

doi: 10.3788/gzxb20164502.0226003

随机电磁光束的广义斯托克斯参数实验测量

罗松杰¹, 刘永欣¹, 蒲继雄¹, 高曾辉²

(1 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

(2 宜宾学院, 四川 宜宾 644000)

摘 要:利用杨氏双缝和马赫曾德干涉提出一种检测随机电磁光束的广义斯托克斯参数的实验方法. 部分相干光通过杨氏双缝后, 用光阑、半波片和偏振片组成的马赫曾德干涉光路进行处理, 检测干涉条纹的相干度和单个缝的光场强度, 得到光束的交叉谱密度矩阵, 进而得到光束的广义斯托克斯参数. 实验结果表明, 同方向偏振的光分量的空间相干度高于正交偏振方向的光分量. 该方法可用于研究光束传播过程中的偏振特性和相干特性的变化.

关键词:广义斯托克斯参数; 电场交叉谱密度矩阵; 杨氏双缝; 马赫曾德干涉; 部分相干光

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)02-0226003-4

Experimental Measurement of the Generalized Stokes Parameters of a Random Electromagnetic Beam

LUO Song-jie¹, LIU Yong-xin¹, PU Ji-xiong¹, GAO Zeng-hui²

(1 College of Information Science and Engineering, Institute of Optics and Photonics, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

(2 College of Yibin, Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: Utilizing the Young's double slits and Mach-Zehnder interferometer, a experimental method was proposed to measure the generalized Stokes parameters of a random electromagnetic beam. After propagating through the Young's double slits, the partially coherent beam was processed by a Mach-Zehnder interferometer consisting of apertures, quarter-wave plates and polarizers. The electric cross-spectral density matrix was obtained by detecting the coherence degree of interference fringe and the density of each single slit, so that the generalized Stokes parameters could be obtained. The experiment result shows that the spectral degree of coherence for copolarized cases is higher than that for cross-polarized cases. This method will help us determine the change of the polarization and coherence of the light in propagation by detecting the change of the generalized Stokes parameters.

Key words: Generalized Stokes parameters; Electric cross-spectral density matrix; Young's double slits; Mach-Zehnder interferometer; Partially coherent light

OCIS Codes: 260.2110; 030.1640; 070.1675; 080.1665; 140.3295

0 引言

相干和偏振一直被作为两个不相关的主题分别进行讨论研究. 然而, 它们却有相同的物理现象, 即光束涨落之间的相关性. 相干与空间中两个或多个点的电场涨落有关, 而偏振与同一点电场分量的涨落有关.

2003年, Emil Wolf 提出了随机电磁光束的相干和偏振统一的理论^[1], 阐明了电磁光束的相干和偏振之间存在的直接联系, 并理论上分析光束传输过程中的偏振度、相干度以及光谱的计算方法^[2-4]. 计算偏振度、相干度以及光谱的重要前提是已知描述电场涨落的 2×2 电场交叉谱密度矩阵^[5-6]. 为此, Emil Wolf 根据杨氏

基金项目:国家自然科学基金项目 (No. 61275203), 华侨大学高层次人才科研启动项目 (No. 12BS231), 福建省自然科学基金 (No. 2014J05007) 和华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助

第一作者:罗松杰 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光束的传输与变换. Email: songjieluo@sina.com

导师:蒲继雄 (1962-), 男, 教授, 主要研究方向为光束的传输与变换. Email: jixiong@hqu.edu.cn

收稿日期:2015-08-14; **录用日期:**2015-09-21

<http://www.photon.ac.cn>

双缝实验,用偏振片和旋转片测量随机光束电场交叉谱密度矩阵的四个矩阵元^[7].与两个空间点有关的广义斯托克斯参数(Generalized Stokes Parameters)也取决于电场交叉谱密度矩阵^[8],同电场交叉谱密度矩阵一样,可用于研究电磁光束的相干和偏振.2008年,H. C. Kamdpal提出了测量光束电场交叉谱密度矩阵和广义斯托克斯参数的实验方法,并进行了实验测量^[9],但该实验是对激光直接进行检测,对光路的搭建要求较高并会产生较多背景光,在普通实验室较难实现.2008年,Du Xinyue利用ABCD光学系统计算了随机电磁光束在大气中传播时广义斯托克斯参量的改变^[10].2009年,H. C. Kamdpal指出,可直接通过实验测量普通斯托克斯参数的方法来确定光束的广义斯托克斯参数,但采用的光束为完全相干的激光束^[11].2010年,Mei Zhaorong利用三维广义斯托克斯参数研究了光束传播过程中的相干特性和偏振特性,结果显示三维斯托克斯参数可以更为精确地描绘光束特性^[12].2010年,Li. J研究了大气湍流中随机涡旋光束的广义斯托克斯参数的变化,解释了大气湍流对斯托克斯参数的影响^[13].

本文提出一种对随机电磁光束的广义斯托克斯参数进行实验测量的方法,利用杨氏双缝^[14]和马赫曾德干涉方法通过测量电场交叉谱密度矩阵的四个矩阵元确定其广义斯托克斯参数,光路中加入散射介质,降低了光束的相干性,使实验更具代表性,简化了光路,提高了实验的精确度.

1 理论推导

考虑一任意准单色的电磁光束在Z方向上传输,其 2×2 电场交叉谱密度矩阵可表示为^[1]

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

式中, $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 分别是Z平面上两点的坐标矢量,

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

其中,尖括号表示系综平均,星号表示复共轭.

该光束电场的谱相干度可表示为^[2]

$$\eta(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \frac{\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)}{\sqrt{\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1, \omega)} \sqrt{\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_2, \omega)}} \quad (3)$$

式中,Tr表示矩阵的迹.光谱密度等同于该点的平均电场能量密度,所以 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 两点的光谱密度分别表示为^[7]

$$\begin{aligned} S(\mathbf{r}_1, \omega) &= \text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1, \omega) \\ S(\mathbf{r}_2, \omega) &= \text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_2, \omega) \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得^[7]

$$\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \sqrt{S(\mathbf{r}_1, \omega)} \sqrt{S(\mathbf{r}_2, \omega)} \eta(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \quad (5)$$

考虑如图1所示的双缝干涉,其中 Π_1 和 Π_2 是偏

振片, Q_1 和 Q_2 为不透明平面上的两个针孔,P点在观察平面上.假设偏振方向为x方向的偏振片 Π_1 与 Π_2 放置在小孔面前,从小孔出射光的交叉谱密度矩阵为

$$\mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \begin{bmatrix} \langle E_x^*(\mathbf{r}_1, \omega) E_x(\mathbf{r}_2, \omega) \rangle & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = W_{xx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \quad (7)$$

即透射光交叉谱密度矩阵的迹是入射光在小孔处电场交叉谱矩阵的第一个对角元.

将式(7)代入式(5)可得

$$W_{xx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \sqrt{S_x(\mathbf{r}_x, \omega)} \sqrt{S_y(\mathbf{r}_y, \omega)} \eta_{xx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \quad (8)$$

相似地,如果偏振片只能透射y方向的分量,那么可得

$$W_{yy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \sqrt{S_y(\mathbf{r}_1, \omega)} \sqrt{S_y(\mathbf{r}_2, \omega)} \eta_{yy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \quad (9)$$

在 Q_1 处放置偏振方向为x方向的偏振片,在 Q_2 处放置偏振方向为y的偏振片,在 Q_2 后放置一个半波片使偏振方向旋转 90° ,此时,出射光的交叉谱密度矩阵可以表示为

$$\mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \begin{bmatrix} \langle E_x^*(\mathbf{r}_1, \omega) E_y(\mathbf{r}_2, \omega) \rangle & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

同样可得

$$\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = W_{xy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \quad (11)$$

再将式(11)代入式(5)可得

$$W_{xy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \sqrt{S_x(\mathbf{r}_1, \omega)} \sqrt{S_y(\mathbf{r}_2, \omega)} \eta_{xy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \quad (12)$$

同理,在 Q_1 处放置偏振方向为y方向的偏振片,在 Q_2 处放置偏振方向为x的偏振片,在 Q_2 后放置一个半波片使偏振方向旋转 90° 可得

$$W_{yx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \sqrt{S_y(\mathbf{r}_1, \omega)} \sqrt{S_x(\mathbf{r}_2, \omega)} \eta_{yx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \quad (13)$$

因此利用经过双缝的不同偏振分量可得到电场交叉谱密度矩阵的各矩阵元可归纳为^[7]

$$W_{ij}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \sqrt{S_i(\mathbf{r}_1, \omega)} \sqrt{S_j(\mathbf{r}_2, \omega)} \eta_{ij}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega), i=x, y, j=x, y \quad (14)$$

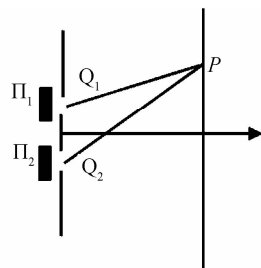


图1 测量交叉谱密度矩阵的对角元素的双缝光路示意图
Fig. 1 Arrangement of double slits to measure the diagonal elements of the cross-spectral density matrix

与取决于一个空间点的普通斯托克斯参数不同,广义斯托克斯参数取决于两个空间点,可表示为^[7]

$$\begin{cases} S_0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = W_{xx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) + W_{yy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \\ S_1(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = W_{xx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) - W_{yy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \\ S_2(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = W_{xy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) + W_{yx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \\ S_3(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = i[W_{yx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) - W_{xy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)] \end{cases} \quad (15)$$

2 实验研究

图 2 为实验光路的示意图,光源是波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器(出射光是随机偏振光),光束通过放大系数为 6 倍的扩束系统,在两透镜的公共焦点处放置一块匀速旋转的毛玻璃,进而产生随机电磁光束,之后光束经过杨氏双缝和马赫曾德干涉光路.在马赫曾德干涉的两束光路上分别加入光阑,光阑 A_1 仅拦截光束 1,光阑 A_2 拦截光束 2,剩余的两束光分别经过偏振片与半波片,通过第二个分光镜后在光谱仪观察干涉图样,分光镜与光谱仪的距离是 50 cm.

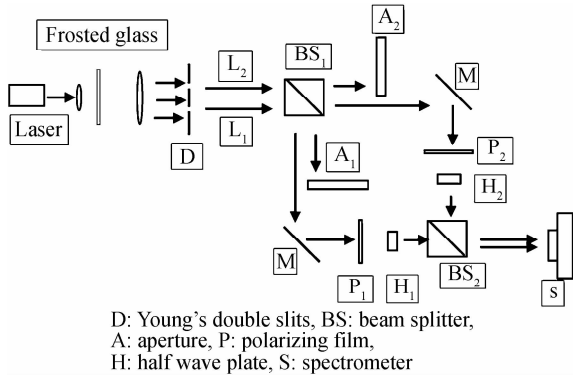


图 2 双缝干涉系统的光路示意图

Fig. 2 The schematics of the experimental setup

设光矢量振动的水平方向为 x 方向,垂直方向为 y 方向,为了测量交叉谱矩阵的 $W_{xx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ 分量,选取偏振片 P_1 和偏振片 P_2 的方向以及半波片的光轴方向与 x 方向相同(半波片有消光作用,所以实验过程中始终放入半波片),两束 x 方向的偏振光在光谱仪上产生干涉条纹,选取并测量中央亮条纹的最大光谱密度 S_{\max} 与相邻暗条纹的最小光谱密度 S_{\min} ,之后用光阑 A_1 挡住下侧全部光束,使下侧的光路不再有光通过,检测单个缝在原亮条纹处的光谱密度 $S_x(\mathbf{r}_2, \omega)$. 对上侧光路实行同样的操作,测得光谱密度 $S_x(\mathbf{r}_1, \omega)$. 同理,选取两个偏振片的方向以及半波片的光轴方向与 y 方向相同,可测量得到交叉谱矩阵的 $W_{yy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ 分量.

测量交叉谱密度矩阵的 $W_{xy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ 分量时,偏振片 P_1 取 x 方向,偏振片 P_2 选 y 方向,半波片 H_1 的光轴方向与 x 方向成 45° 角,半波片 H_2 的光轴方向与 y 方向相同,光束通过偏振片 P_1 后,偏振方向为 x 方向,经过半波片 H_1 ,偏振方向偏转 90° 变为 y 方向,光束经过偏振片 P_2 和半波片 H_2 后,偏振方向为 y 方向,两束光在光谱仪上产生干涉条纹,选取并测量中央亮条纹光谱密度的最大值 S_{\max} 和相邻暗条纹光谱密度最小值 S_{\min} ,之后用光阑 A_1 挡下侧全部光束,使下侧的光路不再有光束通过,检测单个缝在原亮条纹处的光谱密度 $S_y(\mathbf{r}_2, \omega)$. 对上侧光路实现同样的操作,测得光谱密度 $S_y(\mathbf{r}_1, \omega)$. 同理,偏振片 P_1 取 y 方向,偏振片

P_2 选 x 方向,半波片的光轴方向不变,可测量得到交叉谱密度矩阵的 $W_{yx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ 分量,

实验得到毛玻璃转速较慢与转速较快时产生的干涉条纹,分别如图 3、4 所示. 由图 3 可以看出, xx 方向和 yy 方向形成的干涉条纹明显比 xy 方向和 yx 方向的干涉条纹清晰,条纹可见度较大,即 xx 方向和 yy 方向的相干性比 xy 方向和 yx 方向的相干性要好. 图 4 中,干涉条纹整体的相干性下降,为了让条纹更清晰可见,提高了图像的亮度,但与图 3 相比, xx 方向和 yy 方向形成的干涉条纹的对比度明显降低,并且 xy 方向和 yx 方向的干涉条纹很不清晰,基本无法看清.

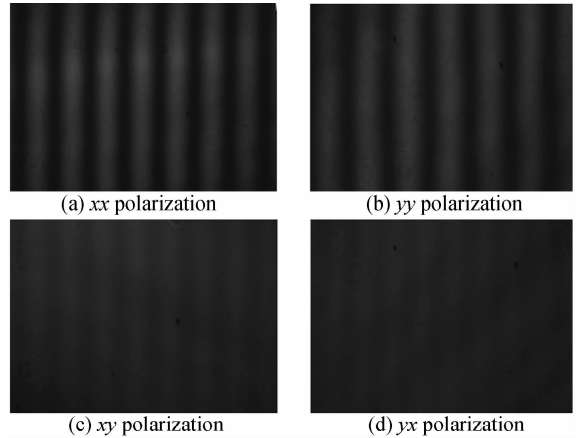


图 3 相干度较高的光束在光谱仪所在的平面上不同偏振方向上的干涉条纹

Fig. 3 The interference fringe of the light beam with higher coherence observed at the plate S

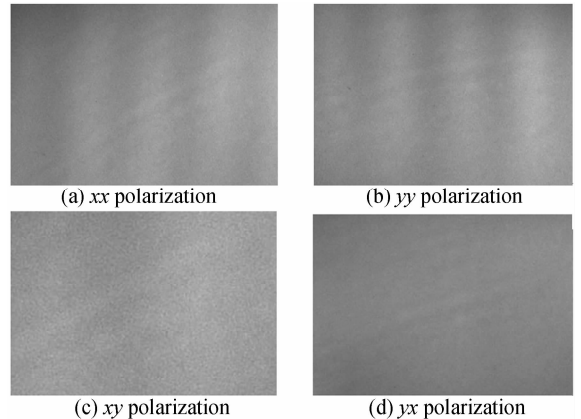


图 4 相干度低的光束在不同偏振方向上的干涉条纹
Fig. 4 The interference fringe of the light beam with low coherence observed at the plate S

通过实验测量可以得到中央亮条纹轴上点的光谱密度的最大值和相邻暗条纹的光谱密度的最小值,以及单个缝在亮条纹处的光谱强度. 再利用式(16)计算光束经过双缝后相干度^[15].

$$\frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}} \quad (16)$$

式中, S_{\max} 和 S_{\min} 分别是中央亮条纹轴上点的光谱密度

最大值和相邻暗条纹的光谱密度最小值。

用单个狭缝产生在中央亮条纹处的光谱密度 $S(r_1, \omega)$ 与 $S(r_2, \omega)$, 结合式(14)可以得到光束的交叉谱密度. 表 1 是毛玻璃转速较慢时测量得到的结果, 即相干性较好的部分相干光束的相干度和交叉谱密度.

表 1 光束的相干度及交叉谱密度

Table 1 Components of the spectral degree of coherence and the cross-spectral density matrix obtained from the laser light

Parameter	Value	Parameter	Value
$\eta_{xx}(r_1, r_2, \omega)$	0.67 ± 0.04	$W_{xx}(r_1, r_2, \omega)$	183.99 ± 4.40
$\eta_{xy}(r_1, r_2, \omega)$	0.53 ± 0.01	$W_{xy}(r_1, r_2, \omega)$	115.76 ± 3.45
$\eta_{yx}(r_1, r_2, \omega)$	0.35 ± 0.03	$W_{yx}(r_1, r_2, \omega)$	91.00 ± 3.26
$\eta_{yy}(r_1, r_2, \omega)$	0.61 ± 0.04	$W_{yy}(r_1, r_2, \omega)$	166.04 ± 5.54

电场交叉谱密度矩阵为

$$W(r_1, r_2, \omega) = \begin{bmatrix} 183.99 \pm 4.40 & 115.76 \pm 3.45 \\ 91.00 \pm 3.26 & 166.04 \pm 5.54 \end{bmatrix} \quad (17)$$

将光束的电场交叉谱密度矩阵代入式(15)可以计算得到广义斯托克斯参数, 如表 2, 即为毛玻璃转速较慢时, 随机电磁光束两点的广义斯托克斯参数.

表 2 随机电磁光束中两点的广义斯托克斯参数

Table 2 Generalized stokes parameters for a pair of points in the random electromagnetic beam

Parameter	Value
$S_0(r_1, r_2, \omega)$	350.03 ± 7.71
$S_1(r_1, r_2, \omega)$	17.95 ± 2.43
$S_2(r_1, r_2, \omega)$	206.76 ± 3.52
$S_3(r_1, r_2, \omega)$	$(24.76 \pm 0.42)i$

从表 1 可看出, xx 和 yy 方向的相干度大于 xy 和 yx 方向, 与图 3 中由干涉条纹所得到的结论一致. 这是因为激光器的出射光是随机偏振光, 所以只有相同偏振方向的光相干性比较大, 而光束两个偏振方向相互垂直的分量没有太大的关系, 并且在光路中加入匀速旋转的毛玻璃, 降低了光束整体的相干性.

在实验中, 利用旋转的毛玻璃产生部分相干光束会导致干涉条纹出现抖动, 抖动的程度与毛玻璃的转动速率和光谱仪的积分时间有关, 如果增大毛玻璃的转动速率, 会降低干涉条纹的抖动程度与条纹的对比度. 因此, 在实验中通过比较选取合适的转动速率, 并利用多组测量数据, 来减小实验操作误差, 提高实验的精确性. 另外由于光阑在滤波的过程中会使光线产生衍射现象, 为了消除衍射现象对干涉图样的影响, 可以增大光谱仪与分光镜的距离, 使衍射光线尽可能偏离干涉图样.

3 结论

本文提出了一种对电磁光束的广义斯托克斯参数进行实验测量的方法. 通过对部分相干光经过双缝的干涉图样的检测, 得到了电场交叉谱密度矩阵, 进一步计算得出了广义斯托克斯参数. 该方法光路搭建较简单, 普通实验室较易实现. 对部分相干光束广义斯托克斯参数的实验测量也有助于部分相干光传播中的偏振和相干特性的研究.

参考文献

- [1] WOLF E, Unified theory of coherence and polarization of random electromagnetic beams[J]. *Physics Letters A*, 2003, **312**(5): 263-267.
- [2] WOLF E, Correlation-induced changes in the degree of polarization, the degree of coherence, and the spectrum of random electromagnetic beams on propagation [J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(13): 1078-1080.
- [3] JAMES D F V, KANDPAL H C, WOLF E, A new method for determining the angular separation of double stars[J]. *The Astrophysical Journal*, 1994, **445**(1): 406-410.
- [4] AGRAWAL G P, WOLF E, Propagation-induced polarization changes impartially coherent optical beams [J]. *Optical Society of America A*, 2009, **17**(11): 2019.
- [5] 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.
- [6] WOLF E, Introduction to theory of coherence and polarization of light[M]. Britain : Cambridge University Press, 2007.
- [7] ROYCHOWDLHURY H, WOLF E, Determination of the electric cross-spectral density matrix of a random electromagnetic beam[J]. *Optics Communications*, 2003, **226**(1-6): 57-60.
- [8] KOROTKOVA O; WOLF E, Generalized Stokes parameters of random electromagnetic beams[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(2): 198-200.
- [9] KANSERI B, KAMPAL H C, Experimental determination of electric cross-spectral density matrix and generalized Stokes parameters for a laser beam[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(20): 2410-2412.
- [10] DU Xin-yue, ZHAO, Dao-mu, Changes in generalized Stokes parameters of stochastic electromagnetic beams on propagation through ABCD optical systems and in the turbulent atmosphere[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(24): 5968-5972.
- [11] KANSERI B, RATH S, KANDPAL H C, Direct determination of the generalized Stokes Parameters from the usual Stokes parameters[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**: 719-721.
- [12] MEI Zhang-rong, Generalized stokes parameters of three-dimensional stochastic electromagnetic beams [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(22): 22826-22832.
- [13] LI J, DING C. Generalized stokes parameters of random electromagnetic vortex beams propagating through atmospheric turbulence[J]. *Applied Physics*, 2011, **103**(1): 245-255.
- [14] SZTUL H I, ALFANO R R, Double-slit interference with Laguerre-Gaussian beams[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(7): 999-1001.
- [15] MANDEL L, WOLF E. Optical coherence and quantum optics[M]. Britain : Cambridge University Press, 1995.