

文章编号: 1001-3806(2003)05-0463-03

## 激光束的分类\*

彭愿洁<sup>1</sup> 吕百达<sup>1,2</sup>

(1 四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064) (2 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

**摘要:** 对激光光学中一个十分有意义的论题, 即激光束的分类作了综述和分析。基于二阶矩方法和维格纳分布函数, 激光束可以按照其空间对称性分为无像散光束、简单像散光束和复杂像散光束。另一方面按空间相干性激光束可分为部分空间相干光和完全空间相干光。对各类激光束的独立特征参数及其联系作了分析。

**关键词:** 激光束分类; 空间对称性; 空间相干性; 维格纳分布函数; 二阶矩

**中图分类号:** O437 **文献标识码:** A

### Laser beam classification

Peng Yuanjie<sup>1</sup>, Lü Baida<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

(2 National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** The laser beam classification, a very interesting subject in laser optics, is reviewed and analyzed. Based on the second-order moment method and Wigner distribution function, and in accordance with their spatial symmetry, laser beams can be classified as three types, i. e. stigmatic (ST) beams, simple astigmatic (SA) beams and general astigmatic (GA) beams. On the other hand, according to their spatial coherence, there are two types of laser beams, namely, partially coherent beams and fully coherent beams. The independent characteristic parameters of different types of laser beams and their relation are analyzed.

**Key words:** laser beam classification; spatial symmetry; spatial coherence; Wigner distribution function; second-order moment

### 引言

一般而言, 光束是指以小的发散角定向传输的光频电磁波。光束描述和分类的含义是用合适的数学-物理模型、特征函数和物理参数来描述实际的光束, 并按照一定的规则对光束进行分类, 这是一个涉及范围相当广泛的研究论题, 不仅有基础理论研究意义, 而且有重要实际应用价值。实际的激光束, 尤其是高功率激光束是非常复杂的, 不可能用一个简单的数学-物理模型来统一和完整地描述, 也不可能用一个简单的参数来评价它的物理特性, 也不可能用一个简单的公式来表征它的传输变换规律, 只能根据研究对象和应用目的进行合理的近似和简化, 因此, 对光束的描述和分类有多种方法。目前, 为国际标准化组织 (ISO) 推荐对光束空间特性的描述是

基于二阶矩方差矩阵的方法<sup>[1]</sup>, 其主要优点是应用范围较广, 数学方法不太复杂, 所定义的二阶矩参数有明确物理意义, 可以进行实验测量。并且, 可由方差矩阵的独立矩阵元数目对光束按其空间对称性进行分类<sup>[2]</sup>。此外, 按照光束的空间相干性进行分类也是一种有用的方法<sup>[3,4]</sup>。文中对这些问题作了综述和分析, 并且讨论了两种分类中用以描述光束独立特征参数之间的关系。

### 1 利用空间对称性对光束分类

光束可以按其空间对称性 (包括  $x, y$  参数耦合特性) 分为 3 大类<sup>[2,5]</sup>: 无像散光束 (stigmatic beam, 简称 ST 光束)、简单像散光束 (simple astigmatic beam, 简称 SA 光束) 和复杂像散光束 (general astigmatic beam, 简称 GA 光束), 分别对应于光束所具有的旋转对称性、正交对称性 (有两个相互正交的对称面) 和无正交对称性, 且  $x, y$  参数有耦合。

光束的空间分布性质与光束的二阶矩方差矩阵的独立矩阵元数目直接相关。为了得到光束二阶矩

\* 华中科技大学激光技术国家重点实验室资助项目。

作者简介: 彭愿洁, 女, 1980 年 9 月出生。硕士研究生。从事激光束传输变换方面的研究工作。

收稿日期: 2003-01-23; 收到修改稿日期: 2003-02-20

的定义,从光束的交叉谱密度函数  $(r_1, r_2)$  出发, 式中:  $r_i = [x_i \ y_i]$  ( $i = 1, 2, \text{下同}$ ) (1)

定义维格纳分布函数:

$$W(r, ) = \frac{k^2}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ r + \frac{r}{2}, r - \frac{r}{2} \right] \exp(-ikr^T) dr$$

$$r = \frac{r_1 + r_2}{2}, r = r_1 - r_2, = [x \ y] \quad (2)$$

式中,  $k$  为波数,光束的总功率为:

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} W(r) d = [r \ ] \quad (3)$$

一阶矩定义为:

$$x = \frac{1}{P} \int_{-\infty}^{+\infty} x W(r) d \quad (4)$$

同样可定义  $y, x, y$ , 这 4 个一阶矩表示光束的重心。可以通过适当地选择坐标系令  $x = y = x = y = 0$ , 此时高阶矩定义为<sup>[6]</sup>:

$$x^m y^n x^k y^l = \frac{1}{P} \int_{-\infty}^{+\infty} x^m y^n x^k y^l W(r) d \quad (5)$$

显然共有 10 个二阶矩参数  $x^2, y^2, xy, x_x, y_y, x_y, y_x, x^2, y^2, x_y, y_x$ 。其物理意义为:  $x^2, y^2$  与束宽平方成正比,  $x^2, y^2$  正比于远场发散角的平方,  $x_x, y_y$  反比于光束在  $x$  和  $y$  方向等相面曲率半径,  $x_y, y_x$  分别为光束在近场和远场的取向,  $x_y, y_x$  为与光束扭曲有关的参数。理论上,对光束的完全描写要求所有强度矩的知识,但实际上,对多数情况,采用 10 个二阶矩就能对光束进行足够好的描述。将这 10 个独立参数写成  $4 \times 4$  方差矩阵  $V$  的形式:

$$V = \begin{bmatrix} W & M \\ M^T & U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & M_{11} & M_{12} \\ W_{12} & W_{22} & M_{21} & M_{22} \\ M_{11} & M_{21} & U_{11} & U_{12} \\ M_{12} & M_{22} & U_{12} & U_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^2 & xy & x_x & x_y \\ xy & y^2 & y_x & y_y \\ x_x & y_x & x^2 & x_y \\ x_y & y_y & x_y & y^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

上标  $T$  表示矩阵转置。(6)式可简记为:

$$V = \begin{bmatrix} W & M \\ M^T & U \end{bmatrix} = \frac{1}{P} \int_{-\infty}^{+\infty} (r^T)^T W(r) d \quad (7)$$

用分块矩阵  $W, M, U$  来表示  $V$  是因为它们具有各自明确的物理意义。 $W, U$  是  $2 \times 2$  对称矩阵,分别为与光束束宽、远场发散角有关的参数。 $M$  不一定对称,所含参数表征光束空间域与空间频率域的耦

合性质。光束不同的空间对称性直接影响方差矩阵  $V$  所包含的独立参数个数。

### 1.1 ST 光束

这是最简单的光束。ST 光束的二阶矩矩阵中 3 个  $2 \times 2$  分块矩阵  $W, M, U$  都是常量乘以单位矩阵,光束参数必须满足如下条件:

$$W_{11} = W_{22} = W, M_{11} = M_{22} = M, U_{11} = U_{22} = U,$$

$$W_{12} = M_{12} = M_{21} = U_{12} = 0 \quad (8)$$

其独立二阶矩参数最多只有 3 个:空间域参数  $W$ , 空间频率域参数  $U$  及空间域和空间频率域耦合参数  $M$ 。因此,其二阶矩矩阵退化为  $2 \times 2$  对称矩阵:

$$V = \begin{bmatrix} W & M \\ M & U \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 1.2 SA 光束

1.2.1 准直 SA 光束 SA 光束的二阶矩矩阵中各分阵  $W, M, U$  都是对称矩阵,且有相同的主轴。如果此主轴与实验室坐标系的  $x, y$  轴相重合,就称之为准直 SA 光束(aligned astigmatic beams, ASA 光束),其光束参数满足如下条件:

$$W_{12} = M_{12} = M_{21} = U_{12} = 0 \quad (10)$$

$V$  阵有最多 6 个独立参数。

1.2.2 旋转 SA 光束 如果其主轴对实验室坐标系有角度为  $\phi$  的旋转,则有<sup>[2]</sup>:

$$V_\phi = V^T \quad (11)$$

$V_\phi$  为旋转后的二阶矩矩阵,  $V$  为旋转矩阵:

$$V_\phi = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (12)$$

旋转后的 SA 光束的参数满足条件为:

$$M_{12} = M_{21},$$

$$\frac{W_{12}}{W_{11} - W_{22}} = \frac{M_{12}}{M_{11} - M_{22}} =$$

$$\frac{U_{12}}{U_{11} - U_{22}} = \frac{1}{2} \tan(2\phi) \quad (13)$$

因此,最多有 7 个独立的二阶矩参数,称这种光束为旋转 SA 光束(rotated astigmatic beams, RSA 光束)。SA 光束的二阶矩矩阵中的 3 个子矩阵可以通过空间域和空间频率域的坐标旋转同时对角化。

1.2.3 GA 光束 这是最复杂的一类光束。任何光束只要不满足(13)式中的任意一个等号,即为 GA 光束。GA 光束的独立参数最多有 10 个,最少有 4 个。其二阶矩矩阵中的 3 个分矩阵没有共同的

主轴,它们不能通过空间域和空间频率域的坐标旋转同时对角化。

## 2 利用空间相干性对光束分类

还可以按光束的空间相干性来对光束进行分类<sup>[3,4]</sup>。根据光束的交叉谱密度函数是否具有可分离的形式,或者等价地说,描述光束的特征参数中空间坐标的交叉项是否为 0 来进行划分。

### 2.1 部分相干光束

部分相干光束的交叉谱密度函数  $(r_1, r_2)$  不可分离,即:

$$(r_1, r_2) = E(r_1) \cdot E^*(r_2) \quad (14)$$

$(r_1, r_2)$  中有交叉项。 $(r_1, r_2)$  可表示为:

$$(r_1, r_2) = A_0 \exp\{- [r_1(a + ib)r_1^T + r_2(a - ib)r_2^T + r_1 cr_2^T]\} \quad (15)$$

$a, b$  是  $2 \times 2$  实对称矩阵,各含最多 3 个独立参数。矩阵  $c$  不一定是实矩阵也不一定具有对称性,含最多 4 个独立参数。因此共有最多 10 个独立参数。

特别地,当  $a = aI, b = bI, c = cI$   $I = \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix}$  时,

部分相干光束独立参数个数为最少,即 3 个。

### 2.2 完全空间相干光束

当  $c = 0$  时,为完全空间相干光束,其交叉谱密度函数为:

$$(r_1, r_2) = E(r_1) \cdot E^*(r_2) = A_0 \exp[-r_1(a + ib)r_1^T - r_2(a - ib)r_2^T] \quad (16)$$

即具有可分离的形式。 $a, b$  同样是  $2 \times 2$  实对称矩阵,各含最多 3 个独立参数。因此共有最多 6 个,最少 2 个独立参数。当  $a = aI, b = bI$  时,空间相干光束独立参数个数为最少,即 2 个。

### 参 考 文 献

- [1] ISO/DIS 11146 Document. Test methods for laser beam parameters: beam widths, divergence angle, and beam propagation factor. 1999.
- [2] Nemes G, Serna J. TOPS, 1998, 17: 200 ~ 207.
- [3] Simon R, Mukunda N. J O S A, 1993, A10(1): 95 ~ 109.
- [4] Simon R, Sudarshan E C G, Mukunda N. Phys Rev, 1985, A31(4): 2419 ~ 2434.
- [5] Arnaud J A, Kogelnik H. Appl Opt, 1969, 8(8): 1687 ~ 1693.
- [6] Eppich B. Die charakterisierung von strahlungsfeldern mit der wigner-vertelung und deren messung. Berlin: Chromapress, 1998: 27.

(上接第 462 页)

## 4 结束语

利用激光铣削技术可以对单晶硅进行较高速率的铣削加工。铣削工艺参数直接影响到铣削量和铣削面质量,当铣削工艺选择过高的激光输入能量、较慢的激光束扫描速度和较高的重复频率,不仅显著降低了铣削量,而且铣削面质量较差。采用复合激光铣削可以在不降低速率情况下提高表面质量。选

择合适的激光铣削工艺,可以在单晶硅片表面上较高效率地铣削出多样图形。

### 参 考 文 献

- [1] 黑泽宏. レーザ—研究, 1998, 26(1): 33 ~ 39.
- [2] 黑部利次. 精密工学会, 1996, 62(1): 95 ~ 99.
- [3] 李祥友, 曾晓雁, 刘 勇 *et al.* 中国激光, 2001, 28(12): 1125 ~ 1128.
- [4] von 奥尔曼 M. 激光束与材料相互作用的物理原理及应用. 北京: 科学出版社, 1994: 7.