

激光束空间质量评价

陆治国

(西北大学, 西安 710069)

TN241

②

53-58, 68

A 摘要: 本文概要介绍了国际标准化组织文件 ISO/TC172/SC9/WG1 N56 在 1993 年 11 月 26 日公布的激光术语和测试方法。此外还指出光束的空间相干性在光束空间质量评价中也应重视。

关键词: 光束质量, 传播因子, 衍射极限倍因子, 空间相干性

激光器

Evaluation of space quality on laser beam

Lu Zhiguo

(Northwest University, Xi'an 710069)

Abstract: The paper is introduced an outline of ISO/TC 172/SC9/WG1 N56 which promulgated the document of terminology and test methods for laser beam by international organization for standardization in 26 Nov. 1993. It must be pointed out that space coherence of beam is highly important for light beam quality evaluation.

Key Words: beam quality, beam propagation factor, times — diffraction — limit — factor, space coherence

1 引言

由于激光器的广泛应用, 其光束质量的评价日益引起人们的重视, 为此, 欧共体国家委托国际标准化组织 (ISO) 下属激光委员会 SC 9 第一工作组 WG1 自从 1990 年以来几次讨论先后分别提出了相应的文件, 下面着重介绍 1993 年 11 月 26 日公布的文件。此文比以前讨论稿有些改动, 对 M^2 由质量因子 (the beam quality factor) 改为衍射极限倍因子 (Times — diffraction — limit — factor)。具体测试方法的规定更严格和明确。主要涉及光学和光学仪器、激光器和激光相关仪器, 激光光束参量: 光束宽度、发散角和光束传播因子的测试方法。这些方法仅限于测量稳定谐振腔的激光和没有清晰锐边的非稳定腔激光。

2 原理和定义

• 1994 年 12 月 26 日收稿

2.1 激光束参数表述

由稳定谐振腔发出的任何激光束,其主要参数是光束宽度(光束直径),发散角和光束传播因子。对于对称分布的激光束,我们主要的测试任务是:

光束的腰斑位置 Z_0

光腰处的光束直径 d_{00}

远场发散角 θ_0

有了这三个量就可决定光束在传播轴上任一垂直平面上的光束直径。在一级近似下,光束的传播方程是

$$d_z^2(Z) = d_{00}^2 + (Z - Z_0)^2 \theta_0^2$$

由上述光腰直径 d_{00} 和远场发散角 θ_0 可定义光束的传播因子 K 和衍射极限倍因子 M^2 如下:

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{4\lambda_0}{\pi} \frac{1}{nd_{00}\theta_0}$$

式中 λ_0 ——真空中光束的波长;

n ——折射率;

乘积 $nd_{00}\theta_0 = \frac{4\lambda_0}{k\pi} = M^2 \frac{4\lambda_0}{\pi}$ 实质上描述了激光束不变的穿过无畸变和无孔径的光学系统,这就是几何光学中的拉格朗日不变量,其平方表征光学系统发射功率的能力。

当光束为非圆对称时(长短轴比超过 1.15)其参数应由七个量表征:束腰位置 Z_{0x}, Z_{0y} , 腰宽 d_{00x}, d_{00y} ; 远场发散角 θ_{0x} 和 θ_{0y} , 主轴方位角 φ 。

对于上述论及的光束宽度,可以通过测得功率(或能量)分布的二阶矩求得,也可以通过实验直接测量光束宽度而把间接测量二阶矩的方法作为比较已取得的结果。

2.2 由光束功率(能量)分布的二阶矩决定光束宽度

对于高斯光束,可以证明束宽

$$d_{0x}(Z) = 4\sigma_x(Z)$$

$$d_{0y}(Z) = 4\sigma_y(Z)$$

柱坐标束直径 $d_r(Z) = 2\sqrt{2}\sigma(Z)$

在位置 Z 处,功率密度 $E(X, Y, Z)$ 的二阶矩表示式如下:

$$\sigma_x^2(Z) = \frac{\iint (x - \bar{x})^2 E(x, y, z) dx dy}{\iint E(x, y, z) dx dy}$$

$$\sigma_y^2(Z) = \frac{\iint (y - \bar{y})^2 E(x, y, z) dx dy}{\iint E(x, y, z) dx dy}$$

在柱坐标:

$$\sigma^2(Z) = \frac{\iint r^2 E(r, z) r dr d\varphi}{\iint E(r, z) r dr d\varphi}$$

r 是到坐标中心的径向距离。对直角坐标系中心坐标 $\bar{x}, \bar{y}$ 可由一阶矩得出

$$\bar{x} = \frac{\iint x E(x, y, z) dx dy}{\iint E(x, y, z) dx dy}$$

$$\bar{y} = \frac{\iint y E(x, y, z) dx dy}{\iint E(x, y, z) dx dy}$$

积分区域只在 XY 平面上做即可。总的积分功率或能量也只有 99%。

此外,如果光束轴和实验室 (X', Y', Z) 系统中光轴不重合,可由混合矩 $\sigma_{x'y'}$ 和二阶矩 $\sigma_{x'}^2, \sigma_{y'}^2$ 算出其间的方位角 φ ,混合矩可写为:

$$\sigma_{x'y'}(Z) = \frac{\iint (x' - \bar{x}')(y' - \bar{y}') E(x', y', z) dx' dy'}{\iint E(x', y', z) dx' dy'}$$

3 测试原理及对测试装置的要求

3.1 测试原理

3.1.1 束宽和光束直径

先测量光束传播方向某处 Z 的 XY 横截面上的功率或能量的密度函数,就可求出一阶矩,即 $\bar{x}, \bar{y}$ 。进一步算出二阶矩 $\sigma_{x'}^2, \sigma_{y'}^2$ 或 σ^2 即可求得束宽 $d\sigma_x, d\sigma_y$ 或光束直径 d 。

3.1.2 发散角

测量发散角是以上述束宽和光束直径的测量为基础的。另外,考虑到,某些激光器的远场距激光器很远,利用拉格朗日不变量原理,可以用一无畸变的聚焦系统来完成。激光器通过聚焦元件后,在一个焦距 f 处测得光束直径 $d\sigma_f$ 即可求得远场发散角

$$\theta_0 = \frac{d\sigma_f}{f}$$

非圆对称的光束,发散角应用 θ_{σ_x} 或 θ_{σ_y} 表示。

3.1.3 光束传播因子 k 和衍射极限倍因子 M^2 的确定:

M_2 和 k 可分别独立进行。只要知道腰宽 $d\sigma_{0x}, d\sigma_{0y}$ 或光腰直径 $d\sigma_0$ 以及相应的光束发散角 $\theta_{\sigma_x}, \theta_{\sigma_y}$ 或 θ_0 即可。

3.2 对测量装置的要求

测量设备要便于测量激光束整个横截面上的功率和能量的分布函数。

3.2.1 调整准备

各光学元件均应同轴,激光束应能完全通过,光路上全部损失应小于总功率(能量)的 1%。

实验的环境应该避免机械震动、噪声、热辐射、杂散光对流等各种因素的影响。室内应恒温,还应选用低噪声放大器,确保总的测量误差小于 10%。

被测光束的光路上不含有水蒸汽等气体,以免吸收引起热畸变。

3.2.2 探测系统

对功率(能量)密度分布函数的测量要求用高空间分辨率和高信号噪声比的功率表(或能量表)。对最小可探测的空间分辨率,应至少抽样考核两次,除 IEC1040 所规定的发射探测系统诸条款应满足外,这里再提醒几点:探测系统输入的线性、均匀性以及波长的一致性。若有问题应通过电子设备予以校正;探查接收器的损伤阈值,被测的激光束注意勿超过;在对分布函数进行扫描测试过程中应注意激光器在空间和时间上的稳定性;对测量脉冲激光器的分布时,还应说明触发的延迟时间,因为脉冲期间光束参数可能是变化的。

3.2.3 光束的形状、光学元件和光学衰减器

若光束截面大于探测器的情况下,必须使用合适的光学系统使激光束的横截面区域成像到探测器表面,当然该光学元件不应影响功率(能量)分布的相对变化,另外,成像后的大小变化也应考虑。

常常因为激光束功率(能量)过大而需在探测器前放置衰减器,以保证探测器工作在线性范围。衰减器引入的偏振对任何波长应与角度无关,引入的非线性与不均匀性应最小而且还应修正。

3.2.4 聚焦系统

在发散角测量中,需要引入聚焦系统,除上述有关要求外,还应考虑到:

聚焦系统应无畸变,这意味着它所带来的对测量的影响应小于总误差的 20%;对所研究波长的焦距长度和其主平面的位置应准确在焦距长度 1% 以内。当使用光圈时,总的损失能量小于总功率(能量)的 1%。

4 测量与各参数的确定

4.1 束宽与光束直径的测量

测量开始前,预热一小时或按激光器制造厂提出的规定预热足够时间,并注意所规定的工作条件。

束宽和光束直径的测量最终归结为对功率或能量的分布函数测量。测量时对每一个位置 Z ,都要重复测量五次,然后由上述第一题目给出的一阶矩,二阶矩公式求出束宽 $d\sigma_x, d\sigma_y$ 和光束直径 $d\sigma_0$ 。

如果 $d\sigma_x/d\sigma_y$ 小于 1.15,光束认为是圆对称,否则应求方位角 φ 。计算步骤是先算出二阶矩 σ_x^2 和 σ_y^2 及混合矩 σ_{xy}^2

$$\varphi = \arctan \frac{[(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2]^{1/2} - (\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}{2\sigma_{xy}^2}$$

$$d_{xx}(Z) = 4\sigma_x(Z) = 2\sqrt{2}[(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) + ((\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2)^{1/2}]^{1/2}$$

$$d_{yy}(Z) = 4\sigma_y(Z) = 2\sqrt{2}[(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) + ((\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2)^{1/2}]^{1/2}$$

4.2 发散角测量

光路上放置聚焦元件,调整光轴与激光束的轴重合。将探测器的测量平面放置在聚焦元件后主平面一个焦距长的位置(注意:该位置通常与聚焦元件后的腰位置不一致)。如上述第一条

正

所述,在该位置处测量束宽 $d\sigma_{fx'}$, $d\sigma_{fy'}$ 或光束直径 $d\sigma_f$, 至少测量五次。

由下式计算远场发散角

$$\theta_{ax} = \frac{d\sigma_{fx'}}{f} \quad \theta_{ay} = \frac{d\sigma_{fy'}}{f}$$

或

$$\theta_\sigma = \frac{d\sigma_f}{f}$$

式中 f 为聚焦元件的焦距。

对发散角的测量,要计算平均值和标准偏差。

4.3 腰斑位置的测量

如果光腰的直接测量是可行的,那么要测光腰位置和标准偏差,就应沿传播轴 Z 测量不同的束宽,用双曲线进行拟合来确定。为此,至少测十次,必须有至少五次处于光束瑞利长度之内。沿传播轴测量直径作双曲拟合的公式如下:

$$d_z^2 = A + BZ + CZ^2$$

$$d_{zx}^2 = A_x + B_x Z + C_x Z^2$$

$$d_{zy}^2 = A_y + B_y Z + C_y Z^2$$

双曲线的系数 $A, A_x, A_y, B, B_x, B_y, C, C_x, C_y$ 用适当的数或用数理统计的知识求出后,束腰的宽度或直径及位置的值用下式确定:

$$Z_0 = \frac{-B}{2C} \quad Z_{0x} = \frac{-B_x}{2C_x} \quad Z_{0y} = \frac{-B_y}{2C_y}$$

$$d_{00} = \sqrt{A - \frac{B^2}{4C}} \quad d_{00x} = \sqrt{A_x - \frac{B_x^2}{4C_x}}$$

$$d_{00y} = \sqrt{A_y - \frac{B_y^2}{4C_y}}$$

束腰位置的直接测量常常是不可能的,这时,不得不用人为模拟的腰斑。只要在光束传播方向上放置无象差聚焦元件就可以实现。如图所示。

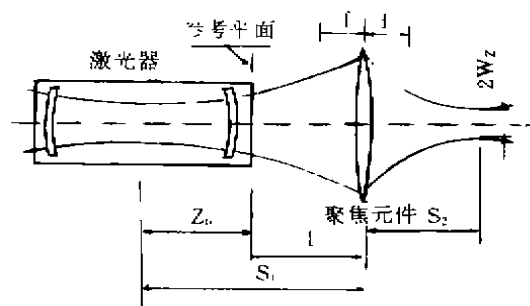


图1 腰斑位置的确定

先确定某处为参考平面,聚焦元件到参考平面的距离 l 以及模拟腰斑到聚焦元件主平面的距离 S_2, S_{2x}, S_{2y} 都应确定。模拟腰斑的束宽 W_2 , 或 W_{2x} 和 W_{2y} 也应被确定。这些可由下式算出:

$$Z_0 = l - S_1, Z_{0x} = l - S_{1x}, Z_{0y} = l - S_{1y}$$

式中符号如图所示。这里 S_1, S_{1x}, S_{1y} 用下式确定。

$$S_1 = \frac{fS_2(S_2 - f) + fZ_{R2}^2}{S_2^2 - 2fS_2 + f^2 + Z_{R2}^2}$$

$$S_{1x} = \frac{fS_{2x}(S_{2x} - f) + fZ_{Rx2}^2}{S_{2x}^2 - 2fS_{2x} + f^2 + Z_{Rx2}^2}$$

$$S_{1y} = \frac{fS_{2y}(S_{2y} - f) + fZ_{Ry}^2}{S_{2y}^2 - 2fS_{2y} + f^2 + fZ_{Ry}^2}$$

f 为透镜焦距, Z_R 为瑞利长度。

模拟腰斑的瑞利长度可由双曲拟合的公式定出。

束腰和宽度可由下列诸式求出, 注意这里使用了关系式 $d_{e2} = d_{e1} V$, V 是放大率, 则

$$d_{e1} = \frac{d_{e2}}{V}, d_{e1x} = \frac{d_{e2x}}{V_x}, d_{e1y} = \frac{d_{e2y}}{V_y}$$

如果 S_1, S_{1x}, S_{1y} 等于 f (透镜焦距), 那么:

$$V = \frac{Z_{R2}}{f}, V_x = \frac{Z_{Rx2}}{f}, V_y = \frac{Z_{Ry2}}{f}$$

另一方面,

$$V = \left[\frac{f^2 + [f^4 - 4Z_{R2}^2(S_{1x} - f)^2]^{1/2}}{2(S_{1x} - f)^2} \right]^{1/2}$$

$$V_x = \left[\frac{f^2 + [f^4 - 4Z_{Rx2}^2(S_{1x} - f)^2]^{1/2}}{2(S_{1x} - f)^2} \right]^{1/2}$$

$$V_y = \left[\frac{f^2 + [f^4 - 4Z_{Ry2}^2(S_{1y} - f)^2]^{1/2}}{2(S_{1y} - f)^2} \right]^{1/2}$$

4.4 确定光束传播因子 k 和衍射极限倍因子 M^2

根据上述, 当确定了束腰和传播轴上相应 Z 处的束宽后, 就可求出发散角, 也可用无象差的聚焦元件设计一模拟束腰并可测出发散角, 于是就有:

$$K_x = \frac{1}{M_x^2} = \frac{4\lambda}{\pi} \frac{1}{d_{e0x}\theta_{ex}}$$

$$K_y = \frac{1}{M_y^2} = \frac{4\lambda}{\pi} \frac{1}{d_{e0y}\theta_{ey}}$$

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{4\lambda}{\pi} \frac{1}{d_{e0}\theta_e}$$

在测量束腰和发散角时, 应算出标准误差, 再进一步求出光束传播因子或衍射极限倍因子的标准误差。

5 结束语

由于激光科学技术发展以及应用的推广, 光束质量评价是非常引人注目的。近年来, 国际标准化组织公布的多次文件, 足以说明它的重要性。无疑乘积 $nd_{e0}\theta_e$ 有着广泛而深刻的物理意义, 因而 M^2 因子或 k 因子就有丰富的内涵, 然而在对于两个因子名称的几经变迁^{[1][2]}, 就说明科学界对激光束某些物理概念的特别重视。但是更为重要的是这个乘积所涉及的光束空间相干性的实质无论如何不应忽视^[5]。此外, 二阶矩计算束宽的数学处理, 对单个低阶横模的处理也不尽合理, 因为光束分布已不连续。另外对“超高斯光束”(Super-Gaussian beam) M^2 也不适用^[6], 正如引言中所说, 该文件也有一定的使用限制。但就现阶段来说, 目前的处理方法和有关规定, 仍是比较好的, 在使用中也方便可行。

(下转 69 页)

与另一束平行(或准平行)参考光 R_2 干涉记录浮雕全息图。如图 6 所示。

用本技术所拍摄的全息图,在某一角度观察到的彩色象,与原稿相比,再现象清晰、明亮,三原色象对位良好,各部分颜色色相基本正确。原稿和全息图再现象的照片对比如彩图。

参考文献

- [1] P. Hariharan. Color Holography, Progress in Optics xx. North - Holl and Publishing Company. Amsterdam. New York. Oxford. 1983, 265
- [2] 于美文. 光学信息及信息处理, 国防工业出版社, 1984 年, 162
- [3] Kazuhiko Ohnuma. Color rainbow hologram and color reproduction. Appl. Opt. 1988, 27, No. 18 (Sep.), 3859
- [4] M. T. Gale, K Knop. Color - encoded focused image holograms. Appl. Opt, 1978, 15(9), 2189
- [5] 蔡雪强等. 真彩色模压全息图. 应用光学, 1992 年, 12, 167
- [6] 胡成发等. 印刷色彩与色度学, 印刷工业出版社, 1993 年
- [7] 于美文等. 光学全息及信息处理, 国防工业出版社, 1984 年, 73

作者简介:邓玲,女 1957 年生。讲师。1994 年毕业于重庆大学光学仪器专业。现从事医用物理学研究。

~~~~~

(上接 58 页)

### 参考文献

- [1] ISO/TC 172/SC9/WG1 N14, 1991-02-19
- [2] ISO/TC 172/SC9/WG1 N30, 1991-02-20
- [3] ISO/TC 172/SC9/WG1 N56, 1993-11-26
- [4] A. E. Siegman. 激光集锦, 王世孝译, 1992, 2(3):36, 1992, 2(4):34
- [5] 陆治国等. 表达光束质量的参数. 《量子电子学》, 1993, 10(4):382
- [6] 杨成龙. 光束质量测量的最小束斑法. 《激光技术》, 1993, 17(5):306
- [7] 曾秉斌等. 激光光束质量因子  $M^2$  的物理概念与测试方法. 《应用激光》, 1994, 14(3):104
- [8] A. Parent et al. Optical and Quantum Electronics, 24, 1071(1992)