

高功率激光的光学特性测试

梁向春 蒋玉柱 施阿英

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

由于激光核聚变研究工作的需要,促进了高功率钕玻璃激光器系统的发展^[1,2]。为了评价高功率钕玻璃激光器系统的光束质量,我们对某些激光的光学特性进行了测试,其中包括激光束近场的能量空间分布,激光束远场的特性和发散角,激光束波前的畸变和相干性,激光光谱等。文中的测试结果是在激光器输出单脉冲功率水平为 10^{10} W 和 10^{11} W 的情况下进行的。

一、概 述

高功率钕玻璃激光器系统的结构如图1所示^[2],其中包括振荡器、前置放大器、电光开关、空间滤波器、隔离器和多级钕玻璃棒状放大器。器件终端钕玻璃棒直径为7cm,器件输出激光波长为 1.06μ ,单脉冲宽度为0.1ns,改变振荡器调Q方式时,脉宽也可为1ns。

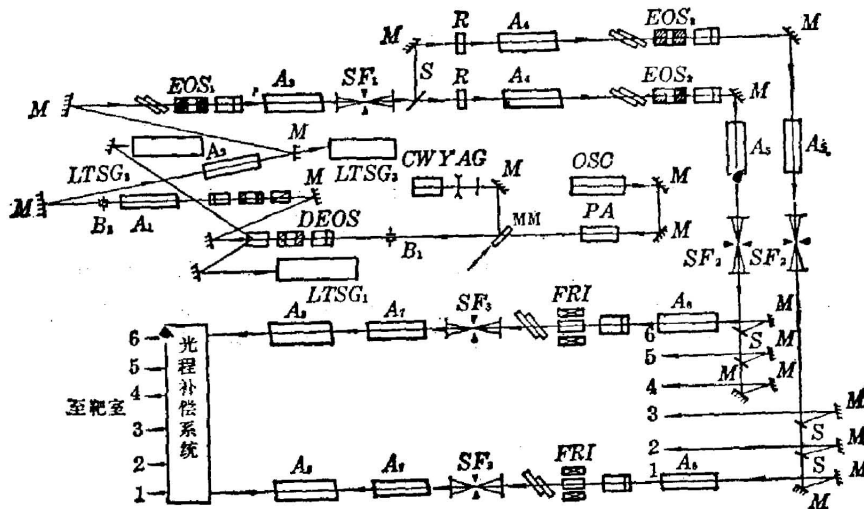


图1 六束高功率钕玻璃激光器系统光路图

OSC—振荡器; M—全反射镜; PA—前置放大器; B—光阑; DEOS—双泡克耳斯盒电光开关; A_{1-8} —放大器; LTSG—激光触发火花隙; EOS— $\phi 50$ 毫米泡克耳斯盒电光开关; SF—空间滤波器; S—分束器; R— 90° 旋光片; FRI—法拉弟旋转器

Fig. 1 Optical schematic of the six-beam high power Nd:glass Laser system

OSC—Oscillator; M—Total reflection mirror; PA—Preamplifier; B—Stops; DEOS—Electro-optical switch with two Pockels cells; A_{1-8} —Amplifiers; LTSG—Laser trigger spark gap; EOS—Electro-optical switch with $\phi 50$ mm Pockels cell; SF—Spatial filter; S—beam splitter; R— 90° rotation plate; FRI—Fataday rotator

在进行激光与等离子体相互作用的实验中,为了监测激光器系统每次发射光束的质量,在靶室附近放置了激光光束诊断装置,如图2所示。大口径照相暗盒用于拍摄激光束的近场图,激光束多次成像列阵相机用于拍摄激光束的远场图,双平板剪切激光干涉仪^[3]可对激光束的波面和相干性进行测试。为了尽量减少主光束能量的损耗,提供测试装置的光束是利用靶室附近反射镜的漏光部分进行取样测量。以下各节将详述测试方法和测试结果分析。

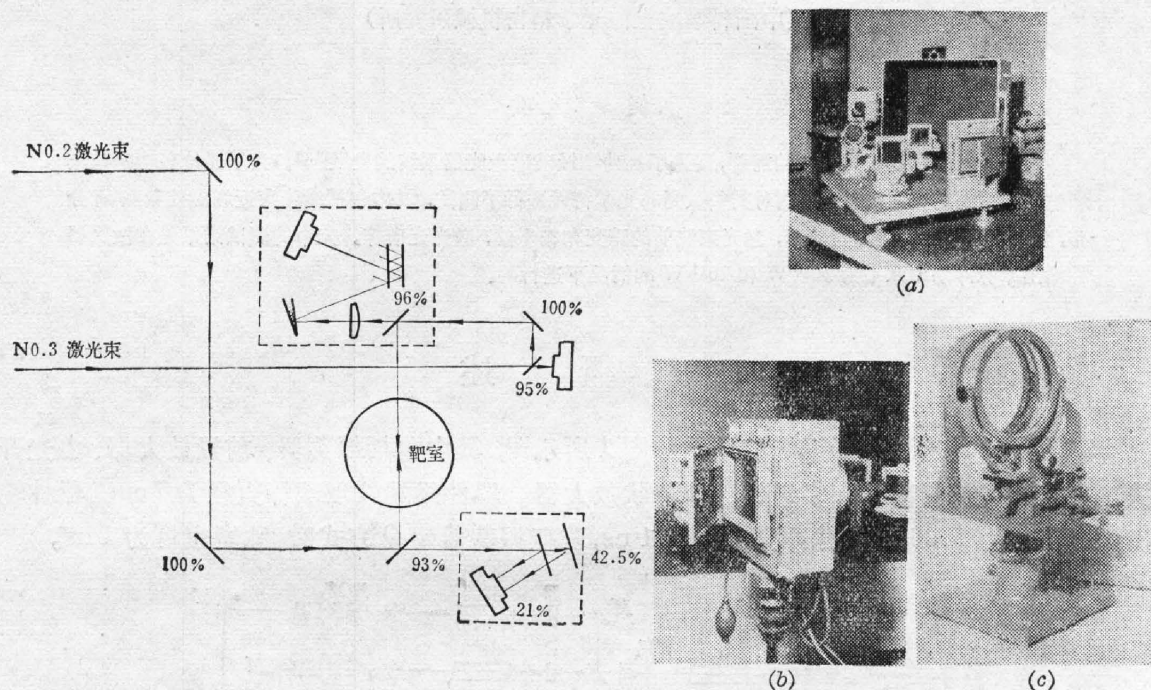


图2 激光光束诊断仪器排布图

(a) 激光束多次成像列阵相机; (b) 大口径照相暗盒;
(c) 双平板剪切激光干涉仪

Fig. 2 Arrangement of diagnostic instruments of laser beam

(a) Multi-images array camera of laser beam; (b) Large aperture photographic box; (c) Laser shearing interferometer with two plates

二、激光束近场的能量空间分布

对激光器输出光束截面上的光斑直接照相,称为激光束的近场图,它是判断激光束的模式结构,光斑均匀性和观察高功率激光束在介质传输过程中,光强的高频空间起伏引起光束自聚焦,致使光斑分裂的最直观的方法。测量时可采用照相暗盒,直接或间接对着激光器的输出光斑拍照,由于激光波长为 1.06μ ,要选用滤去可见光的红外滤光片,封在照相暗盒的入口处,感光胶片要经红外敏化处理后方可使用。图3是一组近场图照片,它显示出高功率激光器系统从振荡器一直到末级放大器输出光斑的近场图。显然可见,光束传输过程中,不同位置的光斑近场能量空间分布是截然不同的。图3(a)为振荡器输出光斑,它是一个完好的单模结构,但在传输过程中,由于逐级放大铍玻璃棒本身都是一个硬边光阑,自然引起

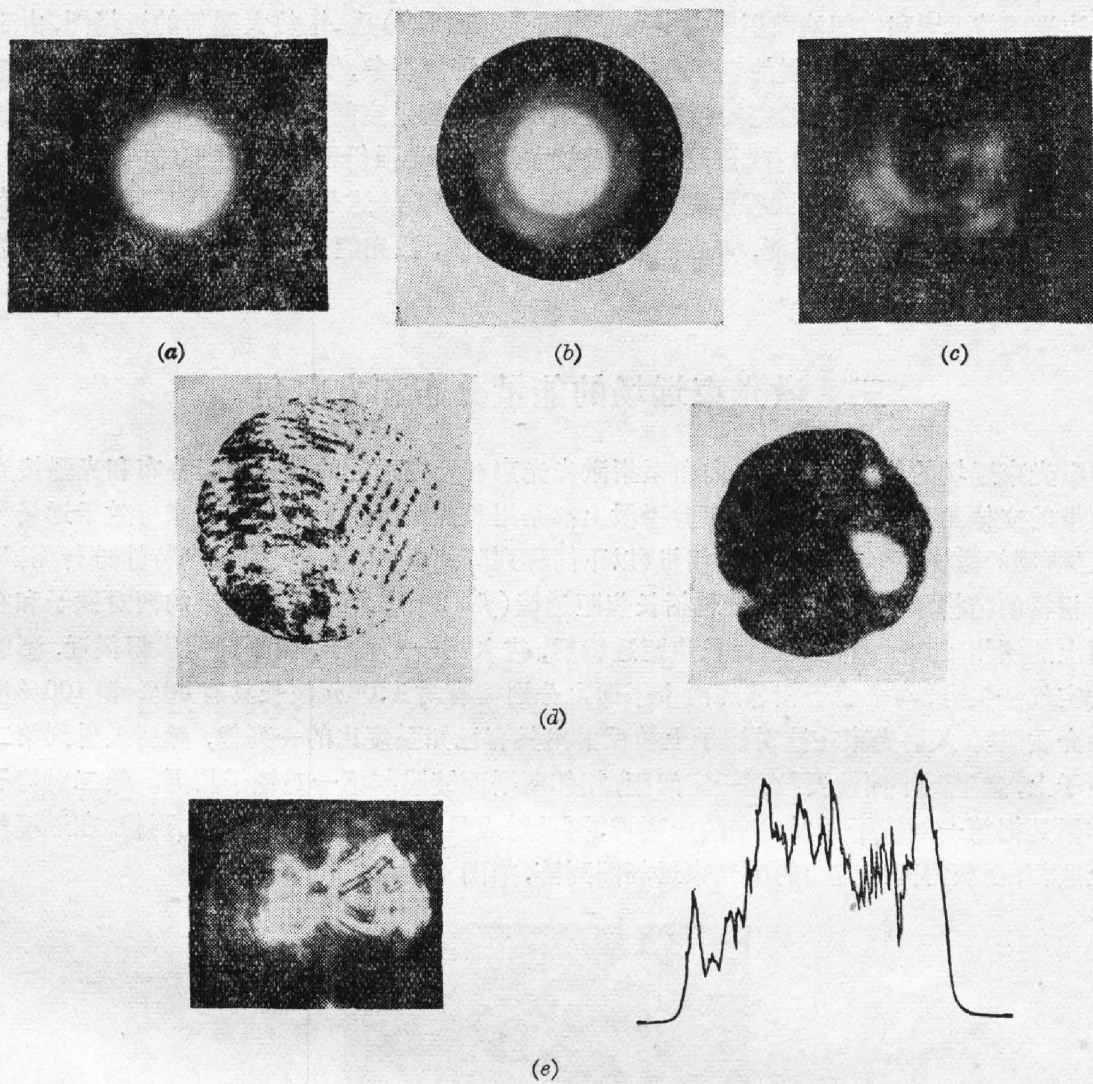


图3 光束的近场剖面照相

- (a) 振荡器输出 TEM_{00} 模(光束直径: 3 mm);
- (b) 经 A_1 放大器后的光束剖面(光束直径: 6 mm);
- (c) 经 A_2 放大器后的光束剖面(光束直径: 15 mm);
- (d) 空间滤波器 SF_2 前(左)后(右)的光束剖面(光束直径: 50 mm);
- (e) 末级输出光束剖面和微密度计扫描轨迹(光束直径: 70 mm, $E=8.4\text{ J}$, $t=100\text{ ps}$)

Fig. 3 Photographs of near-field beam profiles

- (a) Oscillator output TEM_{00} mode (beam diameter: 3 mm);
- (b) Beam profile after A_1 amplifier (beam diameter: 6 mm);
- (c) Beam profile after A_2 amplifier (beam diameter: 15 mm);
- (d) Beam profile before (left) and after (right) spatial filter SF_2 (beam diameter: 50 mm);
- (e) Beam profile of end output and microdensitometer tracing (beam diameter 70 mm, $E=8.4\text{ J}$, $t=100\text{ ps}$)

光衍射效应,加之通道中的灰尘,材料的杂质,气泡等,将不可避免地产生高频空间调制。这种光强的空间起伏容易引起非线性效应,产生光束自聚焦现象,严重时会使光学元件破坏,引起光束质量明显恶化。为了消除和减少这类效应,除精选光学元件和清洁环境外,还要使

用软边光阑技术^[4]和空间滤波器^[5]去提高光束质量。图 3(e)是 A_2 放大器后的近场图,由于玻璃棒的硬边衍射,使得光强的空间分布出现明显的调制现象,发展到图 3(d) 中的左图时,综合前述各种因素,近场图的空间强度分布很不均匀。使用空间滤波器后,光强明显的调制现象已消除,如图 3(d) 中的右图所示。末级放大器输出光强仍不均匀见图 3(e),近场图经微密度计扫描后,光强从峰到谷的调制深度可达 50~60%。这是因为在这组器件上还没有利用空间滤波器传递像的机能,加之随着放大器的增多,激光能量增强时,玻璃介质的折射率非线性效应变得明显所致。

三、激光束远场的能量分布和方向角

激光束远场的能量分布和方向角系指激光光束在无穷远处的光强空间分布和光强按光束发散的立体角分布的情况,在实验手段上都是用长焦距透镜聚焦激光束来等效于远场测量。已研制的激光束多次成像列阵相机(以下简称列阵相机)可对激光束远场特性进行测试,列阵相机的结构如图 2(a) 所示,包括长焦距透镜($f=2m$),相互组合起来的两对镜子和在焦面上的照相暗盒。激光束通过长焦距透镜后,进入第一对镜子,两平面镜靠得很近,形成小的空气隙尖劈,两个镜子相邻的两个平面上分别镀有对 1.06μ 波长具有 50% 和 100% 反射的介质膜。入射光束在这对镜子上被反射出具有已知强度比的一列像,然后入射到第二对镜子上,这里两平面镜要拉开一定间距,相邻两平面镀膜与第一对镜子相同。第二对镜子的作用是把第一对镜子反射出来的一列像,再反射成具有不同聚焦位置的几列像,在透镜焦面上照相,会获得两维方向的激光束远场图列阵,如图 4 所示。

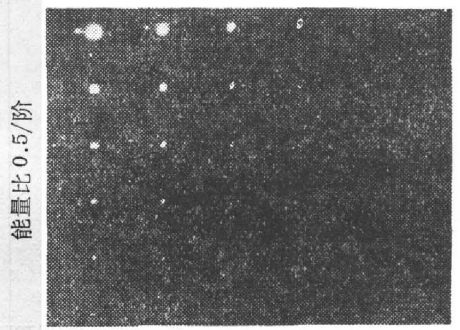


图 4 激光束多次成像列阵图

(光脉冲宽度: 100 ps, 能量: 8.6 J)

Fig. 4 Multiple imaging array patterns of the laser beam

(Light pulse width: 100 ps, Energy: 8.6 J)

通过对列阵图的微密度计扫描分析,可获得激光束在焦面上和离焦平面上的能量分布,观测焦斑结构,画出激光束方向角曲线,分析光束像差等。图 5 所示的一组典型照相是激光器系统输出能量不同时的焦斑形状和微密度计扫描曲线,随着激光能量的增加,焦斑直径变大,焦斑的丝状结构也显著增加,其效果会导致光束方向角变大和在一定方向角内的可聚焦能量变小。图 5 中焦斑的选取是在三张列阵图中以光强定标一致的焦斑来进行比较。图 6 表示不同输出能量下的激光束在焦面上的能量分布曲线,这是在三张列阵图中,分别利用

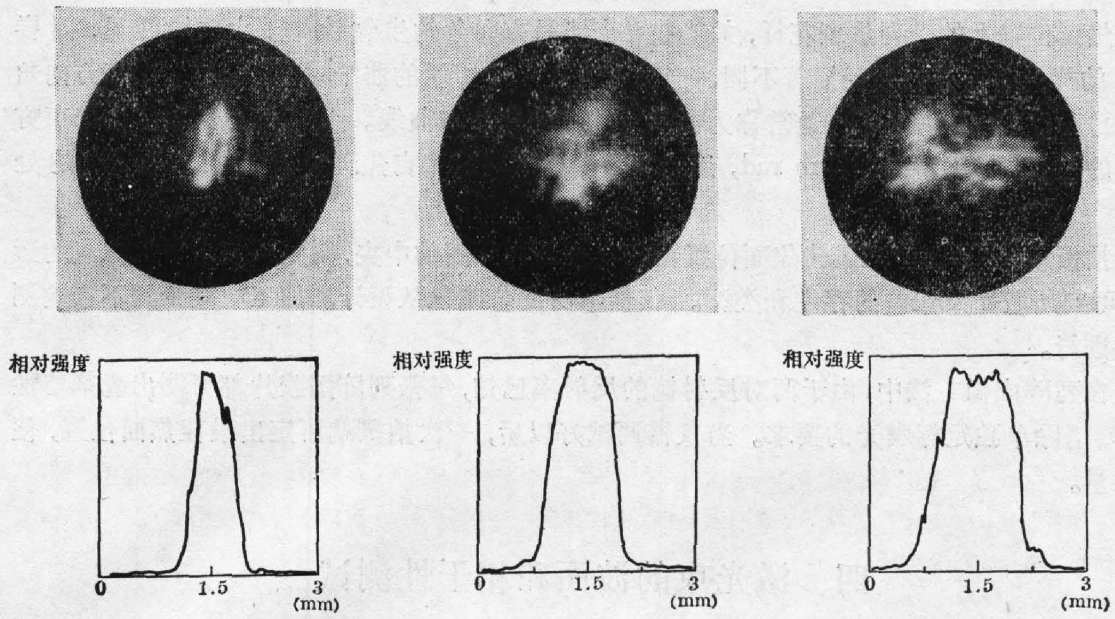


图5 不同输出能量下的焦斑形状和微密度计轨迹
 Fig. 5 Shape of the focal spot and microdensitometer tracing for the various output energies

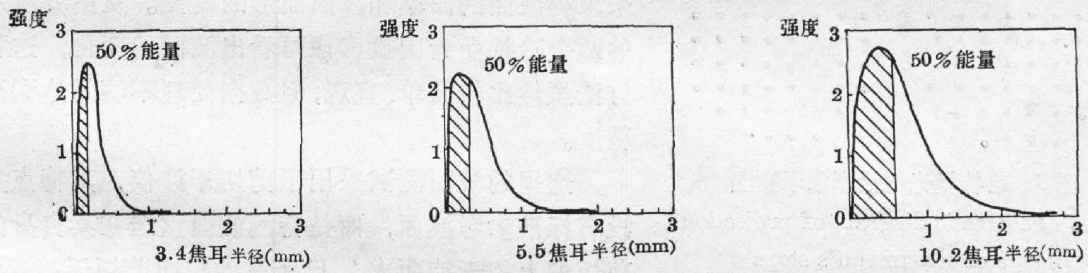


图6 不同输出能量下的激光束在焦面上的能量分布曲线
 Fig. 6 Energy distribution in the focal plane for the various output energies

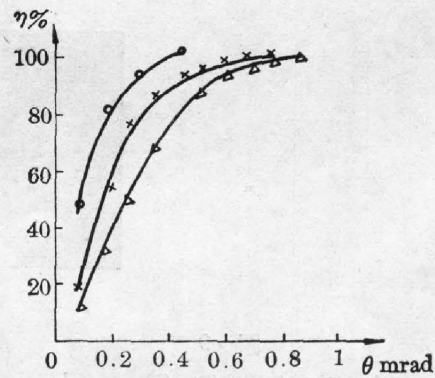


图7 激光束方向角与能量比的关系
 Fig. 7 Energy rate vs divergence angle of beam

最佳焦面位置上的一列焦斑花样,按光楔法^[6]测量方向角的步骤制成。由曲线可见,同样50%的能量所占有的半径显著不同。当转换成如图7所示的曲线时,则表明激光束方向角(全角)所对应的能量比率,通常称为激光束能量的角分布曲线。用这种方法测量激光束方向角的精度可达 $0.05\sim 0.1\text{ m rad}$,影响测量精度的因素来自焦斑半径的测试和胶片的处理。

拍摄列阵图时,若把最佳焦面位置调试在接近列阵图的中央,则从离焦平面上像点的形状,可判断激光束像差的存在和类型。仪器本身的像差已从设计和加工中减少到不影响测量的进行。

在列阵成像方法中,由于两对反射镜的反射率已知,每张列阵图胶片都可测出乳剂特性曲线,消除单独定标曝光的要求。当仪器调试好以后,一次拍摄就可定出最佳焦面位置,便于测量。

四、激光束的波面和相干性测试

一般说来,高功率钕玻璃激光器系统的光束亮度,将受到线性和非线性波面畸变的限制,因此要求对波面进行测试,以便控制畸变。在测试方法中,早期是采用哈特曼光阑法,根据光束通过网孔后,在接收面上投影的间距变化,

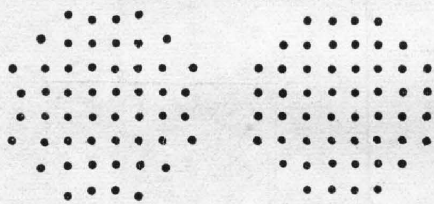
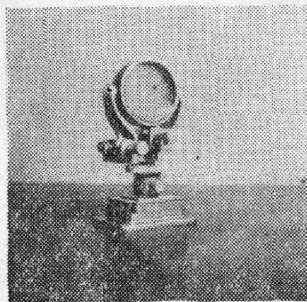


图8 哈特曼光阑投影象示意图

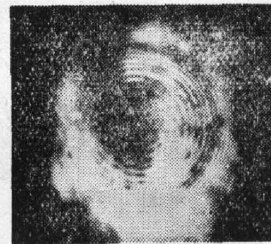
Fig. 8 Schematic diagram of projection image of Hartmann's stops

来求得波面的曲率和波面面形的畸变。从图8所示的两个哈特曼光阑投影象可看出波面的变化,这种方法虽然比较简单、直观,但数据处理不容易达到高精度。

这里的波面测试采用了剪切干涉仪,其特点是没有标准参考波面,而是待测波面重迭在其自身的剪切像上相干涉而成。已研制的径向剪切干涉仪^[7]和双平板剪切激光干涉仪,都可用于对高功率激光束波面的测试。径向剪切干涉仪是由在一块光学玻璃平板的中心区安装一个小口径的负透镜而组成(图9(a))。激光束通过它之后,使得由负透镜发散的光束与透过平板的光束相干,干涉条纹呈一组同心圆环,如图9(b)



(a)



(b)

图 9

(a) 径向剪切干涉仪; (b) 干涉图

Fig. 9

(a) Radial shearing interferometer; (b) Interferogram

所示。从干涉图可分析波面位相均匀性,波面像差,光束空间相干性等。径向剪切两波面的程差可表示为 $y^2/2R_0 - y^2/2R = m\lambda$, 式中 y 为干涉环的半径, R_0 为中心发散光束的曲率, R 为待测光束的曲率, m 为干涉环级数, λ 为光束波长。精确测量干涉环半径并利用程差公式, 可计算出待测波面曲率的径向分布。波面曲率的测量对调整激光束聚焦到靶上是一个关键的数据, 采用干涉法测量精度要比用哈特曼网格法提高一个量级。

六束高功率钕玻璃激光器系统末级输出光束波面的测试, 是采用双平板剪切激光干涉仪进行的。该干涉仪是由两块光学平板组合而成, 利用两板之间相邻两个平面反射光束, 构成横向剪切干涉图形。干涉仪工作参数和数据处理已有报导^[3], 在最简单的一种情况下, 对于无像差的球面波光束, 波面曲率 R 与干涉图中的剪切量 S 和条纹宽度 d 有如下关系式: $R = S \cdot d / \lambda$ 。图 10 是一组不同输出能量时典型的激光束波面的横向剪切干涉图。由干涉图可见, 激光束波面相位均匀性, 是随着功率增加而显著不同, 特别是在高功率激光束传输过程中, 光束的局部自聚焦效应使局部波面破坏了相干性, 干涉条纹消失。当无自聚焦效应影响时, 激光束波面具有对称性球差, 如图 10(a) 所示, 最大球差量为 1 个波长。根据波面干涉图可判断, 该高功率钕玻璃激光器系统以运转在平均功率密度为 2 GW/cm^2 附近时为宜。



图 10 不同功率输出时激光束波面横向剪切干涉图

(光束直径: 60 mm, 脉冲宽度: 100 ps)

(a) 能量: 2.5 J, 平均功率密度: 0.8 GW/cm^2 ; (b) 能量: 5.4 J, 平均功率密度: 1.96 GW/cm^2 ;
(c) 能量: 7.6 J, 平均功率密度: 2.8 GW/cm^2 ; (d) 能量: 10.2 J, 平均功率密度: 3.6 GW/cm^2

Fig. 10 Lateral shearing interferogram of the wave front for the various power levels

(beam diameter: 60 mm, pulse width: 100 ps)

(a) Energy: 2.5 J, Average power density: 0.8 GW/cm^2 ;
(b) Energy: 5.4 J, Average power density: 1.96 GW/cm^2 ;
(c) Energy: 7.6 J, Average power density: 2.8 GW/cm^2 ;
(d) Energy: 10.2 J, Average power density: 3.6 GW/cm^2

实验测量了 100 ps 单脉冲激光束在良好的调制度干涉图时, 时间相干长度可达 3 cm, 测量时仍采用双平板剪切激光干涉仪, 调节两板之间的距离, 观测干涉条纹的变化, 来完成这一测量。

五、光谱特性测试

这里的光谱测试是在图 1 中的振荡器为晶体调 Q 时进行的, 激光束光脉冲宽度为 1 ns。

采用 1.3 m 光栅光谱仪, 测得激光光谱的多纵模结构如图 11 所示。光栅常数为 288

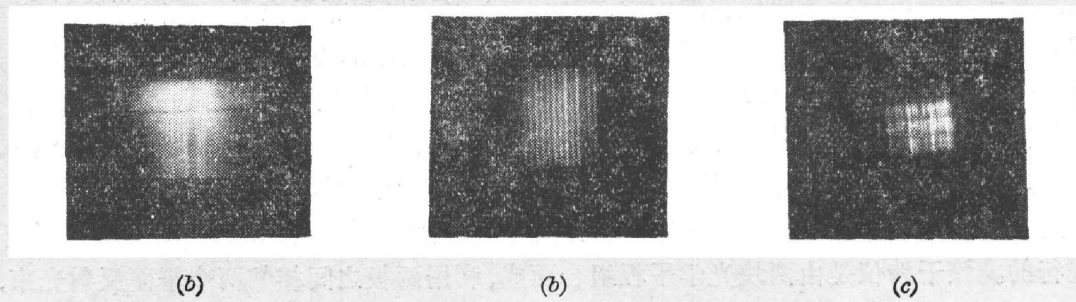


图 11 光谱测试照片

- (a) 不稳定腔晶体调 Q 振荡器光谱;
- (b) 振荡器腔内加 F-P 选模板后的光谱;
- (c) 末级器件的光谱

Fig. 11 Spectral photographs of the laser beam

- (a) Spectrum of the unstable cavity oscillator with crystal Q switch;
- (b) Spectrum of the oscillator with F-P mode selector;
- (c) Spectrum of the terminated device

line/mm, 用 1.06μ 波长的二级光谱, 线色散为 $13.4 \text{ \AA}/\text{mm}$ 。

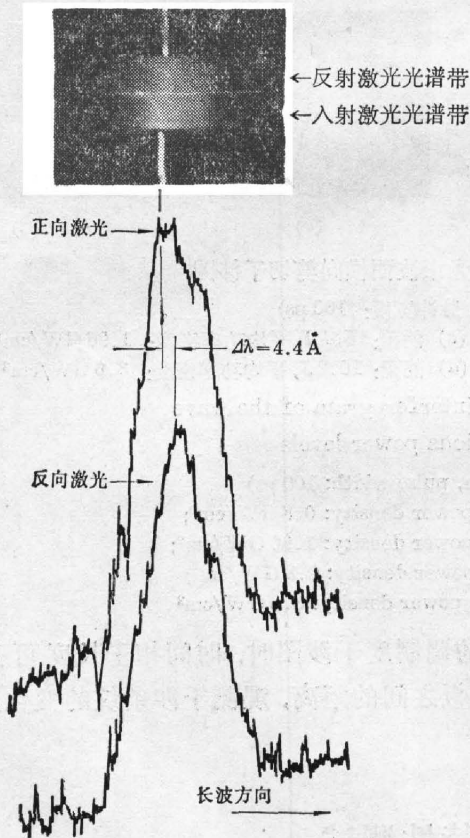


图 12 入射激光与等离子体反射激光光谱照相和微密度计扫描轨迹

Fig. 12 Spectral photograph and microdensitometer tracing for the incident and reflected laser beam ($\lambda = 1.06 \mu$) from laser-produced plasma

当用高功率钨玻璃激光束聚焦辐照 CD_2 靶时, 对等离子体反射激光光谱进行了测试。实验中是将入射激光和从等离子体反射回来的激光分别用柱透镜聚焦到光栅光谱仪狭缝的上、下位置上, 使在同一张谱片上同时记录入射和反射激光的光谱, 如图 12 所示。测量表明, 反射激光光谱带有向长波方向移动的现象, 称为“红移”现象, 红移量为 4.4 \AA 。这种“红移”可以用等离子体截止密度层沿着激光方向的运动来解释^[8]。按多普勒效应计算, 截止反射层的向内速度约为 $1.2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 。

本工作得到邓锡铭教授和余文炎副教授的关心和有益的讨论。张如礼、徐松庆同志为测试装置提供机械结构设计。部分实验工作得到陈时胜、林礼煌同志的合作, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 徐至展等;《物理学报》, 1980, **29**, No. 4 (Apr.), 439.
- [2] 邓锡铭等;《光学学报》, 1981, **1**, No. 4 (July), 289.
- [3] 梁向春等;《激光》, 1980, **7**, No. 7 (July), 41.
- [4] 林尊琪等;《物理学报》, 1979, **28**, No. 2 (Mar.) 268.
- [5] 吉田國雄[吉田];《レーザー研究》, 1977, **5**, No. 1 (June), 26.
- [6] 激光参量测量编写组;《激光参量测量》, 1976, 上海人民出版社, 23.
- [7] 梁向春等;《激光》, 1978, **5**, No. 5~6 (Nov.) 153.
- [8] K. Büchl, *et al.*; *A. P. L.*, 1972, **20**, No. 1 (Jan.), 3.

Optical characteristics measurements of high power laser

LIANG XIANGCHUN JIANG YUZHU AND SHI AILING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 25 June 1981)

Abstract

Laser fusion research has promoted the development of high power lasers. In order to evaluate the beam quality of high power Nd:glass laser system, we have measured some optical characteristics of laser beam, such as energy distribution of near-field, characteristic of far-field and divergence, wavefront distortion and coherence, spectrum of laser beam.

The diagnostic instruments we used include a near-field camera for photographing the laser output energy distribution, an array camera for recording the far-field of laser beam, a radial shearing interferometer and lateral shearing interferometer with two plates for measuring the laser beam wavefront.

Measurement results are obtained under the conditions of the laser output power of 10^{10} W and 10^{11} W.