

光源交叉偏振效应对辐射光束偏振度的影响

辛 煜 陈延如 赵 琦

(南京理工大学光电工程系, 江苏 南京 210094)

摘要 研究了随机电磁光源辐射光束的偏振度的轴向演化规律和在垂轴截面内的分布情况, 探讨偏振度传播规律的主要影响因素, 并发现存在相干性和偏振度以外的其他因素影响辐射的偏振性质。以高斯-谢尔模型光源为例, 导出了其谱相干度、偏振度和交叉偏振度与光源各参数依赖关系的解析表达式, 在此基础上指出具有相同相干性和偏振度的一组光源可具有不同的交叉偏振度。针对相干光源和非相干光源两种情况, 各计算了一组光源的辐射场偏振度随传播距离的变化曲线及其在与光束轴垂直的横截面内的分布情况, 结果表明, 在交叉偏振度中出现的光场两垂直分量间相关系数可显著影响辐射光束偏振度纵向变化规律。

关键词 物理光学; 相干性; 偏振度; 交叉偏振度

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0089

Effects of Cross Polarization of Electromagnetic Sources on the Polarization Degree of Radiation Beam

Xin Yu Chen Yanru Zhao Qi

(Department of Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The effects of source cross polarization on the polarization degree of radiation beam were investigated. Formulas expressing the spectral degrees of coherence, of polarization and the degree of cross polarization of a Gaussian-Schell-model source were analytically derived. From these formulas it was demonstrated that sources with the same set of degrees of coherence and polarization may have different degrees of cross polarization. The spectral degrees of polarization as a function of the distance from the source were calculated for coherent and incoherent sources respectively. The plots show that the correlation coefficients between the two mutually orthogonal components of sources may evidently affect the longitudinal evolution and the asymptotic values of the polarization degree.

Key words physical optics; coherence; degree of polarization; degree of cross-polarization

1 引 言

近年来, 随机电磁场相干性与偏振性质的研究成为热点, 研究这些性质的一个有效工具是 Wolf^[1]提出的以交叉谱密度矩阵为核心量的统一理论框架。在此基础上, 相干性与偏振性质随光束传播的演化问题得到深入研究^[2~6], 其中光束偏振度的传播问题受到研究者的关注; 在 1994 年, D. F. V. James^[7]就理论预言了部分相干光源辐射光束的偏振度并非一恒定量, 而是随光束的传播而变化。最近, Salem 等^[8]利用推广的斯托克斯参量指出光源的相干性质影响其辐射光束的偏振度, 亦即两个具有相同偏振度的光源可以辐射具有不同偏振度的光

束。另外, Shirai 等^[9]定义了交叉偏振度的概念; 一方面交叉偏振度与随机光束强度起伏的相关性有关, 而强度起伏是光束高阶相干性中较易研究的一种, 另一方面, 交叉偏振度可以看做是偏振度推广到空间两点的情况, 它与推广的斯托克斯参量^[10]的关系在^[11, 12]做了讨论。由于交叉偏振度由交叉谱密度矩阵的全部四个元素决定, 它包含光场更加丰富的物理信息, 这一点可以从文献^[11]中看出, 两个具有相同偏振度和相同相干度的光源同样可以辐射不同偏振度的光束。本文的目的在于进一步研究光源的交叉偏振性质对其辐射光束偏振度的影响, 与文献^[11]虑较为特殊的远场情形不同, 本文研究辐射光

基金项目: 国家自然科学基金(50176020)资助课题。

作者简介: 辛 煜(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事光的相干与偏振性质的理论研究。E-mail: yuxin_njust@hotmail.com

导师简介: 陈延如(1954—), 男, 教授, 主要从事光学目标散射特性方面的研究。E-mail:

束任意垂直光束轴的横截面上场点的偏振度,并以高斯-谢尔模型光束为例,给出具有相同相干度和偏振度但不同交叉偏振度的两光源的辐射场的偏振度变化曲线。

2 随机光束的交叉偏振度

考虑一频率为 ω 的随机光场 $\{\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)\} \equiv \{E_i(\mathbf{r}, \omega)\} (i = x, y)$, \mathbf{r} 表示空间点的位置矢量, x, y 示笛卡尔坐标系中光场可能的两垂直分量,假设光场可以视为至少是宽平稳的随机过程,则由空间一频率域中的二阶相干性理论,这一光场的交叉谱密度矩阵定义为^[1]: $\mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \equiv \mathbf{W}_{ij}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \langle E_i^*(\mathbf{r}_1, \omega) E_j(\mathbf{r}_2, \omega) \rangle (i, j = x, y)$, 其中 $*$ 表示取复数共轭, $\langle \cdot \rangle$ 表示取集平均。空间两点 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 的谱相干性 $\eta(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ 可由 $\mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ 的元素表出:

$$\eta(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \frac{\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)}{\sqrt{\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1, \omega)} \sqrt{\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_2, \omega)}}, \quad (1)$$

空间一点 \mathbf{r} 处的偏振度 $P(\mathbf{r})$ 可表示为

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \sqrt{1 - \frac{4\text{Det} \mathbf{W}(\mathbf{r}, \mathbf{r}, \omega)}{[\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}, \mathbf{r}, \omega)]^2}}, \quad (2)$$

(1) 式和(2)式中, Tr 和 Det 分别表示取矩阵的迹和行列式。交叉偏振度同样可以表示为交叉谱密度矩阵的元素的形式,光束在空间两点 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 的交叉偏振度 $P(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ 为^[12]

$$P(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \sqrt{\frac{2\text{Tr} [\mathbf{W}^\dagger(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \cdot \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)]}{|\text{Tr} \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)|^2}} - 1. \quad (3)$$

式中 \dagger 表示取矩阵的厄米共轭,当空间两点 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 重合为一点 \mathbf{r} 时,公式(3)约化为公式(2),然而 P 与 P 的不同在于前者对于空间任意两点 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 可以取任意非负值而后者对于任意位置 \mathbf{r} 需满足有界约束 $0 \leq P(\mathbf{r}) \leq 1$ 。将(3)式与(1)式、(2)式做比较不难发现,谱相干度 η 只取决于交叉谱密度矩阵的两对角元素,而偏振度 $P(\mathbf{r}, \omega)$ 只取决于交叉谱密度矩阵四个元素在一点 \mathbf{r} 处的取值,而交叉偏振度 $P(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ 则取决于交叉谱密度矩阵全部四个元素在两点 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 的取值,因此包含光场更多的统计信息。

3 高斯-谢尔模型光源及其辐射光束的偏振度

考虑一任意随机平面电磁光源,为简洁起见,这里及以后省略各物理量的频率变量 ω , 其交叉谱密

度矩阵的元素型如

$$\mathbf{W}_{ij}^{(Q)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \sqrt{S_i^{(Q)}(\mathbf{r}_1)} \sqrt{S_j^{(Q)}(\mathbf{r}_2)} \mu_{ij}^{(Q)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2), \quad (4)$$

式中 $S_i^{(Q)} (i = x, y)$ 代表光电场 i -分量的谱强度, $\mu_{ij}^{(Q)} (i, j = x, y)$ 代表光电场 i -与 j -分量之间的相关系数,上标 (Q) 用来标示与光源相关的量。矢量高斯-谢尔模型光源是标量情形的对应推广,其谱强度 $S_i^{(Q)}$ 与各相关系数 $\mu_{ij}^{(Q)}$ 都为高斯函数分布,且 $\mu_{ij}^{(Q)}$ 只取决于它的两个空间变量之差 $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$:

$$S_i^{(Q)}(\mathbf{r}) = A_i^2 \exp\left(-\frac{\mathbf{r}^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (5)$$

$$\mu_{ij}^{(Q)}(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) = B_{ij} \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2}{2\delta_{ij}^2}\right].$$

式中 $A_i, B_{ij}, \sigma_i, \delta_{ij}$ 等都是与空间位置无关的量,但可能与光频率有关。由物理含义知, $B_{xx} = B_{yy} = 1$, $B_{yx} = B_{xy}^*$, $\delta_{xy} = \delta_{yx}$, 且 \mathbf{W} 的非负定与厄米性要求 $\max\{\delta_{xx}, \delta_{yy}\} \leq \delta_{xy} \leq \min\left\{\frac{\delta_{xy}}{\sqrt{|B_{xy}|}}, \frac{\delta_{yy}}{\sqrt{|B_{yx}|}}\right\}$ 。将(5)式代入(4)式得到高斯-谢尔模型光源交叉谱密度矩阵元的表示式:

$$\mathbf{W}_{ij}^{(Q)}(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) = A_i A_j B_{ij} \exp\left(-\frac{\mathbf{r}_1^2}{4\sigma_i^2}\right) \exp\left(-\frac{\mathbf{r}_2^2}{4\sigma_j^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2}{2\delta_{ij}^2}\right). \quad (6)$$

该类光源辐射电磁光束需满足与标量源类似的条件^[13]: $1/4\sigma_i^2 + 1/\delta_{ii}^2 \leq 2\pi^2/\lambda^2 (i = x, y)$, 其中 λ 为光波波长。这里假定该光源位于平面 $z = 0$ 内,向右半空间 $z > 0$ 沿 z -轴辐射光束,则由交叉谱密度矩阵元素所满足的波方程可以推知,在右半空间中垂直光束轴的任一平面常数 $z > 0$ 内两点 $(\boldsymbol{\rho}_1, z)$ 和 $(\boldsymbol{\rho}_2, z)$ 的交叉谱密度矩阵元可由光源平面内的交叉谱密度表出:

$$\mathbf{W}_{ij}^{(f)}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z) = \iint_{z=0} \mathbf{W}_{ij}^{(Q)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) K(\boldsymbol{\rho}_1 - \mathbf{r}_1, \boldsymbol{\rho}_2 - \mathbf{r}_2, z) d^2 r_1 d^2 r_2, \quad (7)$$

其中 $\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2$ 代表光束轴横截面内的二维位置矢量,上标 (f) 用来标示与辐射场有关的量,而 $K(\boldsymbol{\rho}_1 - \mathbf{r}_1, \boldsymbol{\rho}_2 - \mathbf{r}_2, z) = G^*(\boldsymbol{\rho}_1 - \mathbf{r}_1, z) \times G(\boldsymbol{\rho}_2 - \mathbf{r}_2, z)$, G 代表从源点到场点近轴传播的格林函数:

$$G(\boldsymbol{\rho} - \mathbf{r}, z) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp(ikz) \exp[ik|\boldsymbol{\rho} - \mathbf{r}|^2/2z].$$

为简便起见,假设 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, 通过将 K 和 G 代入(7)式并令 $\boldsymbol{\rho}_1 = \boldsymbol{\rho}_2 = \boldsymbol{\rho}$, 得到

$$\mathbf{W}_{ij}^{(f)}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, z) = \frac{A_i A_j B_{ij}}{\Delta_{ij}^2(z)} \exp\left[-\frac{\boldsymbol{\rho}^2}{2\sigma^2 \Delta_{ij}^2(z)}\right], \quad (8)$$

式中 $\Delta_{ij}(z)$ 为光束传播过程的扩展系数：

$$\Delta_{ij}^2(z) = 1 + \frac{z^2}{k^2 \sigma^2} \left(\frac{1}{4\sigma^2} + \frac{1}{\delta_{ij}^2} \right). \quad (9)$$

为突出光源交叉偏振度对辐射光束的偏振度的影响,不妨考虑一组具有不同交叉偏振度的光源,

这里首先证明这样的一组光源仍然可以具有相同的相干度和偏振度,为此,将高斯-谢尔模型光源的交叉谱密度矩阵元素(6)式分别代入(1)式、(2)式和(3)式,并在计算过程中假设 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$,从而 $\mathbf{W}^\dagger(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \mathbf{W}(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1) = \mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$,得

$$\left\{ \begin{aligned} \eta^{(Q)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) &= \frac{A_x^2 \exp[-(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2 / (2\delta_{xx}^2)] + A_y^2 \exp[-(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2 / (2\delta_{yy}^2)]}{A_x^2 + A_y^2}, \\ P^{(Q)}(\mathbf{r}) &= \frac{\sqrt{(A_x^2 - A_y^2)^2 + 4A_x^2 A_y^2 |B_{xy}|^2}}{A_x^2 + A_y^2}, \\ P^{(Q)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) &= \frac{\sqrt{\left\{ A_x^2 \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2}{2\delta_{xx}^2}\right] - A_y^2 \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2}{2\delta_{yy}^2}\right] \right\}^2 + 4A_x^2 A_y^2 |B_{xy}|^2 \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2}{2\delta_{xy}^2}\right]}}{A_x^2 \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2}{2\delta_{xx}^2}\right] + A_y^2 \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2}{2\delta_{yy}^2}\right]}. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

从(10)式可以得到与(3)式后面的分析一致的结果: $P^{(Q)}$ 依赖于表征光场两垂直分量间相关性的参数 δ_{xy} ,而 $\eta^{(Q)}$ 和 $P^{(Q)}$ 与该参数无关,因此,可以构造一组具有相同相干度和偏振度但不同交叉偏振度的光源来研究它们辐射场的偏振度的不同.将(8)式代入(2)式得右半空间任一垂直光束轴的横截面内点 $(\boldsymbol{\rho}, z)$ 处的偏振度 $P(\boldsymbol{\rho}, z)$:

$$P^{(f)}(\boldsymbol{\rho}, z) = \frac{\sqrt{\left\{ \frac{A_x^2}{\Delta_{xx}^2} \exp\left[-\frac{\boldsymbol{\rho}^2}{2\sigma^2 \Delta_{xx}^2}\right] - \frac{A_y^2}{\Delta_{yy}^2} \exp\left[-\frac{\boldsymbol{\rho}^2}{2\sigma^2 \Delta_{yy}^2}\right] \right\}^2 + 4 \frac{(A_x A_y |B_{xy}|)^2}{\Delta_{xy}^4} \exp\left[-\frac{\boldsymbol{\rho}^2}{\sigma^2 \Delta_{xy}^2}\right]}}{\frac{A_x^2}{\Delta_{xx}^2} \exp\left[-\frac{\boldsymbol{\rho}^2}{2\sigma^2 \Delta_{xx}^2}\right] + \frac{A_y^2}{\Delta_{yy}^2} \exp\left[-\frac{\boldsymbol{\rho}^2}{2\sigma^2 \Delta_{yy}^2}\right]}. \quad (11)$$

式中省略了个扩展系数 $\Delta_{ij}(z)$ 的参变量 z 。

利用(11)式的结果,计算了具有不同交叉偏振度的高斯-谢尔模型光源辐射场的偏振度的纵向和横向变化规律.图1给出了一组非相干光源($\sigma \gg \delta_{xx}, \sigma \gg \delta_{yy}$)的计算结果.本文选取参数为: $A_x = 1, A_y = 1.5, B_{xy} = 0.09, \sigma = 1 \text{ cm}, \delta_{xx} = 0.24 \text{ mm}, \delta_{yy} = 0.3 \text{ mm}, \lambda = 632.8 \text{ nm}$ 的三个光源;图1(a)轴上点偏振度 $P(0, z)$ 随传播距离 z 的变化关系,通过设置不同的 δ_{xy} 使光源具有不同的交叉偏振度,这里给出的是: $\delta_{xy} = 0.35 \text{ mm}, \delta_{xy} = 0.55 \text{ mm}$ 和 $\delta_{xy} =$

0.75 mm 的情况.图1(b)是距离光源 $z = 300 \text{ m}$ 处垂直光束轴的截面内偏振度随离开光轴的距离 ρ 的变化曲线,这里给出 $\delta_{xy} = 0.35 \text{ mm}$ 和 $\delta_{xy} = 0.75 \text{ mm}$ 两种情况.图2是相干光源($\sigma < \delta_{xx}, \sigma < \delta_{yy}$)的情况,光源参数为: $A_x = 1, A_y = 1.5, B_{xy} = 0.09, \sigma = 1 \text{ mm}, \delta_{xx} = 2.4 \text{ mm}, \delta_{yy} = 3.0 \text{ mm}, \lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。

图2(a)给出 $\delta_{xy} = 3.5 \text{ mm}, \delta_{xy} = 5.5 \text{ mm}$ 和 $\delta_{xy} = 7.5 \text{ mm}$ 情况下轴上偏振度的变化曲线,图2(b)给出 $\delta_{xy} = 3.5 \text{ mm}$ 和 $\delta_{xy} = 7.5 \text{ mm}$ 两种情况下 $z = 100 \text{ m}$ 处光束横截面内偏振度随 ρ 的变化

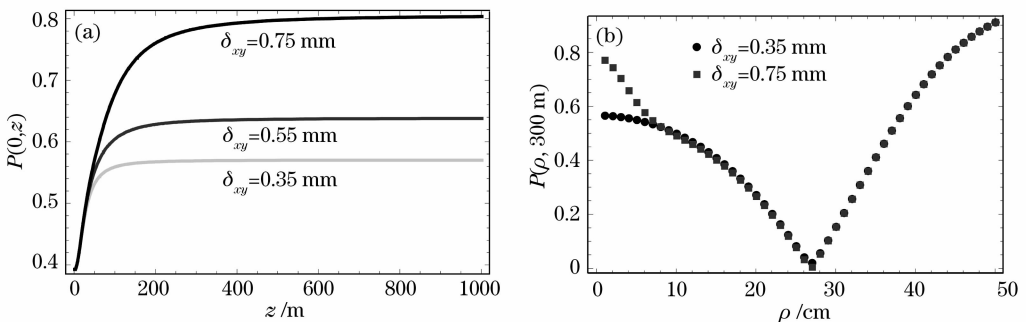
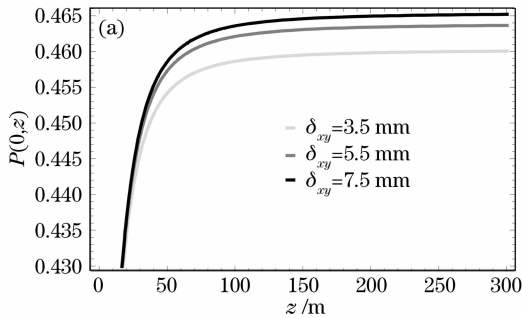


图1 非相干光源辐射场的偏振度。(a)轴上点的偏振度 $P(0, z)$; (b)垂轴截面内的偏振度 $P(\rho, 300 \text{ m})$

Fig. 1 Evolution of the degree of polarization of radiation field generated from an incoherent source. (a) On axis polarization degree $P(0, z)$; (b) polarization degree in a transverse plane $P(\rho, 300 \text{ m})$

曲线。从图 1(a) 不难看出, 表征光源两垂直分量间相关性的系数 δ_{xy} 直接影响辐射光束轴上偏振度随传播距离的变化规律以及在远场的渐近值, δ_{xy} 的值越大, 亦即光源两垂直分量间的相关性越强, 辐射光



束轴上偏振度所能达到的最大值越大, 但这种影响对于非相干光源比相干光源更为显著。从图 1(b) 和图 2(b) 可知, δ_{xy} 的取值对远场光束横截面内偏振度的径向分布规律和其所取最小值的影响均不明显。

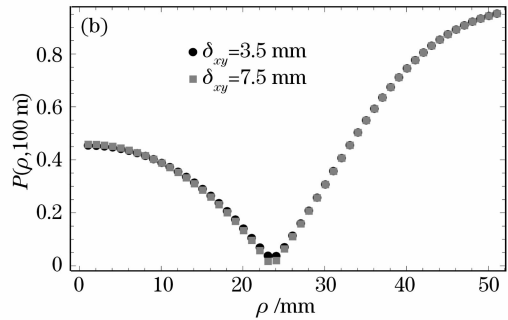


图 2 相干光源辐射场的偏振度。图 1(a) 轴上点偏振度 $P(0, z)$; 图 1(b) 垂轴截面内的偏振度 $P(\rho, 100 \text{ m})$

Fig. 2 Evolution of the polarization degree of radiation field generated from a coherent source. (a) On axis polarization degree $P(0, z)$; (b) polarization degree in a transverse plane $P(\rho, 100 \text{ m})$

4 结 论

研究了随机电磁光源交叉偏振度对其辐射光束的偏振度的影响。以高斯-谢尔模型光源为例, 推导了辐射光束偏振度随传播距离的解析关系式, 计算所得的曲线显示, 具有相同相干性和偏振度的光源可以辐射具有不同偏振度的光束, 此时决定光束偏振度的是表征光场两垂直分量间相关性的系数 δ_{xy} , 该数值影响光束偏振度的纵向变化规律及其远场渐近值, 但对光束截面内的偏振度分布的影响基本可以忽略。该结果对研究随机光场相干性和偏振特性之间的内在联系有潜在的价值。

参 考 文 献

- 1 E. Wolf. Unified theory of coherence and polarization of random electromagnetic beams[J]. *Phys. Lett. A*, 2003, **312**(5~6): 263~267
- 2 E. Wolf. Correlation-induced changes in the degree of polarization, the degree of coherence, and the spectrum of random electromagnetic beams on propagation[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(13): 1078~1080
- 3 O. Korotkova, E. Wolf. Changes in the state of polarization of a random electromagnetic beam on propagation [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **246**(1~3): 35~43
- 4 W. Gao, O. Korotkova. Changes in the state of polarization of a random electromagnetic beam propagating through tissue[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **270**(2): 474~478
- 5 Shu Jianghua, Chen Ziyang, Pu Jixiong. Changes in the degree of

- polarization of partially coherent lights diffracted by multiple circular apertures[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 849~854
- 舒建华, 陈子阳, 蒲继雄. 部分相干光经多个圆孔衍射后的偏振度变化[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 849~854
- 6 Zhang Zhiming, Pu Jixiong, Wang Xiqing. Focusing of cylindrically polarized Bessel-Gaussian beams through a high numerical-aperture lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 401~405
 - 张志明, 蒲继雄, 王喜庆. 圆柱偏振贝塞尔高斯光束经高数值孔径的聚焦[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 401~405
 - 7 D. F. V. James. Change of polarization of light beams on propagation in free space [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(5): 1641~1643
 - 8 M. Salem, O. Korotkova, E. Wolf. Can two planar sources with the same sets of Stokes parameters generate beams with different degrees of polarization[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(20): 3025~3027
 - 9 T. Shirai, E. Wolf. Correlations between intensity fluctuations in stochastic electromagnetic beams of any state of coherence and polarization[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **272**(2): 289~292
 - 10 O. Korotkova, E. Wolf. Generalized Stokes parameters of random electromagnetic beams[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(2): 198~200
 - 11 Yu Xin, Yanru Chen, Qi Zhao *et al.*. Effect of cross-polarization of electromagnetic source on the degree of polarization of generated beam[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(8): 1954~1957
 - 12 S. N. Volkov, D. F. V. James, T. Shirai *et al.*. Intensity fluctuations and the degree of cross-polarization in stochastic electromagnetic beams[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**(5): 055001
 - 13 O. Korotkova, M. Salem, E. Wolf. Beam conditions for radiation generated by an electromagnetic Gaussian Schell-model source[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11): 1173~1175