

## 部分相干光聚焦场特性的分析\*

吕百达 张 彬 蔡邦维

(四川大学光电科学技术系, 成都, 610064)

**摘要:** 基于广义衍射积分和部分相干光理论, 本文对高斯-谢尔模型光束通过有光阑透镜和列阵线聚焦光学系统的聚焦场特性作了物理分析和数值计算, 得出了一些对实际工作有用的结果。

**关键词:** 部分相干光 高斯-谢尔模型光束 光阑透镜 列阵线聚焦系统 聚焦场

## Analyzing the focused field properties of partially coherent light

Lu Baida, Zhang Bin, Cai Bangwei

(Dept. of Opto-Electronic Science & Technology, Sichuan University)

**Abstract:** On the basis of the generalized diffraction integral and theory of partially coherent light, the focused field properties of Gaussian Schell-model beams passing through an aperture lens and array line focus systems are analyzed physically and calculated numerically. Some useful results for the practical application are obtained.

**Key words:** partially coherent light Gaussian Schell-model (GSM) beam aperture lens array line focus system focused field

### 一、引言

众所周知, 光场的聚焦特性是光学中一个基本而重要的问题, 在 Born 和 Wolf 的名著《光学原理》中, 对均匀平面波被一个有孔径薄透镜聚焦后, 焦点附近的衍射场作了详细讨论, 借助于 Lommel 函数和数值积分, 研究了几何焦面、光轴上、几何阴影边界上的光强分布, 积分强度和衍射场的位相特性等问题<sup>[1]</sup>。80 年代初, Li 和 Wolf 对经典聚焦场理论作了修正, 并用于分析小菲涅尔数系统和高斯光束的焦移<sup>[2,3]</sup>。光学中另一个重要问题是光场的相干性。利用傅里叶变换, Mandel 和 Wolf 将空间-时间域的部分相干光理论<sup>[1]</sup>推广到空间-频率域, 采用了更为方便的交叉谱密度函数  $W$ , 空间复相干度  $\mu$  和相干参数  $\beta$  等物理量来描述光场的部分相干性<sup>[4,5]</sup>。基于高斯-谢尔模型 (GSM) 光束的相干模分解理论<sup>[6]</sup>, 可以证明, 在一定条件下, 能用

\* 本文主要内容曾在国家高技术 ICF 光束传输研讨会(深圳, 1994 年 12 月)上报告。



3 李国华, 吴福全, 于德洪. 应用光学, 1991; 12(4): 21~25

4 Driscoll W, Sponsored by OSA. Handbook of Optics. McGraw-Hill Book Co, 1978; 7~78

作者简介: 黄家寅, 男, 1956 年出生。副教授。现从事偏光技术及理论物理方面的研究。

吴福全, 男, 1952 年出生。教授。现从事偏光器件及偏光技术方面的研究。

收稿日期: 1995-01-09 收到修改稿日期: 1995-09-20

GSM 光束来模拟多模激光,在准单色场近似下,就简化为具有部分空间相干性的 GSM 光束聚焦特性研究<sup>[5]</sup>。由于在实际工作中(例如工业激光材料加工机和惯性约束聚变驱动器输出高功率激光)常遇到的都是具有部分相干性的多模激光,因此研究 GSM 光束的聚焦特性及其与理想完全相干和均匀平面波聚焦特性的异同是有实际意义的。本文将系统地阐述部分相干光通过有光阑透镜和列阵线聚焦光学系统的聚焦场特性的主要研究结果。

## 二、GSM 光束通过有光阑透镜的聚焦特性

由部分相干光的传输定律和广义衍射积分可知<sup>[5]</sup>,交叉谱密度函数为  $W_0(u_1', u_2', Z = 0)$  的部分相干光通过  $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$  光学系统的变换由下式描述

$$W(u_1, u_2, Z) = \left(\frac{k}{2\pi B}\right)^2 \iiint \int W_0(u_1', u_2', 0) \exp\left\{-\frac{ik}{2B}[A(u_1'^2 - u_2'^2) - 2(u_1 u_1' - u_2 u_2') + D(u_1^2 - u_2^2)]\right\} du_1' du_2' \quad (1)$$

$$W_0(u_1', u_2', 0) = I_0 \exp\left(-\frac{u_1'^2 + u_2'^2}{W_0^2}\right) \exp\left[-\frac{(u_1' u_2')^2}{2\sigma_0^2}\right] \quad (2)$$

式中,  $W_0, \alpha_0$  分别为入射 GSM 光束的光腰尺寸和相关长度,  $k$  为波数,  $I_0$  为一常数,  $(u_1', u_2', 0), (u_1, u_2, Z)$  分别为源点和场点的坐标。(1)式在傍轴近似下成立,并且已作了准单色场近似,故略去与频率有关量,入射光束参数取在  $Z=0$  处。当 ABCD 光学系统为焦距  $f$ , 光阑半径  $a$  的薄透镜时

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +\Delta Z & f(1+\Delta Z) \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中,  $\Delta Z = (Z - f)/f$  (4)

将(2)式、(3)式代入(1)式,在柱坐标下积分,得到轴上( $u_1 = u_2 = 0$ )光强  $I(u=0, u)$  为

$$I(u=0, u) = W(u_1=0, u_2=0, u) = 4\pi^2 N_w^2 I_0 \left(1 - \frac{u}{\pi N_w}\right)^2 \left\{ \frac{1 - \exp\left(\Gamma_2 - \frac{1}{4\Gamma_1 \alpha^4}\right)\delta - \exp\left(\Gamma_1 - \frac{1}{4\Gamma_2 \alpha^4}\right)\delta}{4\Gamma_1 \Gamma_2 - \alpha^{-4}} + \frac{\exp[(\Gamma_1 + \Gamma_2)\delta]}{4\Gamma_1 \Gamma_2} \right\} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{4\Gamma_1 \Gamma_2 \alpha^4}\right)^n \sum_{m=-n}^{\infty} \left(-\frac{1}{2\Gamma_2 \alpha^2}\right)^m I_m\left[\left(\frac{\delta}{\alpha^2}\right)\right] \quad (5)$$

式中,  $N_w = W_0^2/(\lambda f)$  (6)

为与光束有关的菲涅尔数,它与光阑菲涅尔数  $N_a$  关系为

$$N_a = a^2/(\lambda f) = \delta N_w \quad (7)$$

$$\sigma = (a/W_0)^2 \quad (8)$$

为截断参数,  $\beta = [1 + (1/\alpha^2)]^{-1/2}$  (9)

$$\alpha = \sigma_1/W_0 \quad (10)$$

为相干性参数  $0 \leq \beta \leq 1, 0 \leq \alpha \leq +\infty, \beta=0, \alpha=0$  和  $\beta=1, \alpha=+\infty$  分别对应于完全非相干和完全相干情况。

$$u = \pi N_w \Delta Z / (1 + \Delta Z) \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Gamma_1 = -1 - (1/2\alpha^2) + iu \\ \Gamma_2 = -1 - (1/2\alpha^2) - iu \end{cases} \quad (12)$$

$$I_m \text{ 为 } m \text{ 阶修正贝塞尔函数。} \quad \frac{dI}{d\Delta Z} = \frac{dI}{du} \cdot \frac{du}{d\Delta Z} = 0 \quad (13)$$

可求出最大光强的位置  $Z_{max}$ 。计算和分析都表明,  $Z_{max}$  一般不等于  $f$ , 即最大光强点并不与几何焦点重合, 这即焦移, 一般用相对焦移来描述

$$\Delta Z_f = (Z_{max} - f)/f \quad (14)$$

从(1)式出发, 还可求出聚焦场轴外的光强分布  $I(u_1 - u_2 \cong u, u)$  和光强为常数点的轨迹, 称为等照线。此外亦能得出积分强度或称环绕能量  $L$ , 它表示在吸收面 ( $u = \text{常数}$ ) 上, 半径为  $b$  的圆内的积分强度占入射到该面上的总积分强度之比。在二维情况下

$$L(b, \Delta Z) = \frac{\int_{-b}^b I(x, \Delta Z) dx}{\int_{-a}^a W_0(x'_1 = x'_2 = x, 0) dx} \quad (15)$$

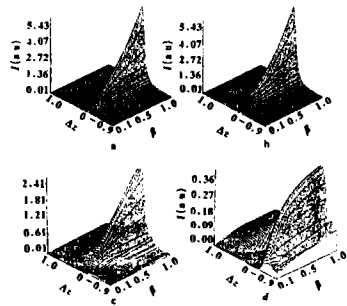


Fig. 1 The axial intensity distribution  $I(au)$  of a GSM beam VS  $\Delta Z$  and  $\beta$   
 a -  $\delta = \infty$  b -  $\delta = 4.6$  c -  $\delta = 1$  d -  $\delta = 0.2$  the tresnel number  $N_w = 5$

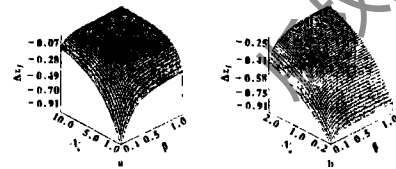


Fig. 2 The relative focal shift  $\Delta z_f$  of a GSM beam against  $N_w$  (or  $N_a$ ) and  $\beta$   
 a -  $\sigma = 1$  b -  $\sigma = 0.2$

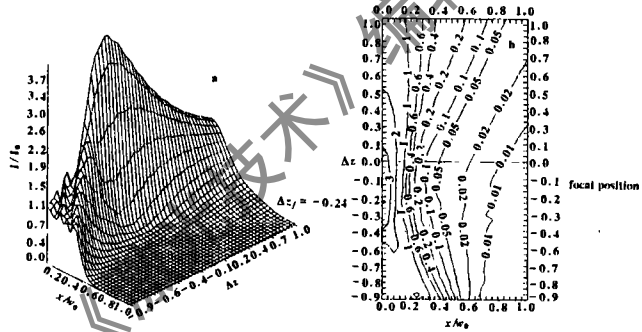


Fig. 3 a - normalized intensity  $I/I_0$  of a GSM beam focused by an aperture lens as a function of  $x/W_0$  and  $\Delta z$ ,  $\beta = 0.5$   $N_a = 1.25$   $a/W_0 = 0.5$  b - isophote diagram corresponding to Fig. 3a

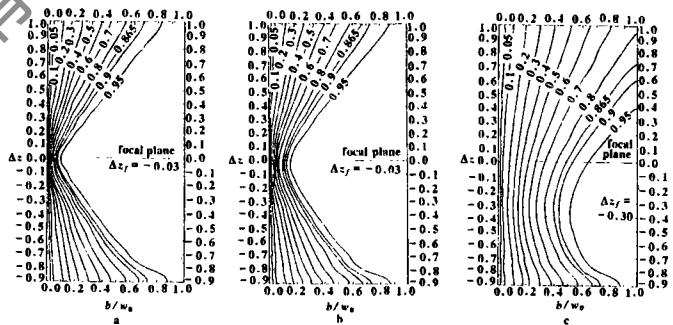


Fig. 4 Contour lines of integrated intensity for the system of  $N_a = 5$  and  $\delta = 1$   
 a -  $\beta = 0.9$  b -  $\beta = 0.5$  c -  $\beta = 0.1$

利用(1), (5), (13)和(15)式解作典型数值计算例示于图1~4。由图可得出以下结论:

1. 光衍射效应随截断参数  $\delta$  的增加和相干参数  $\beta$  的减小而减小(见图1)。比较图1a和图1b可知, 当  $\delta^{1/2} > 2$  时, 光阑衍射效应可忽略。
2. 图1~4说明, 焦移与菲涅尔数、截断参数和入射光的相干性都有关系,  $|\Delta Z_f|$  随  $N_w$  的减小,  $\delta$  的减小和  $\beta$  减小而增加。并且, 当光阑与透镜在同一位置时, 有  $\Delta Z_f \leq 0$ , 即轴上光强最大点总向光阑透镜方向移动。
3. 在图3的光强分

布,等照线和图4的积分强度图中,因考虑了入射光束相干性和光强分布不均匀性影响,而与经典结果有较大差异。计算表明,当令  $\beta=1$  和  $W_0 \rightarrow \infty$  时,就化为 Li 的结果。进一步,若  $N_a \gg 1$ ,就回到经典理论的结果。

### 三、部分相干光通过列阵线聚焦光学系统的聚焦特性

在 X 光激光产生实验中,已提出两类有代表性的列阵线聚焦光学系统,即图 5 所示柱透镜列阵(CLA)和光楔列阵(SWA)系统<sup>[7,8]</sup>。其基本物理思想都是利用列阵对入射光束分割,因“积分”叠加效应而补偿了入射光束的强度分布不均匀对焦线均匀性的影响,以改善靶面上线聚焦的均匀性。但因子孔径分割引起列阵单元衍射和通过各单元子光束间的多光束干涉,沿焦线长度方向的强度分布是一个典型的受衍射调制的多光束干涉的卷积。由(1),(2)式出发,略去中间推导过程,得到列阵线聚焦光学系统对 GSM 光束的变换可用聚焦场的交叉谱密度函数  $W(x_1, y_1, x_2, y_2, z)$  表示为

$$W(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \sum_{m=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} W_{mn}(x_1, y_2, x_2, y_2, z) \quad (16)$$

式中,  $W_{mn}$  为与列阵第  $m, n$  单元有关的交叉谱密度函数

$$W_{mn}(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \left( \frac{k}{2\pi z} \right)^2 \int_{d(m-1/2)}^{d(m+1/2)} \int_{d(m-1/2)}^{d(m+1/2)} \int_{-D/2}^{D/2} \int_{-D/2}^{D/2} T_m(y'_1) T_n^*(y'_2) T(x'_1, y'_1) T^*(x'_2, y'_2) W_0(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, 0) \exp \left\{ \frac{ik}{2z} [(x'_1{}^2 - x'_2{}^2) - 2(x_1 x'_1 - x_2 x'_2) + (x_1{}^2 - x_2{}^2)] \right\} \exp \left\{ \frac{ik}{2z} [(y'_1{}^2 - y'_2{}^2) - 2(y_1 y'_1 - y_2 y'_2) + (y_1{}^2 - y_2{}^2)] \right\} dx'_1 dx'_2 dy'_1 dy'_2 \quad (17)$$

$T_j(y'_j)$  为第  $j$  个列阵单元的振幅透过率 ( $j = m, n$ )。  $T(x'_i, y'_i)$  为主聚焦透镜(对 CLA 为球面镜,对 SWA 为柱透镜)的振幅透过率 ( $i = 1, 2$ )。  $D = Nd$  (18)

$D, N$  分别为列阵的总口径尺寸和单元数,  $d$  为列阵单

元的宽度。(16),(17)式是对列阵线聚焦光学系统都适用的一般公式。在(16)式中令  $x_1 = x_2 = x, y_1 = y_2 = y$ , 并注意  $x, y$  变量可分离特点,就得到沿线长  $y$  方向和沿线宽  $x$  方向的光强分布  $I(y, \Delta z)$  和  $I(x, \Delta z)$ 。

$$I(x, y, \Delta z) = W(x_1 = x_2 = x, y_1 = y_2 = y, \Delta z) = I(x, \Delta z)I(y, \Delta z) \quad (19)$$

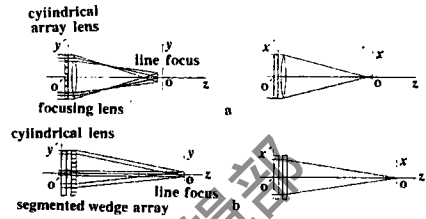


Fig. 5 Two types of array line focus system  
a - a segmented wedge array system  
b - a cylindrical lens array system

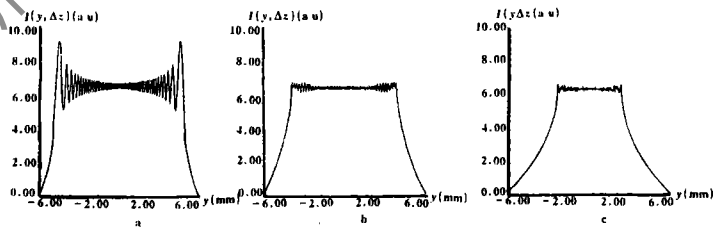


Fig. 6 The intensity distribution  $I(y, \Delta z)$  (a.u.) along the line focus length  
a -  $\Delta z = 0$  b -  $\Delta z = 8\text{mm}$  c -  $\Delta z = 20\text{mm}$ . The parameters for calculations are  $d = 10\text{mm}$ ,  $N = 11$ ,  $Z = f = 400\text{mm}$ ,  $\beta = 0.1$  and  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$

利用(16), (17)和(19)式对光楔列阵系统所作典型数值计算例见图6~7。由图知:1. 将靶面适当离开焦面(比较图6a, 图6b)有利于改善线聚焦均匀性, 但若离焦量 $\Delta z$ 太大(图6b), 则导致“平顶”变窄和出现塌边, 因而有一最佳离焦位置。2. 用相干性较差激光比相干性好的激光产生较小的条纹对比度。定义不均匀度

$$\eta = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (20)$$

$I_{\max}$ ,  $I_{\min}$ 分别为沿线长方向最大和最小光强值, 图7为对应于最佳离焦位置所得最佳 $\eta_{\text{opt}}$ 随相干参数 $\beta$ 的变化。显然, 减小入射光的相干性有利于实现均匀线聚焦。但是对 $I(x, \Delta z)$ 的计算表明, 因 $\beta$ 减小会导致沿 $x$ 方向线宽的增大, 因而在实际工程设计中, 对此应予兼顾考虑。

#### 四、结 论

我们的研究工作将聚焦场的经典理论推广到包括不同菲涅尔数(尤其是小菲涅尔数)的光学系统、有不均匀强度剖面的部分相干光入射于有光阑透镜和列阵光学系统的一般情况, 具有更为普适性意义。计算和分析表明, 当不计入射场的部分相干性( $\beta=1$ )和光强分布不均匀性时, 就化为Li的结果。进一步对菲涅尔数 $N_s \gg 1$ 系统, 就回到经典聚焦场理论。

聚焦场的特性, 包括轴上光强分布、三维光强分布和积分强度等与聚焦光学系统和入射场的特性都有关系。决定焦移的主要物理量是菲涅尔数 $N_s$ (或 $N_o$ ), 截断参数 $\delta$ 和相干参数 $\beta$ 。

在聚焦光学系统设计中, 尤其是对强激光入射情况, 考虑入射场的相干性、选择合适的聚焦系统类型和参数是十分重要的。实际工作中, 最好能同时进行衍射分析和象差计算, 并与实验比较修正, 以求得到最佳效果。

在本文的分析中, 未计强激光聚焦非线性效应的影响。事实上, 迄今对焦区自聚焦和其它非线性效应的瞬态动力学问题尚未完全解决。此外, 入射部分相干光(一般地, 应是时间和空间的部分相干光)的振幅调制和位相畸变对聚焦场特性的影响也是实际工作中经常遇到的。对此应作进一步的研究。

该项工作得到国家高技术863-416-2的资助。本文作者感谢参与对靶面均匀照明技术所作富有启发性讨论的邓锡铭院士和范滇元教授。

#### 参 考 文 献

- 1 Born M, Wolf E. Principles of Optics. Pergamon Press, 1964; 435~449, 491~555
- 2 Li Y, Wolf E. Opt Commun, 1981; 39(4): 211~215
- 3 Li Y, Wolf E. Opt Commun, 1982; 42(3): 151~156
- 4 Mandel L, Wolf E. J O S A, 1976; 66(6): 529~535
- 5 Shirai T, Asakura T. Optik, 1993; 94(1): 1~15
- 6 张 彬, 吕百达. 高斯-谢尔模型光束的相干模表示(to be published)
- 7 陈万年, 王树生, 陈 斌 et al. 光学学报, 1991; 11(9): 829~833
- 8 Villeneuve D M, Enright G D, Baldis H A. Opt Commun, 1991; 81(1, 2): 54~58

\* 作者简介: 吕百达, 男, 1943年生。教授、博士生导师。主要研究方向为新型和高功率固体激光器件与技术, 光腔物理与光束传输变换。

收稿日期: 1995-01-06

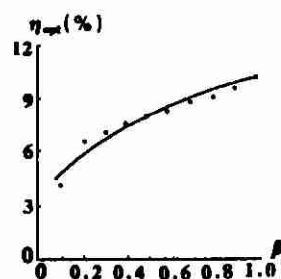


Fig. 7 The optimal nonuniformity  $\eta_{\text{opt}}$  against coherent parameter  $\beta$ ,  $N = 11$

