第 31 卷 光 学 学 报 光学前沿——信息光学
2011 年 6 月 ACTA OPTICA SINICA 专 刊

随机电磁光束阵列的光束传输变换特性

李宾中[1] 吕百达[2]

([1]川北医学院基础学院物理教研室，四川 南充 637007
[2]四川大学物理科学与技术学院，四川 成都 610064)

摘要 采用部分偏振高斯-谢尔模型(PGSM)描述随机电磁光束，运用维格纳分布函数(WDF)研究了随机电磁光束阵列的光束偏振特性与传输变换特性。推导出了阵列光束通过傍轴光学系统 *ABCD* 的传输方程和重要的光束特征参数，如光束偏振度(P)、光束传输因子(M^2)、峭度(K)以及光强分布的解析表达式。研究表明，阵列光束的 P、M^2、K、光强分布和束宽依赖于总的空间相干度 α、间距 x_d、束腰宽度 w_0 和 PGSM 子光束数目 N。阵列光束偏振度 P 随传输距离而变化，并且变得不均匀；P 也随归一化间距 x'_d 变化。

关键词 相干光学；部分偏振高斯-谢尔模型；维格纳分布函数；强度矩；光束传输因子；峭度；偏振度

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100406

Propagation Transform Characteristics of Beams from Stochastic Electromagnetic Beam Array

Li Binzhong[1] Lü Baida[2]

([1] *Physics Teahing and Research Section*, *School of Basic Medical Sciences*, *North Sichuan Medical College*, *Nanchong*, *Sichuan* 637007, *China*
[2] *Institute of Laser Physics and Chemistry*, *Sichuan University*, *Chengdu*, *Sichuan* 610064, *China*)

Abstract The partially polarized Gaussian Shell-model (PGSM) beam is proposed to describe the stochastic electromagnetic beam, and the array beam characteristics of PGSM beams combination are studied by means of Wigner distribution function (WDF). The analytical propagation equation of the array beams through a paraxial optical *ABCD* system is derived on the basis of the WDF. The intensity-moments characterization of the array beams is performed, and the important beam characteristic parameters such as the beam propagation factor (M^2), beam width, far-field divergence angle and kurtosis parameter K of the array beams are expressed in a closed form. It is found that a flat-topped light-intensity profile can be obtained at a certain plane by a suitable choice of the beam number N, normalized separation, and also the coherence parameter of PGSM beams. The degree of polarization P of the array beams is no longer uniform upon propagation, it also changes additionally with normalized separation x'_d.

Key words coherent optics; partially polarized Gaussian-Shell model (PGSM); Wigner distribution function (WDF); intensity-moments; beam propagation factor; kurtosis parameter; degree of polarization

OCIS codes 140.0140; 140.3295; 140.3298

1 引 言

近年来，激光阵列光束吸引了人们极大的研究兴趣[1~16]，光束并合能将激光束功率定标到更高水平，并保持良好的光束质量，从而能够克服将单台激光器定标到更高功率、能量指标的困难以及摆脱大气对高能激光传输不与合作的困境[17]。此外，光束并合还能得到适当的光强分布，尤其是平顶分布，这具有很重要的实际意义[13]。

实际的激光束大多具有部分相干性，同时具有部分偏振性，这类光束被称为随机电磁光束。本文采用部分偏振高斯-谢尔模型(PGSM)来描述随机电磁光束，运用维格纳分布函数(WDF)研究了随机

收稿日期: 2010-09-20; **收到修改稿日期**: 2010-12-07

基金项目: 教育部"留学回国人员科研启动基金"科研项目(第 39 批)资助课题。

作者简介: 李宾中(1965—)，男，博士，教授，主要从事光学、激光传输等方面的研究。E-mail: li_binzhong@163.com

电磁光束的阵列光束的传输变换特性及其偏振特性。推导出了阵列光束通过傍轴光学系统 $ABCD$ 的传输方程，重要的光束特征参数，如光束偏振度(P)、光束传输因子(M^2)、峭度(K)以及光强分布的解析表达式。

2 物理模型

随机电磁光束是同时考虑了光束的部分相干和部分偏振的特性，其部分相干性用高斯-谢尔模型(GSM)来描述，而其部分偏振性用相干偏振矩阵来描述，这类光束也被称为 PGSM 光束。随机电磁光束在 $z=0$ 平面的相干偏振(BCP)矩阵为[18~20]

$$\hat{\boldsymbol{J}}(x_1,x_2,0)=\begin{bmatrix}J_{xx}(x_1,x_2,0) & J_{xy}(x_1,x_2,0)\\ J_{yx}(x_1,x_2,0) & J_{yy}(x_1,x_2,0)\end{bmatrix},\tag{1}$$

式中

$$J_{\delta\gamma}(x_1,x_2,0)=\langle E_\delta(x_1,0,t)E_\gamma^*(x_2,0,t)\rangle=I_{0\delta\gamma}\exp\left[-\frac{x_1^2+x_2^2}{w_{0\delta\gamma}^2}-\frac{(x_1-x_2)^2}{2\sigma_{0\delta\gamma}^2}\right],(\delta,\gamma=x,y)\tag{2}$$

式中 $I_{0\delta\gamma}$ 是常数光强因子，E_δ 和 E_γ 是复电场分量，$w_{0\delta\gamma}$ 和 $\sigma_{0\delta\gamma}$ 分别是 PGSM 光束的束宽和相干长度，* 表示复共轭，角括号表示对时间 t 的平均。

上面的参数要满足一定的条件[18]，尤其是：$w_{0xx}=w_{0yy}=w_{0xy}=w_{0yx}=w_0$，$\sigma_{0xx}=\sigma_{0yy}$，$\sigma_{0xy}=\sigma_{0yx}$，$I_{0xy}^2\leqslant I_{0xx}I_{0yy}$。

将 N 束具有相同光束参数 w_0 的 PGSM 光束，沿 x 方向等间距 x_d 排列，便构成了多束随机电磁光束阵列模型。在 $z=0$ 平面，第 n 束 PGSM 光束的 BCP 矩阵元为

$$J_{n\delta\gamma}(x_1,x_2,0)=\langle E_{n\delta}(x_1-nx_\mathrm{d},0)E_{n\gamma}^*(x_2-nx_\mathrm{d},0)\rangle=I_{0\delta\gamma}\exp\left[-\frac{(x_1-nx_\mathrm{d})^2+(x_2-nx_\mathrm{d})^2}{w_0^2}-\frac{(x_1-x_2)^2}{2\sigma_{0\delta\gamma}^2}\right],\quad n\in\left[-\frac{N-1}{2},\frac{N-1}{2}\right]\tag{3}$$

为确定起见，设 N 是奇数，但可推广到偶数情况，所得结果对 N 为偶数的情况也是适用的。阵列光束在 $z=0$ 平面的 BCP 矩阵为

$$\hat{\boldsymbol{J}}(x_1,x_2,0)=\begin{bmatrix}J_{xx}(x_1,x_2,0) & J_{xy}(x_1,x_2,0)\\ J_{yx}(x_1,x_2,0) & J_{yy}(x_1,x_2,0)\end{bmatrix},\tag{4}$$

式中

$$J_{\delta\gamma}(x_1,x_2,0)=\langle\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}E_{m\delta}(x_1-mx_\mathrm{d},0)E_{n\gamma}^*(x_2-nx_\mathrm{d},0)\rangle=I_{0\delta\gamma}\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\exp\left\{-\frac{(x_1-mx_\mathrm{d})^2+(x_2-nx_\mathrm{d})^2}{w_0^2}-\frac{[(x_1-mx_\mathrm{d})-(x_2-nx_\mathrm{d})]^2}{2\sigma_{0\delta\gamma}^2}\right\},$$
$$m\in\left[-\frac{N-1}{2},\frac{N-1}{2}\right],n\in\left[-\frac{N-1}{2},\frac{N-1}{2}\right].\tag{5}$$

3 随机电磁光束阵列的光束传输变换规律

下面考虑阵列光束通过 $ABCD$ 傍轴光学系统的传输变换特性。

调用数学积分公式[21]：

$$\int_0^\infty t^\nu\exp(-pt)\mathrm{d}t=\Gamma(\nu+1)p^{-\nu-1},\quad \mathrm{Re}\ p>0,\tag{6}$$

从(4)～(6)式可以得到在 $z=0$ 平面上，阵列光束的 WDF 矩阵[19,20,22]

$$\hat{\boldsymbol{H}}(x,u,0)=\begin{bmatrix}H_{xx}(x,u,0) & H_{xy}(x,u,0)\\ H_{yx}(x,u,0) & H_{yy}(x,u,0)\end{bmatrix},\tag{7}$$

式中

$$H_{\delta\gamma}(x,u,0)=(k/2\pi)\int J_{\delta\gamma}(x-x_q/2,x+x_q/2,0)\exp(-\mathrm{i}kx_qu)\mathrm{d}x_q=$$

$$\frac{I_{0\delta\gamma}\beta_{\delta\gamma}kw_0}{\sqrt{2\pi}}\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\exp\left\{-\frac{\beta_{\delta\gamma}^2k^2w_0^2u^2}{2}-\frac{[2x-(m+n)x_{\mathrm{d}}]^2}{2w_0^2}+\mathrm{i}k(m-n)x_{\mathrm{d}}u\right\},\tag{8}$$

$$\alpha_{\delta\gamma}=\sigma_{0\delta\gamma}/w_0,\tag{9}$$

$$\beta_{\delta\gamma}=1/\sqrt{1+1/\alpha_{\delta\gamma}^2},\tag{10}$$

式中 $\alpha_{\delta\gamma}$ 和 $\beta_{\delta\gamma}$ 是相干参数，k 是波数，u 是传输方向角。

WDF 通过傍轴光学系统 $ABCD$ 遵从下述传输规律[23]：

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{out}}(x,u)=\boldsymbol{H}_{\mathrm{in}}(D_x-B_u,A_u-C_x),\tag{11}$$

式中 A,B,C,D 是傍轴光学系统传输变换矩阵的矩阵元。

将(8)式代入(11)式可得阵列光束在 z 平面上的 WDF 矩阵元

$$H_{\delta\gamma}(x,u,z)=\frac{I_{0\delta\gamma}\beta_{\delta\gamma}kw_0}{\sqrt{2\pi}}\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\exp\left\{-\frac{\beta_{\delta\gamma}^2k^2w_0^2(A_u-C_x)^2}{2}-\right.$$
$$\left.\frac{[2(D_x-B_u)-(m+n)x_{\mathrm{d}}]^2}{2w_0^2}+\mathrm{i}k(m-n)(A_u-C_x)x_{\mathrm{d}}\right\},\tag{12}$$

因此，阵列光束在 z 平面上的 WDF 矩阵为

$$\hat{\boldsymbol{H}}(x,u,z)=\begin{bmatrix}H_{xx}(x,u,z) & H_{xy}(x,u,z)\\ H_{yx}(x,u,z) & H_{yy}(x,u,z)\end{bmatrix},\tag{13}$$

阵列光束在 z 平面上的光强分布为

$$I(x,z)=\int\mathrm{tr}\hat{\boldsymbol{H}}(x,u,z)\mathrm{d}u=I_{xx}+I_{yy},\tag{14}$$

式中

$$I_{\delta\delta}=\frac{I_{0\delta\delta}kw_0^2}{\sqrt{g_{\delta\delta}}}\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\exp\left\{-\frac{k^2w_0^2}{2g_{\delta\delta}}\left[4B^2C^2x^2-4ABC_x[2D_x-(m+n)x_{\mathrm{d}}]+\right.\right.$$
$$\left.A^2\left\{4D^2x^2-4D(m+n)x_{\mathrm{d}}x+\left[\left(1+\frac{1}{\beta_{\delta\delta}^2}\right)(m-n)^2+4mn\right]x_{\mathrm{d}}^2\right\}\right]-$$
$$\left.\mathrm{i}\frac{2Bk}{g_{\delta\delta}\beta_{\delta\delta}^2}(m-n)x_{\mathrm{d}}\{2BC_x-A[2D_x-(m+n)x_{\mathrm{d}}]\}\right\},\tag{15}$$

和

$$g_{\delta\delta}=4B^2/\beta_{\delta\delta}^2+A^2k^2w_0^4,\tag{16}$$

(14)～(16)式是阵列光束通过傍轴 $ABCD$ 光学系统的光强传输公式。对自由空间传输的情况，(12)，(15)和(16)式化简为

$$H_{\delta\gamma}(x,u,z)=\frac{I_{0\delta\gamma}\beta_{\delta\gamma}kw_0}{\sqrt{2\pi}}\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\exp\left\{-\frac{\beta_{\delta\gamma}^2k^2w_0^2u^2}{2}-\frac{[2(x-zu)-(m+n)x_{\mathrm{d}}]^2}{2w_0^2}+\mathrm{i}k(m-n)x_{\mathrm{d}}u\right\},\tag{17}$$

$$I_{\delta\delta}=\frac{I_{0\delta\delta}kw_0^2}{\sqrt{g_{\delta\delta}}}\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\exp\left\{-\frac{k^2w_0^2}{2g_{\delta\delta}}\left\{4x^2-4(m+n)x_{\mathrm{d}}x+\left[\left(1+\frac{1}{\beta_{\delta\delta}^2}\right)(m-n)^2+4mn\right]x_{\mathrm{d}}^2\right\}+\right.$$
$$\left.\mathrm{i}\frac{2k}{g_{\delta\delta}\beta_{\delta\delta}^2}(m-n)x_{\mathrm{d}}[2x-(m+n)x_{\mathrm{d}}]z\right\},\tag{18}$$

和

$$g_{\delta\delta}=4z^2/\beta_{\delta\delta}^2+k^2w_0^4.\tag{19}$$

4　阵列光束的特征参数

4.1　光束传输因子(M^2)、束宽和远场发散角

光束传输因子(M_2)定义为[24]

$$M^2=2k\sqrt{\langle x^2\rangle\langle u^2\rangle-\langle xu\rangle^2},\tag{20}$$

式中的 $m+n$ 阶强度矩定义为[12]

$$\langle x^m u^n\rangle=\iint x^m u^n \,\mathrm{tr}\hat{\boldsymbol{H}}(x,u,z)\mathrm{d}x\mathrm{d}u\Big/\iint \mathrm{tr}\,\hat{\boldsymbol{H}}(x,u,z)\mathrm{d}x\mathrm{d}u,\tag{21}$$

将(12)式代入(20)和(21)式,经过繁冗的积分运算后,得到阵列光束传输因子

$$M^2=\Big[\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{m'=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n'=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}p_{mn}t_{mn}p_{m'n'}f_{m'n'}\Big]^{1/2}\Big/\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}p_{mn},\tag{22}$$

式中

$$p_{ij}=p_{xxij}+p_{yyij},f_{ij}=f_{xxij}+f_{yyij},p_{\xi\xi ij}=\exp[-(i-j)^2x_{\mathrm{d}}'^2/2\beta_{\xi\xi}^2],$$

$$t_{ij}=1+(i+j)^2x_{\mathrm{d}}'^2,f_{\xi\xi ij}=[1-(i-j)^2x_{\mathrm{d}}'^2/\beta_{\xi\xi}^2]/\beta_{\xi\xi}^2,(i=m,j=n\ \mathrm{or}\ i=m',j=n'),\tag{23}$$

式中

$$x_{\mathrm{d}}'=x_{\mathrm{d}}/w_0,\tag{24}$$

是归一化间距。(22)式显示阵列光束传输因子依赖于阵列子光束数目 N,归一化间距 x_{d}'和相干参数 $\alpha_{\xi\xi}$(或 $\beta_{\xi\xi}$)。(22)式适用于任一子光束数 N。

此外,从上面的计算中可以求出阵列光束基于二阶矩定义的束宽 $W(z)$和远场发散角 θ

$$W(z)=2\sqrt{\langle x^2\rangle}=2\sqrt{\Big(\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}r_{mn}\Big)\Big/\Big(\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}p_{mn}\Big)},\tag{25}$$

$$\theta=2\sqrt{\langle u^2\rangle}=2\sqrt{\Big(\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}q_{mn}\Big)\Big/\Big(\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}p_{mn}\Big)},\tag{26}$$

式中

$$r_{mn}=r_{xxmn}+r_{yymn},q_{mn}=q_{xxmn}+q_{yymn},$$

$$r_{\xi\xi mn}=p_{\xi\xi mn}\Big(\frac{B^2f_{\xi\xi mn}}{k^2w_0^2}+\frac{A^2w_0^2t_{mn}}{4}\Big),q_{\xi\xi mn}=p_{\xi\xi mn}\Big(\frac{D^2f_{\xi\xi mn}}{k^2w_0^2}+\frac{C^2w_0^2t_{mn}}{4}\Big).\tag{27}$$

4.2　峭度参数(K)

光束峭度参数(K)是用来表征光束平整度(或峭度)的,它定义为[25]

$$K=\frac{\langle x^4\rangle}{\langle x^2\rangle^2},\tag{28}$$

从(12),(13),(21)和(28)式,可得出阵列光束的峭度参数

$$K=\Big(\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}p_{mn}\Big)\Big(\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}s_{mn}\Big)\Big(\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}r_{mn}\Big)^2,\tag{29}$$

式中

$$\begin{aligned}&s_{mn}=s_{xxmn}+s_{yymn},\\&s_{\xi\xi mn}=\frac{p_{\xi\xi mn}}{16k^4w_0^4}(24A^2B^2k^2w_0^4f_{\xi\xi mn}t_{mn}+\\&16B^4\{[3-(m-n)^2x_{\mathrm{d}}'^2/\beta_{\xi\xi}^2]^2-6\}/\beta_{\xi\xi}^4+A^4k^4w_0^8\{[3+(m-n)^2x_{\mathrm{d}}'^2/\beta_{\xi\xi}^2]^2-6\}),\end{aligned}\tag{30}$$

(29)式给出了阵列光束通过傍轴 $ABCD$ 光学系统的 K 参数表达式,它表明 K 参数同时依赖于子光束参数和光学系统并随传输变化。

5 阵列光束的偏振特性

阵列光束在 z 平面的 BCP 矩阵元可由 z 平面的维格纳分布函数矩阵元的逆傅里叶变换得到，由(17)式可求得

$$\hat{\boldsymbol{J}}(x_1,x_2,z)=\begin{bmatrix} J_{xx}(x_1,x_2,z) & J_{xy}(x_1,x_2,z) \\ J_{yx}(x_1,x_2,z) & J_{yy}(x_1,x_2,z) \end{bmatrix}, \tag{31}$$

式中

$$J_{\delta\gamma}(x_1,x_2,z)=\iint H_{\delta\gamma}\left(\frac{x_1+x_2}{2},u,z\right)\exp[-\mathrm{i}k(x_1-x_2)u]\mathrm{d}u\mathrm{d}v=\frac{I_{0\delta\gamma}}{F_{\delta\gamma}^2(z)}\sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}$$
$$\exp\left\{-\frac{\mathrm{i}k[(x_1-mx_\mathrm{d})^2-(x_2-nx_\mathrm{d})^2]}{2R_{\delta\gamma}(z)}-\frac{(x_1-mx_\mathrm{d})^2+(x_2-nx_\mathrm{d})^2}{w_0^2F_{\delta\gamma}^2(z)}-\frac{[(x_1-mx_\mathrm{d})-(x_2-nx_\mathrm{d})]^2}{2\sigma_{0\delta\gamma}^2F_{\delta\gamma}^2(z)}\right\}, \tag{32}$$

和

$$F_{\delta\gamma}^2(z)=1+\frac{(\lambda z/\pi)^2}{w_0^2}\left(\frac{1}{w_0^2}+\frac{1}{\sigma_{0\delta\gamma}^2}\right),R_{\delta\gamma}(z)=z/\left[1-\frac{1}{F_{\delta\gamma}^2(z)}\right], \tag{33}$$

光束的偏振度可由光束的相干偏振矩阵确定，即

$$P=\left\{1-\frac{4\det\hat{J}(x,x,z)}{[\mathrm{tr}\hat{J}(x,x,z)]^2}\right\}^{1/2}, \tag{34}$$

令 $x_1=x_2=x$，将(31)，(32)和(33)式代入(34)式，可求得阵列光束在 z 平面的偏振度为

$$P=\eta\frac{F_{xx}(z)}{F_{xy}(z)}\sqrt{\left(\sum_m\sum_n J_{mnxy}\right)\left(\sum_m\sum_n J_{mnxy}\right)^*}\Big/\sum_m\sum_n J_{mnxx}, \tag{35}$$

式中

$$\eta=I_{0xy}/I_{0xx},$$
$$J_{mn\delta\gamma}=\exp\left\{-\frac{(m-n)^2x_\mathrm{d}^2}{2\sigma_{0\delta\gamma}^2}-\frac{(x-mx_\mathrm{d})^2+(x-nx_\mathrm{d})^2}{F_{\delta\gamma}(z)w_0^2}-\frac{\mathrm{i}k[(x-mx_\mathrm{d})^2-(x-nx_\mathrm{d})^2]}{2R_{\delta\gamma}(z)}\right\}, \tag{36}$$

并且为进一步简化，假设 $I_{0xx}=I_{0yy}$[18]。

6 结 论

本文利用维格纳分布函数和强度矩的方法推导出了随机电磁光束阵列的解析传输方程、光束特征参数，如光束传输因子 M^2、束宽 $W(z)$、远场发散角 θ 以及峭度参数 K。本文的结果具有普遍的应用意义。相比于从柯林斯公式出发的冗长的积分运算，维格纳分布函数方法使推导过程大大简化。此外，基于二阶矩定义的束宽 $W(z)$ 使其遵从著名的 $ABCD$ 定律，并且阵列光束的 M^2 和 K 能够用一种紧凑的形式表达。而且，选取子光束的适当参数构成的阵列可以在某一平面上得到平顶光强分布的光束，这不仅依赖于子光束的数目、归一化间距，而且依赖于相干参数。

参 考 文 献

1 Yangsheng Yuan, Yangjian Cai, Chengliang Zhao. Propagation factors of laser array beams in turbulent atmosphere[J]. *J. Mod. Opt.*, 2010, **57**(8): 621～631

2 Ji Xiaoling, Pu Zhengcai, Jia Xinhong. Spatial correlation properties and the spectral intensity distributions of focused Gaussian Schell-model array beam[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(14): 2685～2691

3 H. Gross. Numerical propagation of partially coherent laser beams through optical systems[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1997, **29**(5): 257～260

4 C. Palma, G. Cincotti. Spatial behavior of the wolf effect in free propagation for Gaussian Schell-model beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1885～1889

5 Avshalom Gamliel. Mode analysis of spectral changes in light propagation from sources of any state of coherence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(9): 1591～1597

6 Shimon Lavi, Ron Prochaska, Eliezer Keren. Generalized beam parameters and transformation laws for partially coherent light [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(17): 3696～3703

7 Li Binzhong, Lü. Baida. Beam combination characteristics of general astigmatic Gaussian beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(4): 321～326

李宾中，吕百达. 复杂像散高斯光束的并合光束特性[J]. 中国激光，2002，**29**(4)：321～326

8 Pan Pingping, Dan Youquan, Zhang Bin. Propagation of partially coherent flat-topped beams in gradient-index media[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1252～1256

潘平平，但有全，张 彬. 部分相干平顶光束在梯度折射率介质中的传输特性[J]. 光学学报，2008，**28**(7)：1252～1256

9 Shu Jianhua, 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

10 Xiao Qinggang, Xiao Yao, Zeng Yangsu. Study of grating diffractive field′s degree of polarization and angular coherence of partially polarized and coherent beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 822～827
肖擎纲，肖　尧，曾阳素. 随机电磁光束光栅衍射场的偏振特性和角相关研究[J]. 光学学报，2008，**28**(5)：822～827

11 Lianzhou Rao, Jixiong Pu. Generation of partially coherent vortex bottle beams[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 379～382

12 Dong Hongcheng, Liu Yang, Yi Kui *et al*.. Theory analysis of polarized beam coherent combination[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2346～2351
董洪成，刘　阳，易　葵 等. 偏振光束相干合成的理论分析[J]. 中国激光，2009，**36**(9)：2346～2351

13 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. 部分相干光束并合的光束传输变换特性[J]. 中国激光，2009，**36**(9)：2337～2340

14 Y. Cai, Y. Chen, H. T. Eyyuboglu *et al*.. Propagation of laser array beams in a turbulent atmosphere[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **88**: 467～465

15 Yu Hong, Li Jinhong, Lü Baida. Propagation properties of radial Lorentz array beam in free space[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(6): 1201～1205
于　虹，李晋红，吕百达. 洛伦兹阵列光束在自由空间的传输特性[J]. 强激光与粒子束，2010，**22**(6)：1201～1205

16 Pan Leilei, Zhang Bin, Pan Pingping. Spectral shift of partially coherent rectangular array beams in free space[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(7): 1473～1478
潘雷雷，张　彬，潘平平. 部分相干矩形阵列光束在自由空间的谱移[J]. 强激光与粒子束，2010，**22**(7)：1473～1478

17 Lü Baida. Propagation and Control of High Power Lasers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999
吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京：国防工业出版社，1999

18 F. Gori, M. Santarsiero, G. Piquero *et al*.. Partially polarized Gaussian Schell-model beams[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2001, **3**(1): 1～9

19 F. Gori, M. Santarsiero, S. Vicalvi *et al*.. Beam coherence-polarization matrix[J]. *Pure Appl. Opt.*, 1998, **7**(5): 941～951

20 G. Piquero, J. M. Movilla, P. M. Mejias *et al*.. Beam quality of partially polarized beams propagating through lenslike birefringent elements[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(11): 2666～2668

21 A. Erdelyi *et al*.. Tables of Integral Transform, vol. 1[M]. New York: McGraw-Hill, 1954

22 R. Martinez-Herrero, P. M. Mejias, J. M. Movilla. Spatial characterization of general partially polarized beams[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(4): 206～208

23 M. J. Bastianns. Application of the Wigner distribution function to partially coherent light[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(8): 1227～1238

24 Chunqing Gao. Characterization and Transformation of Astigmatic Laser Beams[M]. Berlin: Wissenschaft und Technik Verlag. 1999

25 S. A. Amarande. Beam propagation factor and the kurtosis parameter of flattened Gaussian beams[M]. *Opt. Commun.*, 1996, **129**(5～6): 311～317