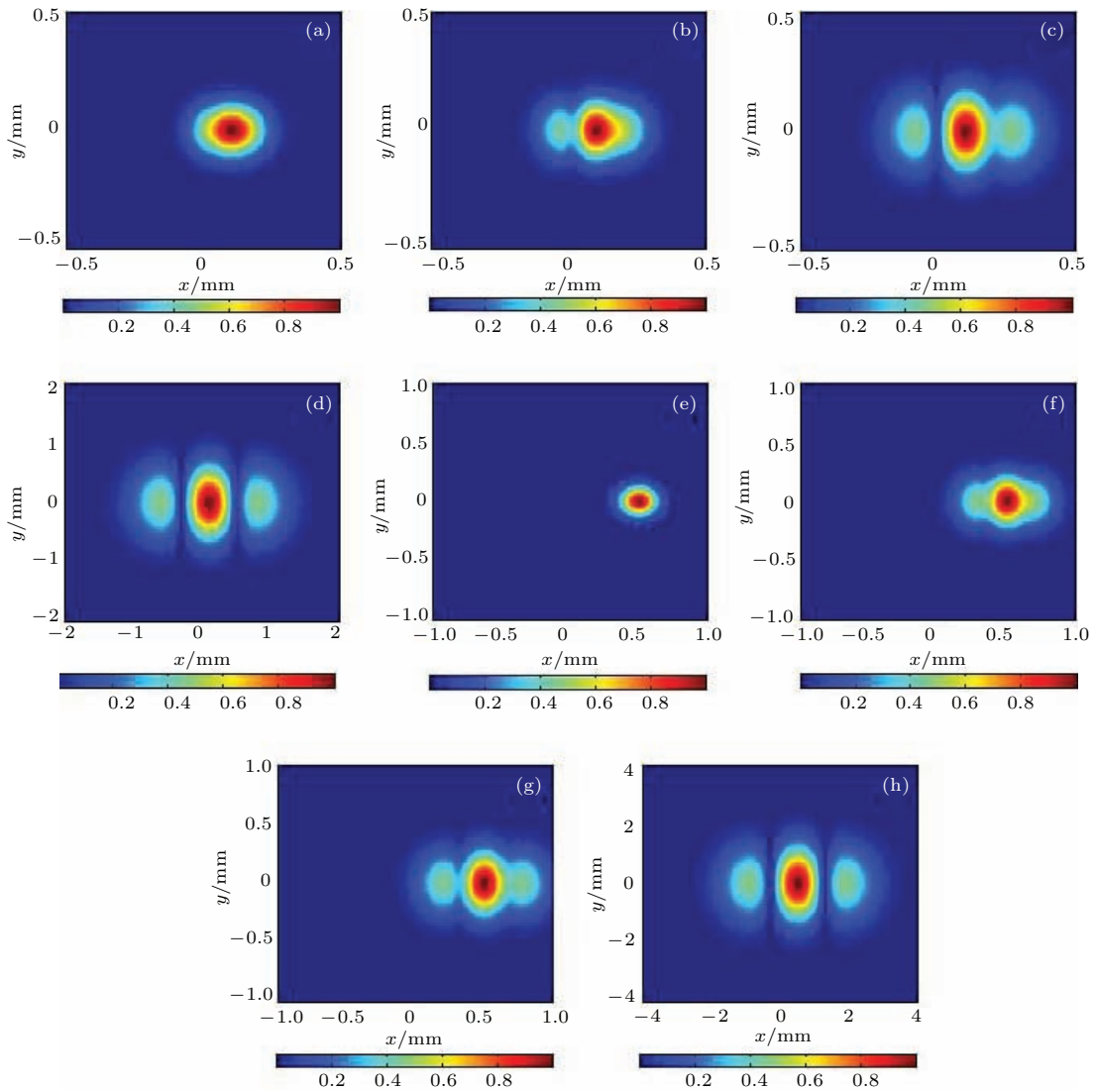


图 2 (网刊彩色) 部分相干径向偏振光束传输不同距离  $z$  后观测平面处  $\mu_{xx}$  模值分布图 (a)—(d) (参考点为 (0.2w, 0) 点) (a)  $z = 0.03$  m, (b)  $z = 0.1$  m, (c)  $z = 0.2$  m, (d)  $z = 1$  m; (e)—(h) (参考点为 (1w, 0) 点) (e)  $z = 0.1$  m, (f)  $z = 0.3$  m, (g)  $z = 0.4$  m, (h)  $z = 2$  m

Fig. 2. (color online) Module value distribution of  $\mu_{xx}$  of Partially Coherent Radially Polarized Beam in different transmission distance. (a-d) for reference point (0.2w, 0): (a)  $z = 0.03$  m, (b)  $z = 0.1$  m, (c)  $z = 0.2$  m, (d)  $z = 1$  m; (e)—(h) for reference point (1w, 0): (e)  $z = 0.1$  m, (f)  $z = 0.3$  m, (g)  $z = 0.4$  m, (h)  $z = 2$  m.



图 2(a)—(d) 以  $(0.2w, 0)$  为参考点, 传输距离依次为 0.03 m, 0.1 m, 0.2 m 及 1 m, 图 2(e)—(h) 以  $(1w, 0)$  为参考点, 传输距离依次为 0.1 m, 0.3 m, 0.4 m 及 2 m. 由图可知, 当参考点位于  $x$  轴,  $\mu_{xx}$  模值随着传输距离增大, 逐渐从一个峰值演化成三峰两谷对称形式. 具体对比两个参考点下的演化过程, 当传输距离为 0.1 m 时, 图 2(b) 已经开始向侧峰演化, 而图 2(e) 仍保持单峰形式; 继续增大传输距离至 1 m 时, 参考点为  $(0.2w, 0)$  处的模值分布已基本形成关于  $(0.2w, 0)$  对称的三峰两谷分布如

图 2(d) 所示, 而参考点为  $(1w, 0)$  处的模值分布直至传输距离为 2 m 时, 才完成关于  $(1w, 0)$  对称的三峰两谷分布形式的演化如图 2(h). 可见, 当参考点位于  $x$  轴上时,  $\mu_{xx}$  模值分布对称中心随参考点移动, 参考点距离中心越远,  $\mu_{xx}$  模值分布演化为关于参考点对称的三峰两谷分布形式所需的传输距离越大.

关于参考点位于  $x$  轴不同位置对交叉相干度  $\mu_{xy}$  模值分布的影响, 如图 3 所示.

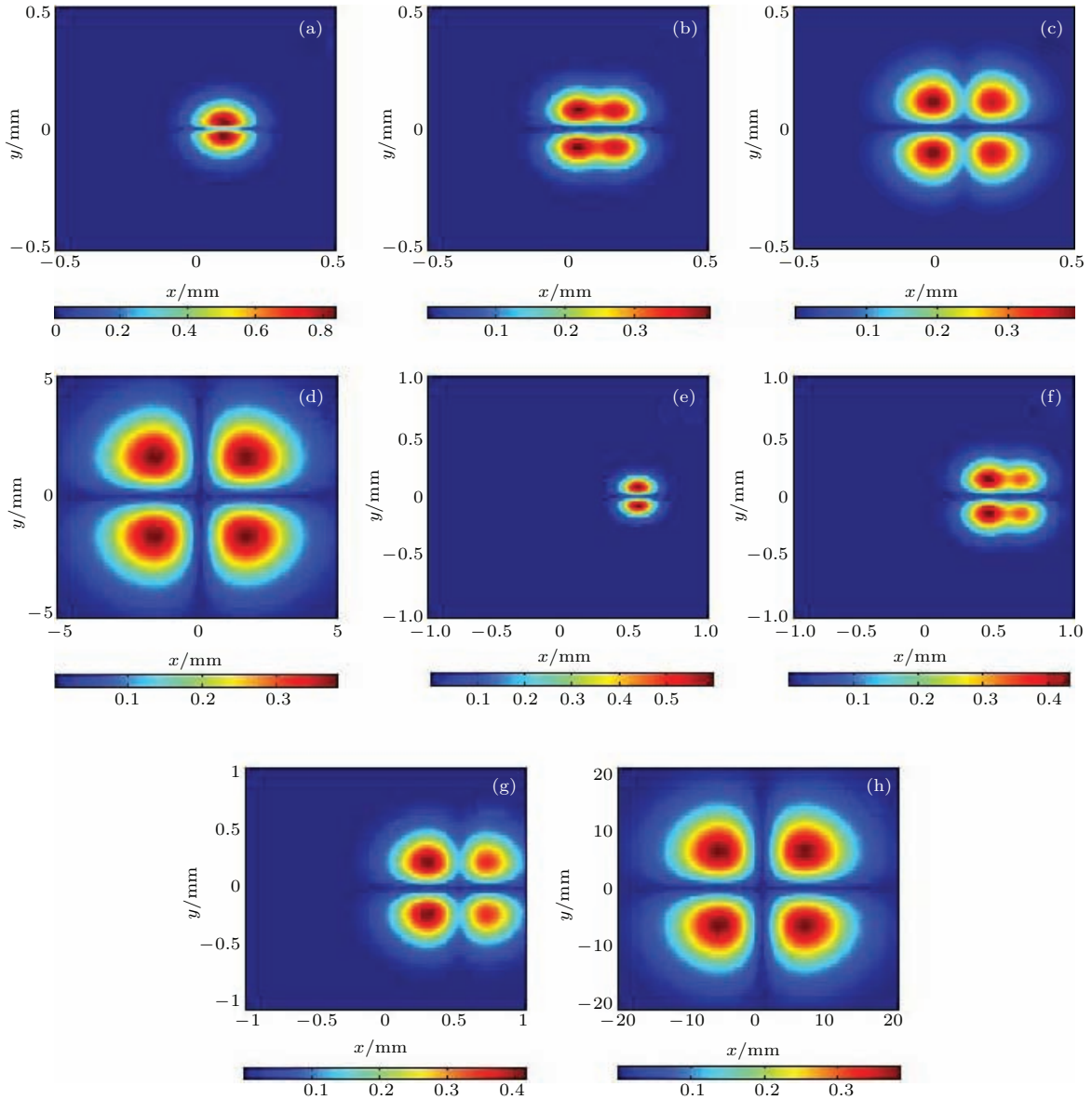


图 3 (网刊彩色) 部分相干径向偏振光束传输不同距离  $z$  后观测平面处  $\mu_{xy}$  模值分布图 (a)—(d) (参考点为  $(0.2w, 0)$  点) (a)  $z = 0.01$  m, (b)  $z = 0.1$  m, (c)  $z = 0.2$  m, (d)  $z = 4$  m; (e)—(h) (参考点为  $(1w, 0)$  点) (e)  $z = 0.1$  m, (f)  $z = 0.3$  m, (g)  $z = 0.5$  m, (h)  $z = 15$  m

Fig. 3. (color online) Module value distribution of  $\mu_{xy}$  of Partially Coherent Radially Polarized Beam in different transmission distance. (a)—(d) for reference point  $(0.2w, 0)$ : (a)  $z = 0.01$  m, (b)  $z = 0.1$  m, (c)  $z = 0.2$  m, (d)  $z = 4$  m; (e)—(h) for reference point  $(1w, 0)$ : (e)  $z = 0.1$  m, (f)  $z = 0.3$  m, (g)  $z = 0.5$  m, (h)  $z = 15$  m.

图 3(a)—(d) 以  $(0.2w, 0)$  为参考点, 传输距离依次为 0.01 m, 0.1 m, 0.2 m 及 4 m, 图 3(e)—(h) 以  $(1w, 0)$  为参考点, 且传输距离依次为 0.1 m, 0.3 m, 0.5 m 及 15 m. 由图可知, 参考点位于  $x$  轴时, 随着传输距离的增大,  $\mu_{xy}$  模值逐渐由双峰形式向关于参考点对称的四峰四谷分布形式演化. 当参考点位于  $(0.2w, 0)$ , 传输距离为 0.1 m 时,  $\mu_{xy}$  模值由双峰形式向四峰形式演化如图 3(b), 继续增大距离至 4 m 基本实现关于  $(0.2w, 0)$  对称的四峰四谷分布形式如图 3(d), 而参考点位于  $(1w, 0)$ , 传输距离为 0.1 m 时,  $\mu_{xy}$  模值仍保持双峰分布形式如图 3(e), 至传输距离为 0.3 m 时才开始由双峰形式向四峰形式演化如图 3(f), 最终传输距离至 15 m 如图 3(h),

基本实现关于  $(1w, 0)$  对称的四峰四谷分布形式. 可见, 当参考点位于  $x$  轴上时,  $\mu_{xy}$  模值分布对称中心随参考点移动, 参考点距离中心越远,  $\mu_{xy}$  模值分布演化为关于参考点对称的四峰四谷分布形式所需的传输距离越大.

### 3.3 参考点位于 $y$ 轴

同样地, 参考点位于  $y$  轴上时为研究参考点位于  $y$  轴不同位置对复相干度模值分布的影响, 我们选取两个参考点  $(0, 0.5w)$ ,  $(0, 1w)$  进行对比分析.

关于参考点位于  $y$  轴不同位置对自相干度  $\mu_{xx}$  模值分布的影响, 如图 4 所示.

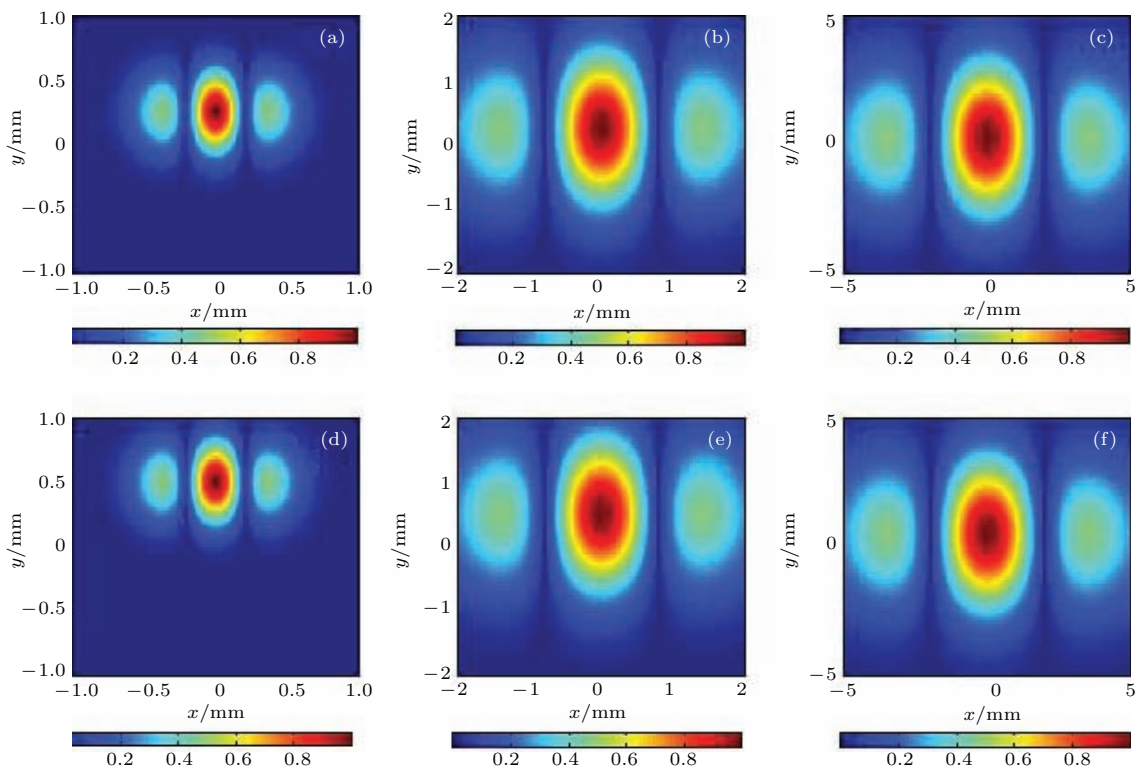


图 4 (网刊彩色) 部分相干径向偏振光束传输不同距离  $z$  后观测平面处  $\mu_{xx}$  模值分布 (a)—(c) (参考点为  $(0, 0.5w)$ ) (a)  $z = 0.5$  m, (b)  $z = 2$  m, (c)  $z = 5$  m; (d)—(f)(参考点为  $(0, 1w)$ ) (d)  $z = 0.5$  m, (e)  $z = 2$  m, (f)  $z = 5$  m

Fig. 4. (color online) Module value distribution of  $\mu_{xx}$  of Partially Coherent Radially Polarized Beam in different transmission distance. (a)—(c) for reference point  $(0, 0.5w)$ : (a)  $z = 0.5$  m, (b)  $z = 2$  m, (c)  $z = 5$  m; (d)—(f) for reference point  $(0, 1w)$ : (d)  $z = 0.5$  m, (e)  $z = 2$  m, (f)  $z = 5$  m.

图 4(a)—(c) 以  $(0, 0.5w)$  为参考点, (d)—(f) 以  $(0, 1w)$  为参考点, 且 (a)—(c) 与 (d)—(f) 传输距离一一对应, 依次为 0.5 m, 2 m 及 5 m. 由图可知, 参考点位于  $y$  轴的不同位置时, 随传输距离的增大,  $\mu_{xx}$  模值保持三峰两谷对称分布形式, 分布范围有所增大. 具体对比两个参考点下的  $\mu_{xx}$  模值分布可

知, 参考点在  $y$  轴上的移动, 仅引起  $\mu_{xx}$  模值分布对称中心的变化, 可见, 参考点位于  $y$  轴,  $\mu_{xx}$  模值分布对称中心随参考点移动, 随着传输距离的增大,  $\mu_{xx}$  模值分布范围增大, 分布形式不变.

关于参考点位于  $y$  轴不同位置对交叉干度  $\mu_{xy}$  模值分布的影响, 如图 5 所示.

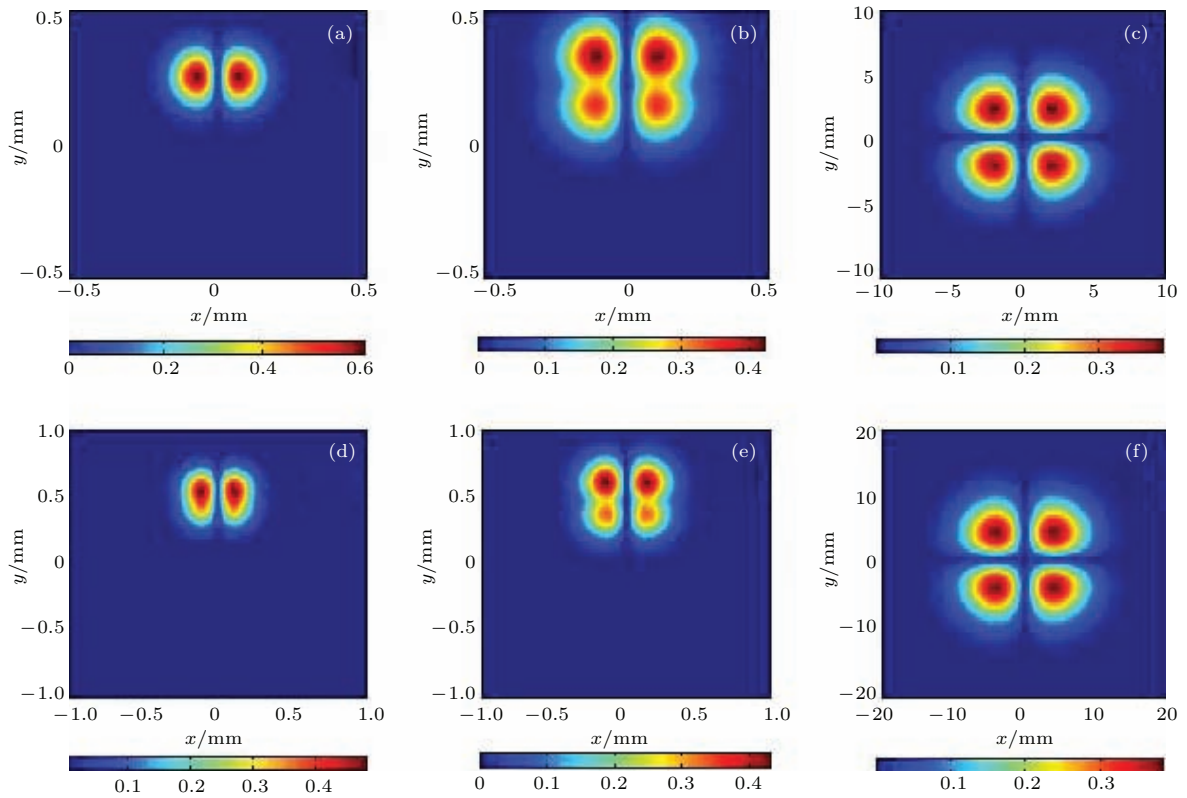


图5 (网刊彩色) 部分相干径向偏振光束传输不同距离  $z$  后观测平面处  $\mu_{xy}$  模值分布 其中(a)–(c) (参考点为  $(0, 0.5w)$ ) (a)  $z = 0.01$  m, (b)  $z = 0.2$  m, (c)  $z = 5$  m; (d)–(f) (参考点为  $(0, 1w)$ ) (d)  $z = 0.2$  m, (e)  $z = 0.3$  m, (f)  $z = 10$  m  
Fig. 5. (color online) Module value distribution of  $\mu_{xy}$  of Partially Coherent Radially Polarized Beam in different transmission distance. (a-c) for reference point  $(0, 0.5w)$ : (a)  $z = 0.01$  m, (b)  $z = 0.2$  m, (c)  $z = 5$  m; (d)–(f) for coherent point  $(0, 1w)$ : (d)  $z = 0.2$  m, (e)  $z = 0.3$  m, (f)  $z = 10$  m.

图5(a)–(c)以  $(0, 0.5w)$  为参考点, 传输距离依次为  $0.01$  m,  $0.2$  m 及  $5$  m, 而图5(d)–(f)以  $(0, 1w)$  为参考点, 且传输距离依次为  $0.2$  m,  $0.3$  m 及  $10$  m. 由图可知, 当参考点位于  $y$  轴, 随着传输距离的增大,  $\mu_{xy}$  模值逐渐由双峰形式沿  $y$  轴向下演化出另外两个峰值, 并最终形成关于参考点对称的四峰四谷分布形式. 当参考点位于  $(0, 0.5w)$ , 传输距离为  $0.2$  m 时如图5(b),  $\mu_{xy}$  模值已开始演化出四峰, 继续增大距离至  $5$  m 如图5(c), 基本实现关于  $(0, 0.5w)$  对称的四峰四谷分布形式; 对比参考点位于  $(0, 1w)$ , 传输距离为  $0.2$  m 时, 如图5(d),  $\mu_{xy}$  模值保持双峰分布形式, 继续增大距离至  $0.3$  m, 开始向四峰值过渡演化如图5(e), 最终当传输距离为  $10$  m 时如图5(f), 基本实现关于  $(0, 1w)$  对称的四峰四谷分布形式.

### 3.4 参考点位于其他位置

为使研究内容更具普适性, 研究参考点位于非原点、非  $x$  轴、 $y$  轴等特殊位置时  $\mu_{xx}$  与  $\mu_{xy}$  模值分

布规律具有一定的必要性. 选取参考位置为  $(0.1w, 0.1w)$ .

图6(a)–(d)为  $\mu_{xx}$  模值分布, 传输距离依次为  $0.01$  m,  $0.05$  m,  $0.1$  m 及  $0.8$  m, 图6(e)–(h)为  $\mu_{xy}$  模值分布, 传输距离依次为  $0.01$  m,  $0.03$  m,  $0.05$  m 及  $2$  m 由图可知, 对于自相干度  $\mu_{xx}$ , 随着传输距离的增加,  $\mu_{xx}$  模值分布从单主峰的分布形式如图6(a), 逐渐演化出左右两个次峰如图6(b), (c), 并最终形成关于  $(0.1w, 0.1w)$  对称的三峰两谷分布形式如图6(d), 同样地, 对于交叉相干度  $\mu_{xy}$ , 随着传输距离的增加,  $\mu_{xy}$  模值分布首先由一个峰值向下演化出第二个峰值如图6(e), (f), 随后沿  $x$  方向演化出另外两个侧峰值如图6(g), 并最终形成关于  $(0.1w, 0.1w)$  对称的四峰四谷分布形式. 可见当参考点位于其他位置时, 对于  $\mu_{xx}$ ,  $\mu_{xy}$ , 分别有模值分布从单主峰到三峰两谷及四峰四谷对称分布的演化过程, 也有对称位置在  $x$ ,  $y$  方向上的偏移, 这符合3.2节与3.3节中得到的研究规律.



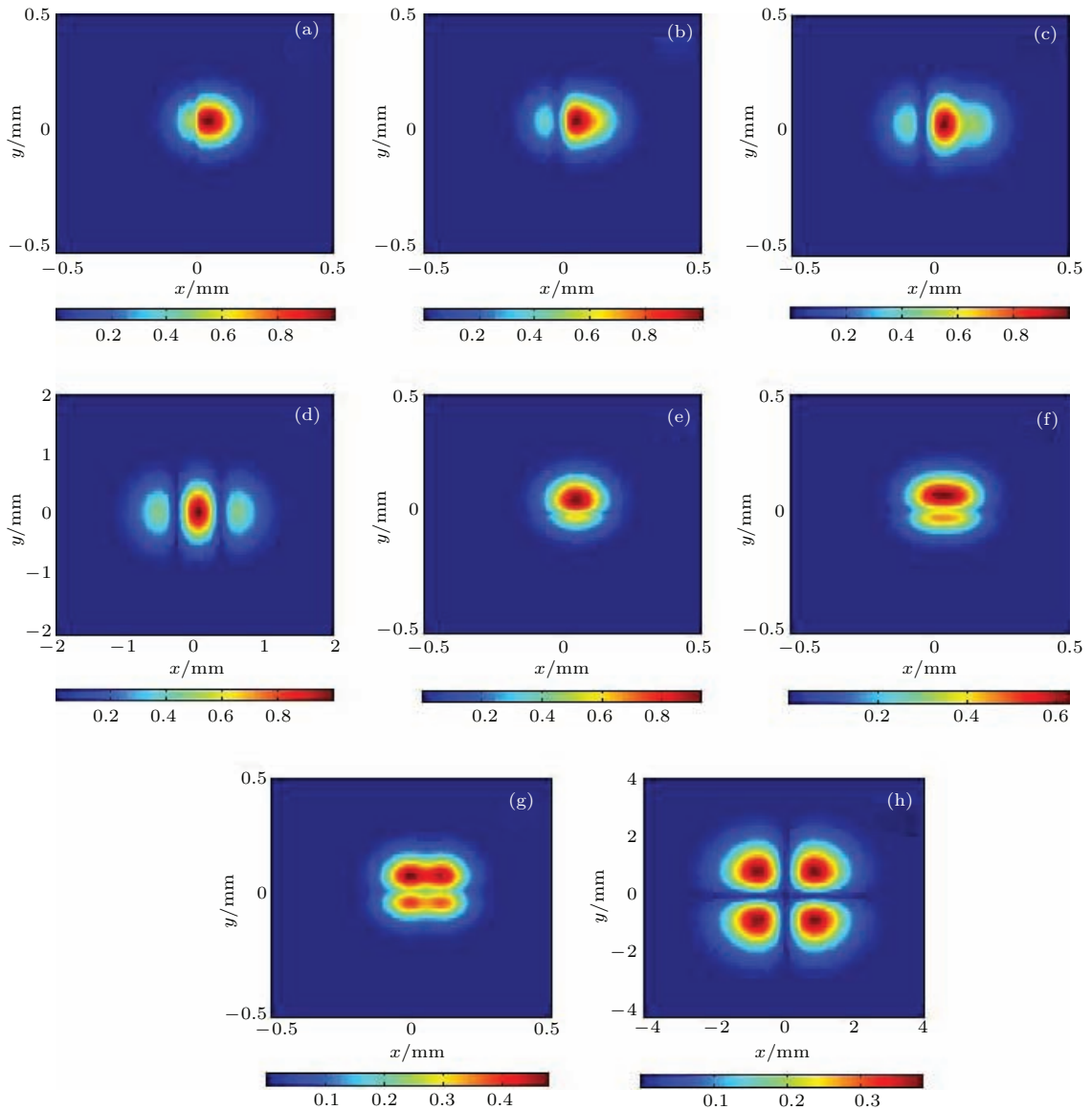


图6 (网刊彩色) 部分相干径向偏振光束传输不同距离 $z$ 后观测平面处 $\mu_{xx}$ ,  $\mu_{xy}$ 模值分布(参考点为 $(0.1w, 0.1w)$ ) (a)–(d)为 $\mu_{xx}$ 模值分布: (a)  $z = 0.01$  m, (b)  $z = 0.05$  m, (c)  $z = 0.1$  m, (d)  $z = 0.8$  m; (e)–(h)为 $\mu_{xy}$ 模值分布: (e)  $z = 0.01$  m, (f)  $z = 0.03$  m, (g)  $z = 0.05$  m, (h)  $z = 2$  m

Fig. 6. (color online) Module value distribution of  $\mu_{xx}$ ,  $\mu_{xy}$  of Partially Coherent Radially Polarized Beam in different transmission distance, reference point  $(0.1w, 0.1w)$ . (a)–(d) for  $\mu_{xx}$ : (a)  $z = 0.01$  m, (b)  $z = 0.05$  m, (c)  $z = 0.1$  m, (d)  $z = 0.8$  m; (e)–(h) for  $\mu_{xy}$ : (e)  $z = 0.01$  m, (f)  $z = 0.03$  m, (g)  $z = 0.05$  m, (h)  $z = 2$  m.

#### 4 结论及意义

基于 $2 \times 2$ 交叉谱密度矩阵的传输规律及部分相干光的相干与偏振的统一理论, 主要研究部分相干径向偏振光束在自由空间中传输, 不同参考点处, 随传输距离增大, 自相干度 $\mu_{xx}$ 及交叉相干度 $\mu_{xy}$ 模值分布规律. 研究表明, 对于不同参考点处, 随传输距离的增大,  $\mu_{xx}$ ,  $\mu_{xy}$ 模值分布范围增大, 并且最终将分别形成以参考点为对称中心的三

峰两谷, 四峰四谷对称分布形式. 当参考点位于原点时, 随传输距离的增大,  $\mu_{xx}$ ,  $\mu_{xy}$ 模值分别保持以参考点为中心的三峰两谷, 四峰四谷对称分布不变; 当参考点位于 $x$ 轴, 随传输距离增大,  $\mu_{xx}$ 模值由单峰分布向三峰两谷分布形式演化,  $\mu_{xy}$ 模值由双峰形式向四峰四谷对称分布形式演化, 完成演化所需的传输距离与参考点位置有关, 参考位置离原点越远, 完成演化所需要的传输距离越大; 当参考点位于 $y$ 轴上,  $\mu_{xx}$ 模值三峰两谷对称分布形式不变,  $\mu_{xy}$ 由双峰形式向四峰四谷对称分布形式演化,

参考位置离原点越远, 完成演化所需要的传输距离越大. 最后当参考位置位于其他位置, 随传输距离的增大,  $\mu_{xx}$ ,  $\mu_{xy}$  模值逐渐向最终对称分布形式演化, 同时对称中心随参考位置移动. 可以理解为, 参考点位于其他位置时,  $\mu_{xx}$ ,  $\mu_{xy}$  模值分布受参考点位于  $x$  轴及  $y$  轴上的分布规律的综合影响. 总体而言, 部分相干径向偏振光束传输后的相干度会演变为多峰结构, 这一特点和普通线偏振部分相干光束完全不同, 普通部分相干光束传输后的相干性保持单峰特征, 该研究对于对深入理解特殊光束的相干特性、探讨新的部分相干光源等方面能提供指导作用.

### 参考文献

- [1] Mushiake Y, Matsumura K, Nakajima N 1972 *Proc IEEE* **60** 1107
- [2] Quabis S, Dorn R, Leuchs G 2005 *Appl. Phys. B* **81** 597
- [3] Diehl D W, Schoonover R W, Visser T D 2006 *Opt. Express* **14** 3030
- [4] Salamin Y I 2006 *Opt. Lett.* **31** 2619
- [5] Deng D M, Guo Q, Wu L, Yang X 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 636
- [6] Deng D M, Guo Q 2007 *Opt. Lett.* **32** 2711
- [7] Gao Y, Liu S G 2010 *Laser & Optoelectronics Progress* **47** 101801 (in Chinese) [高宇, 刘书桂 2010 激光与光电子学进展 **47** 101801]
- [8] Yan J, Lu Y H, Wang P, Ming H 2010 *Acta. Opt. Sin.* **30** 3597 (in Chinese) [闫杰, 鲁拥华, 王沛, 明海 2010 光学学报 **30** 3597]
- [9] Kimura W D, Kim G H, Romea R D, Steinhauer L C, Pogoreisky I V, Kusche K P, Fernow R C, Wang X, Liu Y 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 546
- [10] Novotny L, Beversluis M R, Youngworth K S, Brown T G 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5251
- [11] Dorn R, Quabis S, Leuchs G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 233901
- [12] Ricklin J C, Davidson F M 2002 *J. Opt. Soc. Am. A* **19** 1794
- [13] Salem M, Shirai T, Sogariu A, Wolf E 2003 *Opt. Commun.* **216** 261
- [14] Aristide D, Stefan A 2003 *Opt. Lett.* **28** 10
- [15] Chen X W, Tang M Y, Ji X L 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 2607 (in Chinese) [陈晓文, 汤明玥, 季小玲 2008 物理学报 **57** 2607]
- [16] Ji X L 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 3953 (in Chinese) [季小玲 2010 物理学报 **59** 3953]
- [17] Cui S W, Chen Z Y, Hu K L, Pu J X 2013 *Acta. Phys. Sin.* **62** 094205 (in Chinese) [崔省伟, 陈子阳, 胡克磊, 蒲继雄 2013 物理学报 **62** 094205]
- [18] Wolf E 1995 *Optical coherence and quantum optics* (Cambridge: U. Press) p340–372
- [19] E. Wolf. 2007 *Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light* (Cambridge: U. Press) pp25–28, 179–181, 191–197

# Research on the coherence of partially coherent radially polarized beam during propagation\*

Chen Shun-Yi Ding Pan-Feng<sup>†</sup> Pu Ji-Xiong

(Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transform, College of Information Science and Engineering,  
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

( Received 22 December 2014; revised manuscript received 16 January 2015 )

## Abstract

Based on the generalized Huygens theory and the unified theory of coherence and polarization, study is made on the module value of complex degree of coherence of partially coherent radially polarized beam (PCRPB) which changes with transmission distance at different reference point. Results show that the module value distribution of the complex degree changing with the transmission distance is different for different reference point while PCRPB propagates in a free space. When the reference point is at the origin, with the increase of the transmission distance,  $\mu_{xx}$  and  $\mu_{xy}$  hold a symmetric distribution, and the distribution range increases. When the reference point is confined on the  $x$ -axis,  $\mu_{xx}$  changes from single peak to three peaks, and the two valleys lie symmetrically; and  $\mu_{xy}$  changes from two peaks to four peaks, and the four valleys lie symmetrically. The transmission distance of the evolution is related to the distance between the reference point and the origin: the closer the distance between the reference point and the origin, the shorter the transmission distance is needed to achieve the evolution process. When the reference point lies on the  $y$ -axis,  $\mu_{xx}$  holds a symmetric distribution, its distribution range increases, and  $\mu_{xy}$  changes from two peak values to four peaks and four valleys which are in symmetric form. The transmission distance is related to the spacing between the reference point and the origin, the closer the distance between the reference point and the origin: the shorter the transmission is needed to achieve the evolution process. In addition, when the reference point lies at other positions on the observation plane, the module value distribution of  $\mu_{xx}$  and  $\mu_{xy}$  is obtained by combining the distribution rules of reference point at  $x$ -axis and  $y$ -axis: i.e., when the reference point lies at other positions of the observation plane, the module values  $\mu_{xx}$  and  $\mu_{xy}$  can be composed of three peaks and four peaks with the increase of transmission distance, respectively.

**Keywords:** partially coherent radially polarized beam, complex degree of coherence, reference position

**PACS:** 42.25.Kb, 42.25.Ja, 42.25.Bs

**DOI:** [10.7498/aps.64.134201](https://doi.org/10.7498/aps.64.134201)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundations of China (Grant Nos. 61307001, 61178015) and the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant Nos. 2013J05094, 2014J05007).

† Corresponding author. E-mail: [dingpanfeng@163.com](mailto:dingpanfeng@163.com)