

高斯正支共焦非稳腔光束质量测量结果与分析*

钟正根¹, 范嗣强², 戴特力¹

(1. 重庆师范大学 物理学与信息技术学院, 重庆 400047 2. 重庆光学机械研究所, 重庆 400039)

摘要 利用美国 Spiricon 公司生产的 M^2 -200 Beam Propagation Analyzer(M^2 仪)测量了氙灯泵浦 Nd:YAG 的正支高斯非稳腔脉冲激光器的腔长变化对输出光束质量的影响。简要叙述了 M^2 仪的使用方法和测量过程,介绍了几种评价光束质量的物理量。通过观测和分析,正支高斯非稳腔腔长的变化会影响输出光束的质量。实验中发现,当腔长为 78 cm 时光束质量最佳,此结果与理论值 78.6cm 很相近。误差主要来自两个方面:一是谐振腔内等效透镜主面位置测量不准确;二是腔内含有晶体棒时,腔长计算不精确。离焦比较大时光束质量明显变差, M^2 和发散角都很大;与腔镜的失谐灵敏度相比,高斯共焦非稳腔对腔长的失谐灵敏度小,失谐容忍度大。通过测量结果的对比得出,用 M^2 因子评价光束质量是一个较好的选择。

关键词 正支高斯非稳腔;腔长;光束质量;发散角; M^2 因子

中图分类号 TN86

文献标识码 A

文章编号 1672-6693(2007)04-0062-05

近年来,全固态激光技术的出现和发展使激光产业日益扩大^[1]。激光的各种应用对激光光束质量要求越来越高,细致研究谐振腔结构对光束质量的影响就显得尤为重要。本文对氙灯泵浦 Nd:YAG 高斯型非稳腔脉冲激光器的输出光束质量随腔长的变化进行了实验测试和数据分析。

非稳腔具有下述特点^[2-3]:基模或低阶模的模体积分大,近衍射耦合输出功率大,横模容易鉴别和控制,易于得到单端准直的近平行光束等。研究非稳腔的文章大都是讨论腔镜准直调节失谐对光束质量的影响^[4-14]。实际上,要得到好的光束质量,除了对腔镜调直外,还要对谐振腔长度进行调整。含有激光棒的谐振腔的腔长并不是它的几何长度,而是光学系统的有效光学长度。如果不考虑热透镜效应,激光穿过 L 长 YAG 棒的有效光学长度是 L/n ;如果有热透镜效应,就要把激光棒当作一个厚透镜,先确定其一对主面位置。有效光学长度不包含两主面间的几何距离。在实验中热透镜的焦距随激光输出的脉冲能量和重复频率而变化,因而把晶体棒当作热透镜来确定其焦距和主面的位置是有一定误差的,所以,实验装置要在设计计算的指导下对腔实施准直调整和长度调整。本文探讨氙灯泵浦 Nd:YAG 脉冲激光器的正支高斯共焦非稳腔腔长变化对输出

光束质量的影响。

1 M^2 测试仪的测量原理

图 1 为高斯共焦非稳腔结构示意图。从理论上讲,高斯共焦非稳腔输出的光为近平行光且光强分布均匀,但实验中实现这种输出需要对腔长作精细的调整。

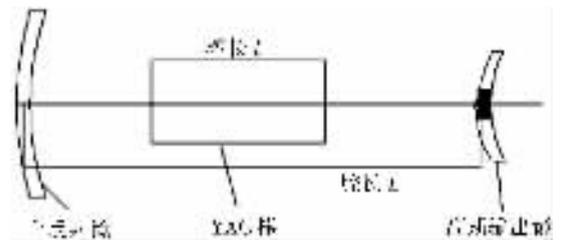


图 1 高斯共焦非稳腔结构示意图

在激光的发展过程中,曾用多种参数评价激光光束质量,包括聚焦光斑尺寸、远场发散角、 β 值、斯特列尔比、光束参数乘积和 M^2 因子等^[3],本文主要介绍远场发散角和 M^2 因子的测量原理。

激光远场发散角 θ 是描述激光束传输一定距离后发散程度的物理量,它与可聚焦能量(功率)有关。许多实际应用场合,激光远场发散角 θ 常作为判断光束质量的参数之一。在不同参考书中对发散角和光束宽度的取值有所不同,文献[2]中远场发

* 收稿日期 2007-05-08 修回日期 2007-06-27

资助项目:重庆市科委攻关项目(No. 0750)

作者简介:钟正根(1981-)男,江西分宜人,硕士研究生,研究方向为激光器件及应用。

散角是全发散角,光束宽度为光束直径;文献[3]中远场发散角是半发散角,光束宽度为光束半径;在本文中远场发散角是全发散角,光束宽度是光束的直径。设激光束沿 z 轴传输,光束宽度为 $\omega(z)$,定义远场发散角为^[2] $\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\omega(z)}{z} = \frac{4\lambda}{\pi\omega_0} = 1.27 \frac{\lambda}{\omega_0}$ 。其中 z 为光波传播方向, λ 为激光波长, ω_0 为腔内高斯光束的束腰直径。本实验中采用的是 20 世纪 90 年代初, Siegman 提出的用 M^2 来描述光束质量。 M^2 因子定义为

$$M^2 = \frac{\text{实际光束的束腰宽度和远场发散角的乘积}}{\text{理想光束的束腰宽度和远场发散角的乘积}}$$

其中,理想光束的束腰宽度和远场发散角的乘积是 $4\lambda/\pi$ 。该定义式中同时考虑了束宽和远场发散角对激光光束质量的影响。一般情况下,激光束在通过无衍射、无像差理想光学系统时光束参数乘积是一个不变量,称为 Lagrange 不变量。相对而言, M^2 因子是一个判断光束质量较好的参数。测量 M^2 因子的方法很多,针对不同的实验条件和测量精度,大多可采用以下 3 种方法^[3]。

1) 3 点法。设光束沿 z 方向传播,在它的路径上,测量 3 个位置的束宽,光束传输方程式为 $\omega^2(z_i) = \omega_0^2 + \theta_0^2(z_i - L_0)^2$ 。其中,下标 $i=1, 2, 3$, 代表 3 个测量位置, L_0 为束腰位置。代入测量值 $\omega(z_i)$, 解方程组,就可确定 θ_0 、束腰宽度 ω_0 和束腰位置 L_0 , 再由 M^2 的定义可计算出 M^2 值。这种方法的困难是不容易实现光束宽度的精确测量,因为激光光斑边界,即极大值的 $1/e^2$ 不易判断。

2) 两点法。当束腰所在位置 L_0 已知时,测量次数就可减少到两次。

3) 双曲线拟合法。沿传输轴测量束宽 $\omega(z)$ 的双曲线拟合公式为

$$\omega^2(z) = Az^2 + Bz + C \quad (1)$$

式中 A, B, C 为拟合系数,与 M^2 的关系为

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \sqrt{AC - \frac{B^2}{4}} \quad (2)$$

本实验利用美国 Spiricon 公司生产的 M^2 仪来测量激光光束质量,该仪器的测量原理就是双曲线拟合法。图 2 是 M^2 仪测试光路的结构示意图,图 3 为光参数测量原理图。

启动测量后,仪器按程序设置运行,自动完成测量过程。计算机控制步进电机带动图 2 中的平面镜,实现数码相机与光源之间的距离变化,CCD 实时测量出光斑的强度分布,并计算出光斑在不同位置处

的束宽 ω 和相对于透镜的距离 Z (图 3),再由 (1) 式求出双曲线拟合系数 A, B, C 。根据 (1) 式可画出光束经透镜后的双曲线,如图 4 所示。由 (2) 式可计算出光斑的 M^2 因子,由于 M^2 因子经过透镜变换后是个不变量,因此透镜前后的 M^2 值相同。根据高斯光束经透镜变换的 ABCD 定律可计算出腔内光束的束腰宽度 ω_0 ,束腰位置 L_0 及远场发散角 θ_0 。图 4 的曲线也是由计算机自动完成并显示的。

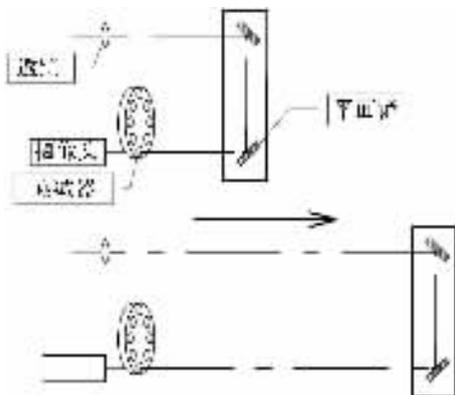


图 2 M^2 仪的结构原理图

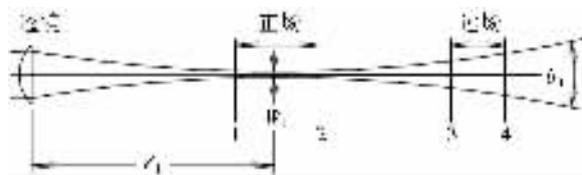


图 3 光参数测量原理图

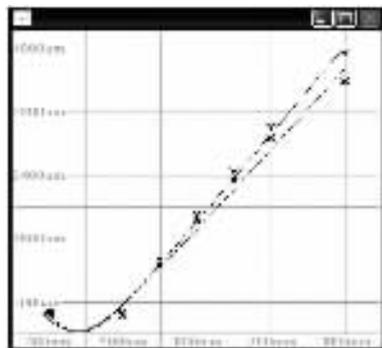


图 4 双曲线拟合图

调整腔长的实验中,调节范围小,以保持输出光束为基横模或 TEM_{11} 模。本实验所利用的 M^2 仪数据分析程序中,未考虑输出光的能量损失。

2 实验结果及分析

实验光路如图 5。在图 5 中,光学劈尖玻璃片与入射光成 45° ,让一小部分光经过衰减盒后再进入 M^2 仪。为了避免 CCD 饱和,根据入射光的强弱可更换衰减盒中不同透过率的衰减片。即使如此,

的好坏,主要是依据 M^2 值。从 M^2 因子的定义式可以看出, M^2 值越小,说明光束越接近理想光束,光束质量就越好。从表中可比较出,光束 M^2 因子的值比较大且对腔长的变化很灵敏。 X 方向 M^2 值最小为 10.05,最大为 44.21,二者相差 34.16; Y 方向 M^2 值最小为 13.89,最大为 76.38,二者相差 62.49; Y 方向的差值接近 X 方向的 2 倍。这个差别主要是由于输出的激光本身不是圆对称的,而是像散光束。图 6 是腔长与发散角和 M^2 之间的关系图,从图中也可以比较得出 X 和 Y 方向 M^2 最小值位置不相同,且当腔长与理论值偏离比较大时, M^2 值很大,光束质量不好,而在理论值附近变化较小。因此,要得到好的光束质量必须要精细调整腔长。

2)判断输出光束形状的因子。判断输出光束形状的因子有很多,有对称性、瑞利长度及像散,它们之间有着必然的联系。表 2 中对称性的值是 Y 方向与 X 方向的束腰宽度之比,如果比值等于 1,说明 X 和 Y 方向对称,比值大于 1,说明 Y 为长轴, X 为短轴,比值小于 1 则 X 为长轴, Y 为短轴。表中的比值都大于 1,说明输出光束是 Y 为长轴, X 为短轴的像散光束。瑞利长度是指沿光轴传播方向光束从束腰位置到光束腰斑直径的 $\sqrt{2}$ 倍处的轴向长度。表中的数据说明,腔长离共焦越大,瑞利长度越小,这也说明当束腰宽度相差不大的情况下,瑞利长度越小,发散角越大。像散根据 $Ast = \frac{2 \times |Z_{OX} - Z_{OY}|}{Z_{ROX} + Z_{ROY}}$ 计算,式中 Z_{OX} 和 Z_{OY} 分别为 X 和 Y 方向的束腰位置, Z_{ROX} 和 Z_{ROY} 分别为 X 和 Y 方向的瑞利长度。如果像散等于 0,说明光束是圆对称的,而文章得到的像散值都不为 0,说明光束是像散的。主要是由于泵浦光本身就不是对称的,采用的是氙灯侧向泵浦 Nd:YAG 棒,因此输出的光自然是像散光。

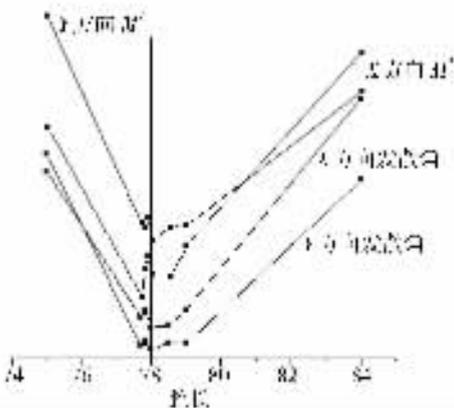


图 6 腔长与发散角和 M^2 的关系曲线

3 总结

从上面讨论得出,当腔长为 78 cm 时,光束的发散角和 M^2 最小,此时光束质量最好,与理论上 78.6 cm 偏差 -0.6 cm。这个偏差主要是由等效透镜主面位置确定不准、激光经过激光棒时有效光程长度计算不精确和在测量长度时读数不准确引起的。当离焦比较大时光束质量明显变差, M^2 达到几十,发散角也很大。与腔镜的失谐灵敏度相比,高斯共焦非稳腔对腔长的失谐灵敏度小,失谐容忍度大,这个结果对以后进行腔体调整时具有很好的指导意义。从上面的实验数据可以得出,高斯共焦非稳腔输出的光为近平行光,发散角为 mrad 数量级,如果要得到更小一个数量级的发散角,就要选用硬边输出镜非稳腔。当然高斯共焦非稳腔的优点主要在于有一个光强均匀分布的输出光斑,而硬边输出镜非稳腔的输出光斑中心有一个空洞,即光强分布极不均匀。

参考文献:

- [1] 吕百达,季小玲. 固体激光技术发展前景展望[J]. 重庆师范学院学报, 1999, 16(4): 10-12.
- [2] WALTER K. Solid-State Laser Engineering[M]. Berlin: Springer Press, 1999.
- [3] 吕百达. 激光光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [4] 罗时荣,吕百达,黄鹭. 非稳腔的远场光强分布和光束质量[J]. 激光技术, 1999, 23(5): 281-283.
- [5] 傅雷,史红民,张香玲,等. 非稳腔准直和失调影响的计算机仿真[J]. 中国激光, 2001, 28(8): 709-713.
- [6] 张翔,许冰,杨伟. 腔镜倾斜扰动对正支共焦腔输出光束模式的影响[J]. 中国激光, 2006, 33(33): 303-310.
- [7] 田来科,姚金宝,杨志勇,等. 热畸变对正分支非稳腔的影响及补偿[J]. 光子学报, 2002, 31(6): 754-757.
- [8] 范嗣强,戴特力. 望远镜非稳腔光束发散角的测量与结果分析[J]. 激光杂志, 2006, 27(1): 12-13.
- [9] PAVEL N, DASCALU N, LUPEI V. Positive-branch Unstable Resonators with Thermal Lens Compensation[J]. Optics & Laser Technology, 1996, 28(6): 451-455.
- [10] 彭玉峰,吕珍龙,张虎. 虚共焦非稳腔腔镜倾斜对光束影响的三维重构[J]. 激光技术, 2005, 29(3): 308-310.
- [11] 付汉清,王泰春. 虚共焦非稳腔腔镜倾斜对激光传输的影响[J]. 计算物理, 2000, 17(3): 286-292.
- [12] 张翔,杨伟,许冰,等. 正支共焦非稳腔的失调特性实验分析[J]. 光电工程, 2006, 33(5): 48-52.
- [13] 赵丽华. 相位型高斯变反射率镜非稳腔的模式[J]. 绍兴文理学院学报, 2002, 22(4): 16-18.
- [14] 李宾中,曾林泽,薛晋慧,等. 激光二极管光束特性的

The Measurement and Data Analysis of Beam Quality of the Gaussian Positive-branch Confocal Unstable Resonators

ZHONG Zheng-gen¹ , FAN Si-qiang² , DAI Te-li¹

(1. College of Physics and Information , Chongqing Normal University , Chongqing 400047 ;

2. Optics Machine Institute of Chongqing , Chongqing 400039 , China)

Abstract In these years , the solid state lasers have been developing very fast. The application of the solid state lasers requests the laser beam quality more and more better. So investigation of the effect on the output laser beam quality of the resonance cavity length changing is especially important. This paper investigates the effect on the output laser beam quality of the resonance cavity length changing of the Gaussian positive-branch confocal unstable resonators. The laser rod is Nd:YAG rod and pumped by Xenon lamp. The effect on the output laser beam quality of the resonance cavity length changing of the Gaussian positive-branch confocal unstable resonators has been observed. We have observed the effect by using of a M^2 -200 Beam Propagation Analyzer. The M^2 -200 Beam Propagation Analyzer is made by Spiricon company of USA . It can automatically measure the full angle divergences and M^2 values and waist width and waist location and Rayleigh length in both the X and Y axes and X vs. Y astigmatism and X vs. Y asymmetry of the laser beam and display those parameters. The M^2 -200 Beam Propagation Analyzer is easy to use. But adjusting the optical train is very difficult before using it. The survey data is collected after our working some days. The survey data have shown that the changing of the resonance cavity length of the Gaussian confocal unstable resonator could affect the beam quality of laser output. When the resonance cavity length is 78cm , the full angle divergences and M^2 values of the laser beam are the minimum in our experiments , the X vs. Y astigmatism value is 0.15 , the X vs. Y asymmetry value is 1.01 , that is to say , the laser beam quality is the best. The measurement result consists with calculating value , 78.6cm. The error is due to two factors , one of which is that the position of the cardinal plane of equivalence lens is not exact and another is that the account of effective optical path is not precise when the laser passes through laser rod. Deviated the resonance cavity length from the one of confocal cavity in larger the laser beam quality would obviously be worse , that is , the full angle divergences and M^2 values of the laser beam are larger. Compare with the misalignment sensitivity of resonance cavity mirrors , the Gaussian positive-branch confocal unstable resonators have the less adjust sensitivity for the resonance cavity length and there is larger tolerance for the resonance cavity length adjustment. In this report , the using means and the manipulative process of the M^2 equipment are briefly described. A few of parameters to evaluate the laser beam quality are introduced. By contrast , the M^2 factor is a better one than other factors for evaluating the laser beam quality.

Key words Gaussian positive-branch confocal unstable resonators ; resonator length ; beam quality ; divergence angle ; M^2 factor

(责任编辑 欧红叶)