

# 矢量随机电磁光束的圆环衍射特性

林惠川<sup>1,2</sup> 蔡佳景<sup>2</sup> 蒲继雄<sup>1\*</sup> 饶连周<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)  
(<sup>2</sup>三明学院物理与机电工程学院, 福建 三明 365004)

**摘要** 基于惠更斯-菲涅耳衍射原理,以及相干与偏振的统一理论,研究了矢量随机电磁光束经圆环的衍射特性。研究表明在衍射场,随机电磁光束的光强分布、相干度以及偏振度分布都与圆环的拦截比以及光束的起始相干度有关。经衍射后随机电磁光束的光强分布出现奇特的链式分布,且链环存在逐级放大。入射光束起始相干度在  $x$  向与  $y$  向相等时,衍射光束的相干度和偏振度与入射光束是一样的,在衍射场光束的相干度和偏振度均匀分布。而当入射光束起始相干度在  $x$  向与  $y$  向不等时,衍射光束的相干度和偏振度与光强一样,在衍射场光轴上存在振荡,对比光强、相干度以及偏振度在衍射场光轴上的分布发现,在衍射场衍射光束光强分布为极大值时,相干度与偏振度反而为极小值。

**关键词** 相干光学;圆环衍射;矢量随机电磁光束;偏振度;相干度

**中图分类号** O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s202002

## Diffraction Properties of Vector Random Electromagnetic Beam Induced by Ring

Lin Huichuan<sup>1,2</sup> Cai Jiajing<sup>2</sup> Pu Jixiong<sup>1</sup> Rao Lianzhou<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)  
(<sup>2</sup>School of Physics and Mechanical & Electrical Technology, Sanming University, Fujian Sanming 365004, China)

**Abstract** Based on the Huygens-Fresnel principle and the unified theories of coherence and polarization of partially coherent beams, the diffraction properties of vector random electromagnetic beam transmitted through the ring aperture has been investigated. It is found that the intensity distribution, the degree of coherence and the degree of polarization of diffracted beams are related to the interception ratio of circular ring and initial coherence. The intensity distribution of vector random electromagnetic beam is chain structure by diffraction, and the chain structure gradually enlarges. If initial coherences of the incident beam in the  $x$  direction and  $y$  direction are equal, the degrees of coherence and polarization of the diffracted beam are same as intensity of light. On the other hand in the optical axis of the diffracted beams intensity distribution, degrees of the coherence and polarization exist oscillation. Moreover, when the intensity is maximum in optical axis of the diffracted beams, the degrees of coherence and polarization is minimal, and vice versa.

**Key words** coherence optics; ring diffraction; vector random electromagnetic beam; degree of coherence; degree of polarization

**OCIS codes** 260.1960; 050.1970; 030.1640

## 1 引言

随着激光技术的发展,对激光光束功率的要求也越来越高,而激光光束在功率提高的情况下其相干性也受到了影响<sup>[1,2]</sup>。高功率激光器输出的光束

多为多模光束,而这种高功率的多模激光光束已属于部分相干光束。另外,随着对部分相干光束研究的深入发现,相对于完全相干光束,部分相干光束的光强分布比较均匀,在大气光传输中部分相干光的

收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(60977068,61178015)和福建省教育厅 JK 类研究项目(JK2011054)资助课题。

作者简介: 林惠川(1984—),男,硕士,主要从事光束传输与变换等方面的研究。

\* 通信联系人。E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

发散程度要比完全相干光小,对散斑的灵敏度低。而基于此特点具有部分相干特性的随机电磁光束在遥感、跟踪、远距离通信和激光核聚变等应用中有着独特优势。因此,近年来对随机电磁光束的研究一直是一个热点<sup>[3~11]</sup>。另一方面,衍射作为一个基本的物理现象,在光学工程中有广泛的应用,基于此本文从相干与偏振的统一理论出发,研究了随机电磁光束经圆环的衍射效应,随机光束在衍射场的光强分布、相干度分布以及偏振度分布。

## 2 理论分析

一部分相干的矢量随机电磁光束经圆环衍射后沿着  $z$  方向传输,在图 1 所示的衍射模型中, $a$  为圆环的内圆半径而  $b$  为外圆半径。在圆环处,入射光束的空间坐标用  $\mathbf{r}$  表示, $\mathbf{R}$  则为衍射光束在衍射场的空间横向坐标。

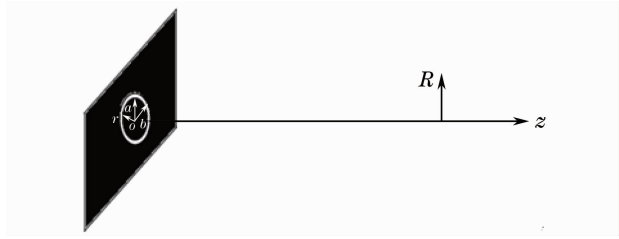


图 1 光束的圆环衍射示意图

Fig. 1 Illustrating the notation relating to diffraction of the electromagnetic beam

假设入射的矢量随机电磁光束的振幅统计平均为高斯型分布:

$$A_i(r, z = 0) = E_{i0} \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma_{i0}^2}\right) \exp(i\beta_i), \quad i = x, y \quad (1)$$

式中  $E_{i0}$  和  $\sigma_{i0}$  分别为入射光束  $i$  向偏振分量在源平面上的场振幅和光斑大小,  $\beta_i$  为光束的初相位,而光束源平面的横向空间位置坐标用  $r$  表示,即场分布与方位角无关。并且取入射随机电磁光束的相干系数也为高斯型:

$$C_{ij}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = B_{ij} \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{\delta_{ij}^2}\right], \quad (2)$$

式中  $\delta_{ij}$  为光束的相干长度,  $B_{ij}$  应满足关系式:

$$\begin{cases} B_{ij} \equiv 1, \text{当 } i = j \\ |B_{ij}| \leq 1, \text{当 } i \neq j \\ B_{ij}^* = B_{ji} \end{cases}, \quad (3)$$

根据交叉谱密度的定义

$$W_{ij}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \langle E_i^*(\mathbf{r}_1, \omega) E_j(\mathbf{r}_2, \omega) \rangle, \quad i = x, y, j = x, y \quad (4)$$

以及以上假设可知,入射矢量随机电磁光束在圆环上的交叉谱密度矩阵元为

$$W_{ij}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z = 0) = E_{i0} E_{j0} \exp\left(-\frac{r_1^2 + r_2^2}{\sigma_{j0}^2}\right) \times \exp\left[-\frac{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)}{\delta_{ij}^2}\right], \quad i, j = x, y \quad (5)$$

式中  $E_i(\mathbf{r}, \omega)$  为源平面  $\mathbf{r}$  处圆频率为  $\omega$ ,  $i$  向偏振的平均场分量,  $*$  表示复共轭,角括号  $\langle \rangle$  表示取系综平均。为简单起见在(5)式中取  $\sigma_{i0} = \sigma_{j0} = \sigma_0$ ,  $E_{i0} = E_{j0} = E_0$ ,  $B_{ij} = 1$ , 当  $i \neq j$ , 并且假设源平面上光束的交叉谱密度矩阵的斜对角元为零,即

$$W_{xy}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z = 0) = W_{yx}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z = 0) = 0. \quad (6)$$

根据广义惠更斯-菲涅耳衍射积分,衍射光束的交叉谱密度矩阵元为

$$W_{ij}(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, z) = \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2 \iint_{z=0} W_{ij}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z = 0) \exp\left\{-i\frac{k}{2z}[(\mathbf{R}_1 - \mathbf{r}_1)^2 - (\mathbf{R}_2 - \mathbf{r}_2)^2]\right\} d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2, \quad i, j = x, y \quad (7)$$

式中  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$  分别为光束在衍射场的空间横向坐标,为矢量。将(5)式所示的矢量随机电磁光束代入(7)式中,将  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$  展开成标量形式则有

$$W_{jj}(R_1, R_2, \theta_1, \theta_2, z) = I_{j0} \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2 \exp\left[-i\frac{k}{2z}(R_1^2 - R_2^2)\right] \iiint \exp\left[-\left(\frac{1}{\sigma_{j0}^2} + \frac{1}{\delta_{jj}^2}\right)(r_1^2 + r_2^2)\right] \times \exp\left[-\frac{ik}{2z}(r_1^2 - r_2^2)\right] \exp\left[\frac{ikr_1 R_1}{z} \cos(\theta_1 - \phi_1)\right] \exp\left[-\frac{ikr_2 R_2}{z} \cos(\theta_2 - \phi_2)\right] \times \exp\left[\frac{1}{\delta_{jj}^2} 2r_1 r_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)\right] r_1 r_2 dr_1 dr_2 d\phi_1 d\phi_2, \quad j = x, y \quad (8)$$

式中  $I_{j0} = E_{j0}^2$ ,  $R_1, R_2, \theta_1, \theta_2$  为衍射光束在传输距离为  $z$  处的空间横向坐标。对(8)式进行积分化简可得到

$$W_{jj}(R_1, R_2, \theta_1, \theta_2, z) = I_{j_0} \left( \frac{k}{z} \right)^2 \exp \left[ -i \frac{k}{2z} (R_1^2 - R_2^2) \right] \sum_{l=-\infty}^{\infty} \int_a^b \int_a^b \exp \left[ -\frac{ik}{2z} (r_1^2 - r_2^2) \right] \exp[-il(\theta_1 - \theta_2)] \times \\ \exp \left[ -\left( \frac{1}{\sigma_{j_0}^2} + \frac{1}{\delta_{jj}^2} \right) (r_1^2 + r_2^2) \right] J_l \left( \frac{kr_1 R_1}{z} \right) J_l \left( \frac{kr_2 R_2}{z} \right) I_l \left( \frac{1}{\delta_{jj}^2} 2r_1 r_2 \right) r_1 r_2 dr_1 dr_2, \quad j = x, y \quad (9)$$

(9)式为矢量随机电磁光束在衍射场的交叉谱密度矩阵元,而由衍射场光束的交叉谱密度矩阵元以及相干与偏振的统一理论可知,矢量随机电磁光束经圆环衍射后,在衍射场的光强分布、相干度分布以及偏振度分布为

$$I(R_1, R_2, \theta_1, \theta_2, z) = W_{xx}(R_1, R_2, \theta_1, \theta_2, z) + W_{yy}(R_1, R_2, \theta_1, \theta_2, z), \quad (10)$$

$$\mu(R_1, R_2, \theta_1, \theta_2, z) =$$

$$\frac{W_{xx}(R_1, R_2, \theta_1, \theta_2, z) + W_{yy}(R_1, R_2, \theta_1, \theta_2, z)}{\sqrt{W_{xx}(R_1, R_1, \theta_1, \theta_1, z) + W_{yy}(R_1, R_1, \theta_1, \theta_1, z)} \sqrt{W_{xx}(R_2, R_2, \theta_2, \theta_2, z) + W_{yy}(R_2, R_2, \theta_2, \theta_2, z)}}, \quad (11)$$

$$P(R, R, \theta, \theta, z) = \frac{|W_{xx}(R, R, \theta, \theta, z) - W_{yy}(R, R, \theta, \theta, z)|}{W_{xx}(R, R, \theta, \theta, z) + W_{yy}(R, R, \theta, \theta, z)}. \quad (12)$$

将(9)式分别代入(10)~(12)式,则衍射场,随机电磁光束的光强、相干度以及偏振度便可计算得到。而从(9)式可知,圆孔的衍射效应将对入射光束的光强、相干度以及偏振度产生影响,并且入射光束的起始相干度也将对衍射场,矢量随机电磁光束的光强、相干度以及偏振度产生影响。从下面的数值模拟结果可以清晰地看到,不同参数下衍射光束的衍射特性的变化情况。

### 3 数值计算结果

由理论分析可知,(9)~(12)式可以计算出矢量

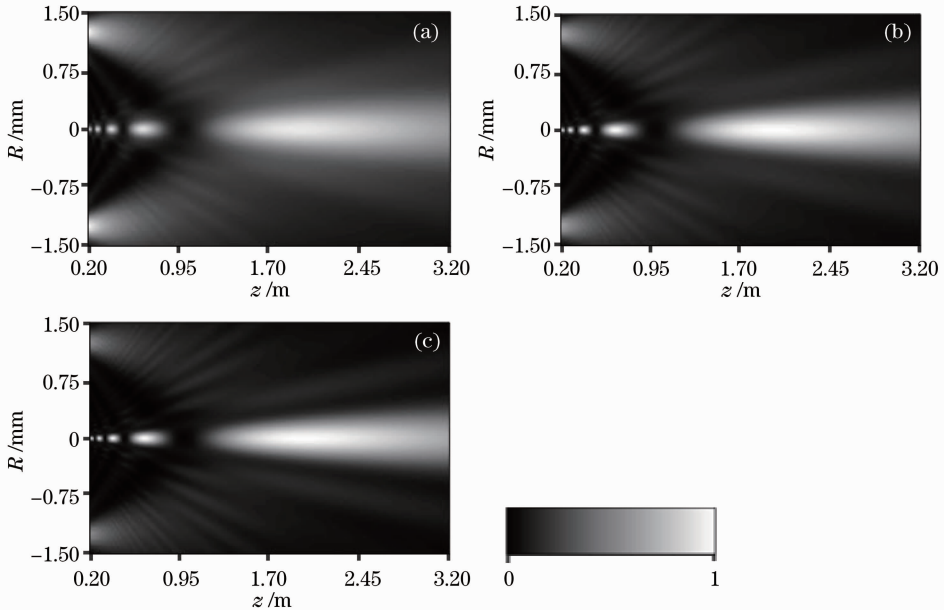


图2 不同起始相干长度下衍射光束光强的纵向分布。(a)  $\delta_{xx} = 3 \text{ mm}, \delta_{yy} = 1 \text{ mm}$ ; (b)  $\delta_{xx} = 3 \text{ mm}, \delta_{yy} = 2 \text{ mm}$ ; (c)  $\delta_{xx} = 3 \text{ mm}, \delta_{yy} = 3 \text{ mm}$

Fig. 2 Intensity distributions in the diffraction field for different values of  $\delta_{xx}$  and  $\delta_{yy}$ . (a)  $\delta_{xx} = 3 \text{ mm}, \delta_{yy} = 1 \text{ mm}$ ; (b)  $\delta_{xx} = 3 \text{ mm}, \delta_{yy} = 2 \text{ mm}$ ; (c)  $\delta_{xx} = 3 \text{ mm}, \delta_{yy} = 3 \text{ mm}$

随机电磁光束经圆孔的衍射特性。下面将通过数值计算进一步研究衍射光束在衍射的光强、相干度以及偏振度的分布情况。而在下面的数值计算中,矢量随机电磁光束的起始偏振度取为 0.5,入射随机电磁光束的波长为  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,入射光斑大小为  $\sigma_0 = 5 \text{ mm}$ 。

#### 3.1 矢量随机电磁光束起始相干度对衍射特性的影响

图2为不同起始相干度下,衍射光束光强的纵向分布。计算参数为:圆孔内半径  $a = 1.0 \text{ mm}$ ,外半径  $b = 1.5 \text{ mm}$ 。从图示的光强分布可以看出,经

衍射后矢量随机电磁光束在衍射场呈现逐级放大的链式分布,而起始相干度越好即  $\delta_{yy}$  值越大,则这种逐级放大结构越明显。在这种链式结构的光强分布中,沿着轴向光强存在局域空心,且这种局域空心不止存在一个,在沿着轴向方向空心的尺寸也有逐级放大。

图 3 为不同起始相干度下,衍射光束偏振度的纵向分布。计算参数与图 2 相同。由计算结果可知

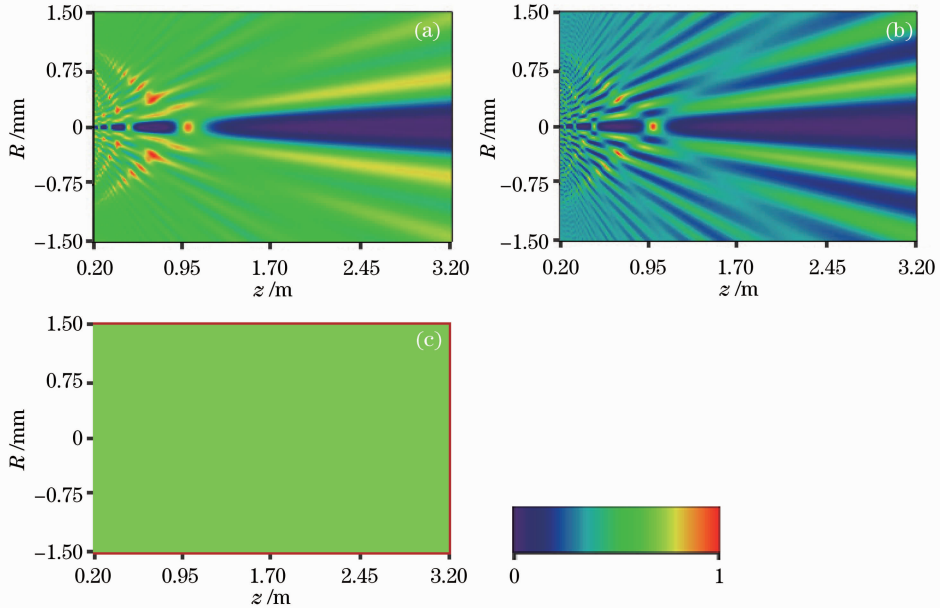


图 3 不同起始相干度下衍射光束偏振度的纵向分布。(a)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=1\text{ mm}$ ; (b)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=2\text{ mm}$ ; (c)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=3\text{ mm}$

Fig. 3 Distribution of degree of polarization in the diffraction field for different values of  $\delta_{xx}$  and  $\delta_{yy}$ .

(a)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=1\text{ mm}$ ; (b)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=2\text{ mm}$ ; (c)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=3\text{ mm}$

图 4,5 为衍射光束在衍射场距离圆环 1 m 处,光强与偏振度的径向分布。计算参数为:圆孔内半径  $a=1.0\text{ mm}, b=1.5\text{ mm}$ ,衍射场传输距离  $z=1\text{ m}$ 。由计算结果可以看出,衍射光束的光强与偏

经圆孔衍射后,当起始相干度在  $x$  向与  $y$  向不同时,矢量随机电磁光束的偏振度在光轴上存在振荡,偏振度在光轴上的分布并非为一定值,同样,在由图 3(a), (b)也可看出,沿着径向衍射光束的偏振度也存在振荡。而当起始偏振度在  $x$  向与  $y$  向相同时,衍射光束的偏振度并没有因衍射而发生变化,而是与起始偏振度相同。

振度沿着径向都有存在环状分布,而随着  $y$  向起始相干长度的增大光强环状分布越明显,中心的空心越明显。由图 4 与图 5(a), (b)可知,对比光强与偏振度分布,在光强为零的中心点上,衍射光束的偏振

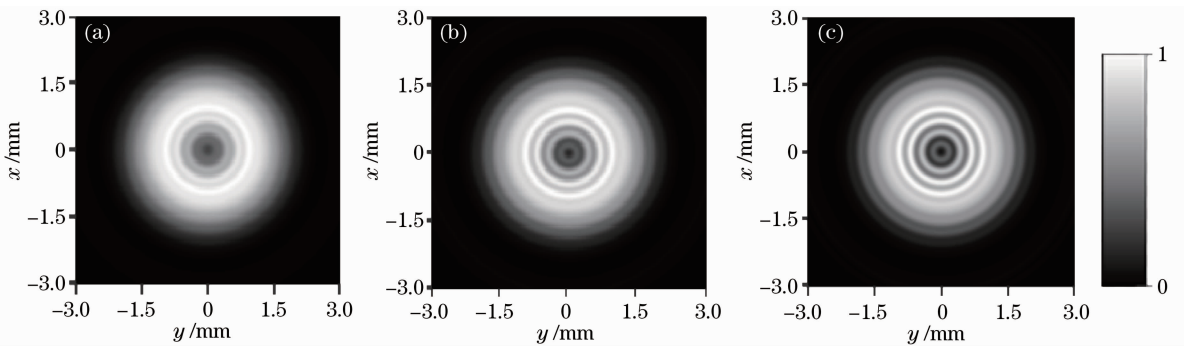


图 4 不同起始相干度下衍射光束光强的横向分布。(a)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=1\text{ mm}$ ; (b)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=2\text{ mm}$ ; (c)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=3\text{ mm}$

Fig. 4 Intensity distribution in transverse field of diffraction field for different values of  $\delta_{xx}$  and  $\delta_{yy}$ .

(a)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=1\text{ mm}$ ; (b)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=2\text{ mm}$ ; (c)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=3\text{ mm}$

度为一极大值,而这也可以从图 6(a),(b)对比中看出。当起始相干长度在  $x$  向与  $y$  向相同时,衍射光束的偏振度与起始偏振度均为 0.5。

图 6 为衍射光束光强与偏振度沿着光轴的曲线分布,图 7 为衍射光束相干度的径向与轴向分布。计算参数同图 4,5。由图 6,7 可知,在衍射场矢量随机电磁光束的光强、偏振度以及相干度在轴向都存在振荡。而对比图 6(a),(b)以及图 7(b)可知,在

光轴上衍射光束光强的弱的位置,其相干度与偏振度都很大。比如在传输距离为 0.5 m 以及 1.0 m 附近,光强值基本趋于零,而此位置的相干度与偏振度都超过了 0.6。而在 0.5~1.0 m 之间,光强有一极大值,而在此位置相干度与偏振度都比较小。图 7(a)显示,在衍射场矢量随机电磁光束的相干度沿着径向存在振荡,相对于中心点沿着径向方向相干度并非持续减小。

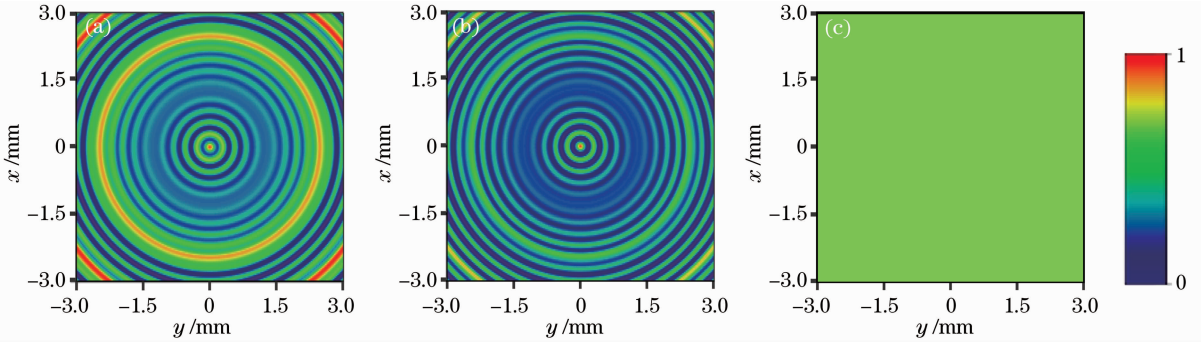


图 5 不同起始相干度下衍射光束偏振度的横向分布。(a)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=1\text{ mm}$ ; (b)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=2\text{ mm}$ ; (c)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=3\text{ mm}$

Fig. 5 Degree of polarization in transverse field of diffraction field for different values of  $\delta_{xx}$  and  $\delta_{yy}$ .

(a)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=1\text{ mm}$ ; (b)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=2\text{ mm}$ ; (c)  $\delta_{xx}=3\text{ mm}, \delta_{yy}=3\text{ mm}$

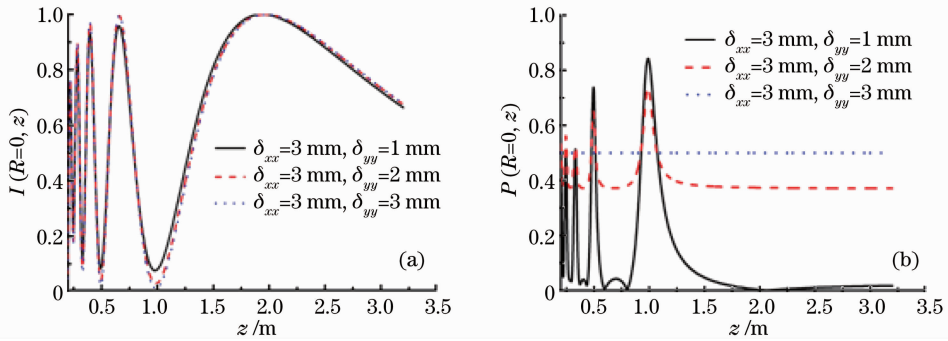


图 6 不同起始相干度下衍射光束沿光轴的(a)光强与(b)偏振度分布

Fig. 6 Curve of (a) intensity distribution and (b) degree of polarization along  $z$  direction for different values of  $\delta_{xx}$  and  $\delta_{yy}$

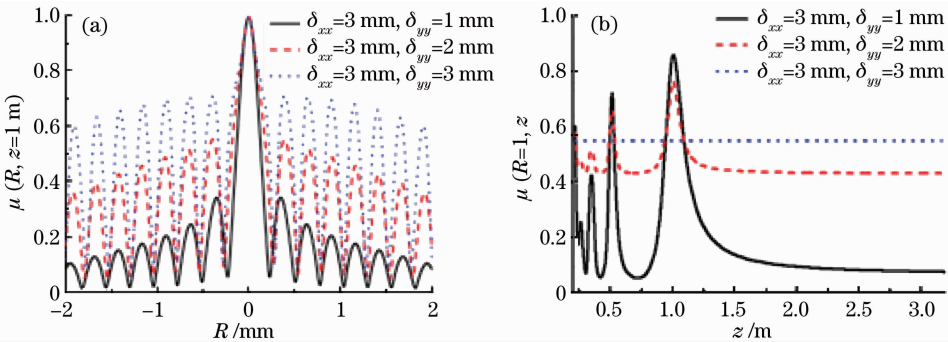


图 7 不同起始相干度下衍射光束的相干度分布。(a)相干度的径向分布;(b)相干度沿光轴的分布

Fig. 7 Curve of coherence distribution in diffraction field for different values of  $\delta_{xx}$  and  $\delta_{yy}$ .

(a) Transverse distribution; (b) axial distribution

### 3.2 圆孔内外半径对衍射光束的影响

图 8 为不同衍射孔径下,衍射光束的光强、相干度以及偏振度的曲线分布。其中图 8(a),(b)与(d)分别为光强、偏振度以及相干度的轴向分布,计算参数为: $\delta_{xx}=3\text{ mm},\delta_{yy}=1\text{ mm}$ 。图 8(c)为相干度在衍射场距离圆孔 1 m 处的径向分布。从图中的计算结果可以看出,圆环拦截比(圆环内外半径的比)

对衍射光束的光强、偏振度以及相干度都有比较大的影响。在衍射场,光轴上的光强、偏振度以及相干度的极值点位置,会随着圆环拦截比的变化而发生变化。如图 8(a)中的光强分布曲线,在衍射场位置为 1.5 m 处,拦截比为 2/3 时光强值极大,而拦截比为 1/3 时光强极小。

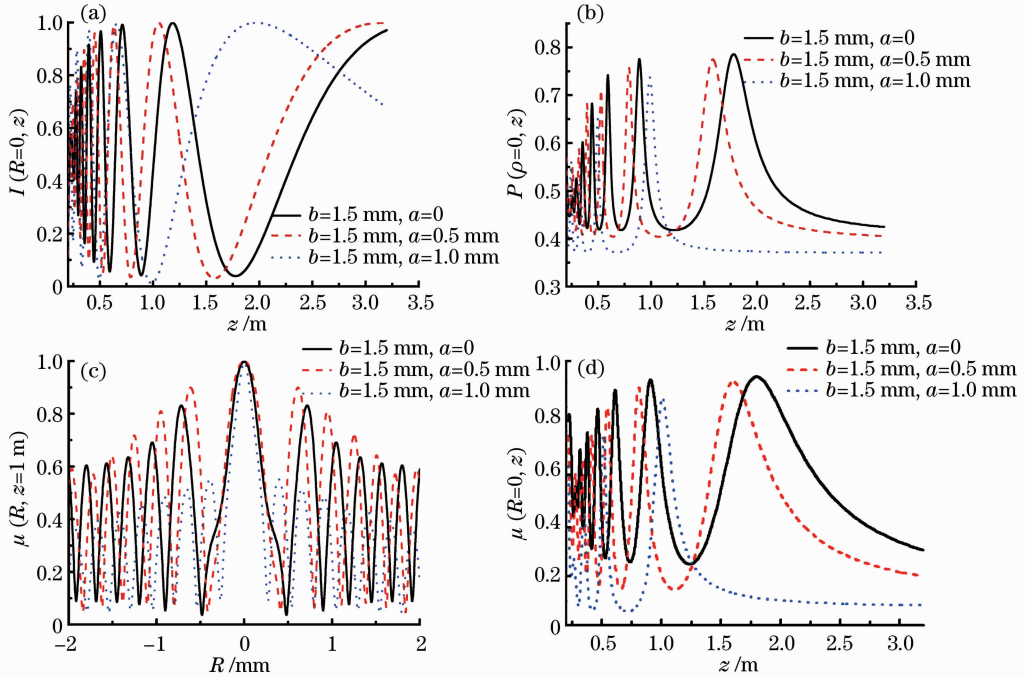


图 8 不同衍射孔径下衍射光束的光强,偏振度以及相干度分布。(a)光强的轴向分布;(b)偏振度的轴向分布;(c)相干度的径向分布;(d)相干度的轴向分布

Fig. 8 Curve of intensity distribution, degree of polarization, coherence distribution in diffraction field for different apertures. (a) Intensity distribution along  $z$  axial; (b) degree of polarization along  $z$  axial; (c) coherence distribution along radial direction; (d) coherence distribution along  $z$  axial

## 4 结 论

基于广义惠更斯-菲涅耳原理以及相干与偏振的统一理论,研究了矢量随机电磁光束经圆环的衍射。研究表明经圆环衍射后,衍射光束的光强在衍射场呈现逐级放大的链式分布。而当起始相干长度在  $x$  向与  $y$  向不同时,衍射光束的偏振度在轴向也存在振荡。对比衍射光束光强的径向分布与偏振度的径向分布,以及光强、偏振度与相干度的轴上分布时发现,在衍射光强值为极小时衍射光束的偏振度与相干度反而为极大值。而当起始相干度在  $x$  向与  $y$  向相同时,衍射光束的相干度与偏振度在衍射场不会发生变化,即保持为衍射前的起始值,且大小与空间位置坐标无关。

## 参 考 文 献

- Zhou Pu, Wang Xiaolin, Ma Yanxing *et al.*. Beam quality of partially coherent combining of laser array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1066~1070  
周 朴, 王小林, 马阎星 等. 激光阵列相干合成的光束质量[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1066~1070
- Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Effect of partially coherence of high power fiber laser on coherent combination[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19** (7): 1254~1256  
周 朴, 侯 静, 陈子伦 等. 高功率光纤激光的时间部分相干性对相干合成的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19** (7): 1254~1256
- O. Korotkova, E. Wolf. Change in the state of polarization of a random electromagnetic beam on propagation[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **246**(1-3): 35~43
- E. Wolf. Correlation-induced changes in the degree of random electromagnetic beams on propagation [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(13): 1078~1180
- Chen Ziyang, Pu Jixiong. Degree of polarization in Young's double-slit interference experiment formed by stochastic

- electromagnetic beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2007, **24**(7): 2043~2048
- 6 Pu Jixiong, S. Nemoto, Liu Xiaoyun. Beam shaping of focused partially coherent beams by use of the spatial coherent effect[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(28): 5281~5286
- 7 Wang Tao, Pu Jixiong. Propagation of Bessel-correlated partially coherent hollow beams in the turbulent atmosphere[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(11): 6754~6759  
王涛, 蒲继雄. 部分相干空心光束在湍流介质中的传输特性[J]. *物理学报*, 2007, **56**(11): 6754~6759
- 8 Ji Xiaoling. Effective radius of curvature of partially coherent flat-topped beam propagating through atmospheric turbulence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(6): 3953~3956  
季小玲. 部分相干平顶光束通过湍流大气传输的等效曲率半径[J]. *物理学报*, 2010, **59**(6): 3953~3956
- 9 Li Binzhong, Lü Baida. Beam combination characteristics of partially coherent beams[J]. *Chinese. J. Laser*, 2009, **36**(9): 2337~2340  
李宾中, 吕百达. 部分相干光光束合并的光束传输变换特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2337~2340
- 10 Lin Huichuan, Tao Hua, He Meng *et al.*. Spatial coherence of high-power single-color LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0323003  
林惠川, 陶华, 贺萌等. 大功率单色LED的空间相干特性[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0323003
- 11 Li Binzhong, Lü Baida. Beam combination characteristics of partially coherent beams[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2337~2340  
李宾中, 吕百达. 部分相干光光束合并的光束传输变换特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2337~2340

栏目编辑: 宋梅梅