

## 高功率 DPL 光束质量研究\*

杨文是, 王伟力, 孙维娜, 秘国江, 朱 辰, 王小寒

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:**为了在高功率 DPL 中获取高光束质量输出激光, 利用扭转模获取高光束质量种籽源的同时, 进行了高重复频率下的热致及光致双折射效应的补偿、高功率二极管均匀泵浦聚光腔设计及相位共轭镜用于改善激光系统光束质量等特性研究。最终获得了重复频率 40 Hz、单脉冲能量大于 400 mJ、近衍射极限的高光束质量激光输出。这种方法对高功率激光系统的设计十分有用。

**关键词:** MOPA 激光系统; 相位共轭镜; 高光束质量

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)05-0511-06

## Beam quality of the high power DPL\*

YANG Wen-shi, WANG Wei-li, SUN Wei-na, BI Guo-jiang, ZHU Chen, WANG Xiao-han

(The North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** In order to acquire the high beam quality output laser, the high beam quality laser seeder is obtained by the method of twist mode. At the same time, compensation of birefringence, uniform pump cavity and phase conjugation mirror (PCM) were used to improve the beam quality of MOPA laser system. More than 400 mJ, 40 Hz output laser with near diffraction limited beam quality was obtained. And it is very useful to design the high power laser.

**Key words:** MOPA laser system; Phase conjugation mirror; High beam quality

### 0 引言

$$\theta = \theta_{衍} = \lambda / d_0 \text{ (rad)}$$

激光器的光束质量可用其方向性、单色性和亮度表示。单色性是指光谱纯度, 用光谱线宽与中心频率的比值来量度, 它反映了激光源的时间相干性。反映激光束空间相干性的方向性是用光束的发散角定量表示的, 在最好的情况下, 激光束的方向性可以达到由光束截面大小所决定的衍射极限, 此时激光束的平面发散角应等于衍射角, 即:

式中  $\lambda$  为激光波长;  $d_0$  为光束直径。

激光束立体发散角为:

$$\Omega = \theta^2 = (\lambda / d_0)^2 = \Omega_{衍}$$

式中  $\Omega_{衍}$  为立体发散角。

国际标准化组织曾给出一个光束质量的定量判据, 即所谓  $M^2$  光束质量因子:

收稿日期: 2004-12-03; 修订日期: 2005-03-02

\* 基金项目: 固体激光技术重点实验室基金资助项目 (51438030101DZ2102)

作者简介: 杨文是 (1975-), 男, 湖北孝感人, 硕士生, 目前主要从事激光技术的研究。

$$M^2 = \frac{\pi d_0 \theta}{4\lambda}$$

式中  $d_0$  为高斯光束束腰的直径;  $\theta$  为光束发散角 (全角)。质量很好的光束  $M^2$  值为 1, 但大多数高功率激光器  $M^2$  远大于 1, 这是由于光束存在像散(像差的一种), 造成光束偏离了高斯形的缘故, 使在得到高功率输出的同时很难获取高光束质量<sup>[1,2]</sup>。

对于激光系统中由各类热畸变、激活介质材料缺陷以及光学元件的不均匀性等造成的光束质量的下降, 可以采用基于受激后向布里渊散射相位共轭的方法, 使光束两次或多次通过同一激活介质, 利用光束的相位共轭特性, 使光路中的畸变得校正或改善, 从而改善激光系统的光束质量。本文以扭转模直线腔激光器作为振荡级, 进行了应用相位共轭技术改善 MOPA 系统(主振荡+功率放大)光束质量的研究。

### 1 高质量激光种籽源的获取

在 MOPA 系统里, 为了获得较低相位共轭阈值和高反射率, 需要获取窄线宽(最好是单纵模)、高光束质量的种籽源。为此, 我们采用扭转模激光器作为 MOPA 系统的振荡级, 如图 1 所示。利用 Nd:YAG 作激光介质(它在与传播方向垂直的平面上不存在由天然双折射性造成的各向异性, 所以在传播时保持圆偏振), 即在线性振荡腔内插入一对相互垂直的  $\lambda/4$  波片用以产生扭转模, 消除直线腔中的空间烧孔效应, 从而使输出激光达到较大的相干长度以满足受激布

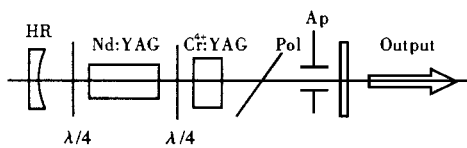


图 1 种籽源原理图

Fig.1 Diagram of the laser seeder

里渊散射(SBS)的要求。两波片的光轴相互垂直且与偏振方向成  $45^\circ$ , 这样光在激活介质中呈圆偏振状态。在腔内相向而行的两个方向上的两个圆偏振的旋向相反。这样的两个光束相互干涉造成了在传播方向上光强保持常数而没有“烧孔效应”。实验中<sup>[3]</sup>, 在三维二极管泵浦聚光腔中放置一根  $\phi 5 \text{ mm} \times 102 \text{ mm}$  Nd:

YAG 棒, 获得重频 40 Hz, 单脉冲能量 3.6 mJ, 半峰值功率点全宽度 8 ns(如图 2 所示), 光束质量  $M^2$  X 向:1.27, Y 向:1.34 的高光束质量输出。图 3、图 4 分别为 CCD 采集的扭转模激光器输出的光束质量  $M^2$  图和远场光斑图。

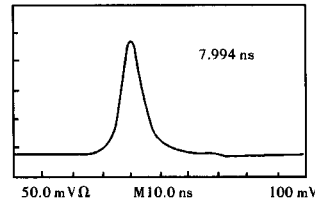


图 2 种籽脉宽图

Fig.2 Pulse width of the seeder

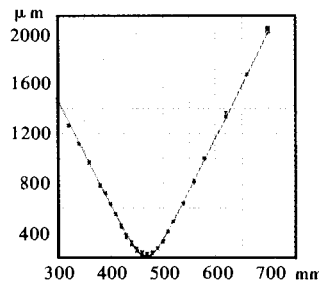


图 3 种子  $M^2$  图

Fig.3  $M^2$  of the seeder

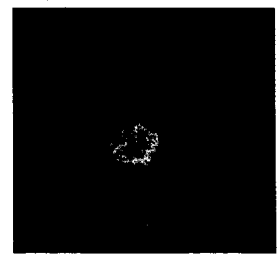


图 4 种子输出远场光斑图

Fig.4 Output beam profile of the seeder in the far field

### 2 高重复率下热致及光致双折射效应的补偿

如图 5 所示, 当放大 1 和放大 2 注入相同时, 在两级功放之间加入  $90^\circ$  QR 和  $4f$  时, 系统的退偏由原来

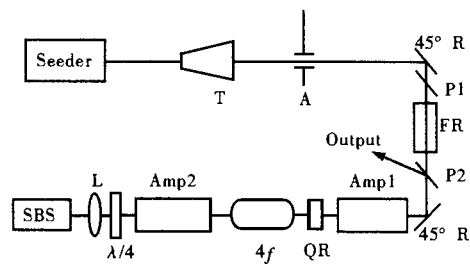


图 5 MOPA 实验装置示意图

Fig.5 Experimental setup of the MOPA system

的 20% 下降到 3% 以下。此实验结果实质上是热致及光致双折射现象的补偿问题, 可以用传输矩阵理论解释<sup>[3]</sup>: 当一束光通过对称结构的各向异性光学元件 Nd:YAG 棒时, 从棒入射面到出射面的传输矩阵为:

$$M_{LM} = \begin{pmatrix} a_r & b_r & 0 & 0 \\ c_r & d_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_\phi & b_\phi \\ 0 & 0 & c_\phi & d_\phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中  $a_r=1+\beta_r S^2$ ;  $c_r=2n_0 S\beta_r$ ;  $a_\phi=1+\beta_\phi S^2$ ;  $c_\phi=2n_0 S\beta_\phi$ ,  $a_r$  及  $a_\phi$  分别是径向线偏光和切向线偏光相对于光轴的斜率,  $\beta_r$  及  $\beta_\phi$  是对于偏振光径向和切向折射率的变化系数;  $b_r=b_\phi=S/n_0$ ,  $S$  是激光棒的几何长度,  $n_0$  是棒中心的折射率;  $c_r$  及  $c_\phi$  为光弹系数。在本振级的两根物理特性基本一致 Nd:YAG 棒之间加一个  $90^\circ$  石英旋光片, 而  $90^\circ$  薄旋光片仅仅改变径向和切向偏振的光线参数, 即光的偏振方向旋转了  $90^\circ$ , 使原来的径向分量成为切向, 而切向分量成为径向。它的传输矩阵为:

$$M_R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

各向同性的光学元件对两个方向的偏振光影响是相同的, 因此自由空间的传输矩阵可写为:

$$M_0 = \begin{pmatrix} a_0 & b_0 & 0 & 0 \\ c_0 & d_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_0 & b_0 \\ 0 & 0 & c_0 & d_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

因为

$$M_0 M_R = M_R M_0 \quad (4)$$

由此, 包含两激光棒和旋光器及自由空间的传输矩阵可写为:

$$M_{tot} = M_{LM} M_R M_0 M_{LM} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & E & F \\ 0 & 0 & G & H \\ A & B & 0 & 0 \\ C & D & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中  $A=a_0 a_\phi a_\phi + c_0 a_\phi b_\phi + b_0 a_\phi c_\phi + d_0 b_\phi c_\phi$

$$B=a_0 a_\phi b_r + c_0 b_r b_r + b_0 a_\phi a_\phi + d_0 a_\phi b_\phi$$

$$C=a_0 a_r c_\phi + c_0 a_r b_\phi + b_0 c_r c_\phi + d_0 a_\phi c_r$$

$$D=a_0 b_r c_\phi + c_0 a_\phi b_r + b_0 a_r c_\phi + d_0 a_\phi a_\phi$$

$$E=a_0 a_r a_\phi + c_0 b_r a_\phi + b_0 a_r c_\phi + d_0 b_r c_\phi$$

$$F=a_0 a_\phi b_r + c_0 b_r b_r + b_0 a_\phi a_\phi + d_0 b_r a_\phi$$

$$G=a_0 c_r a_\phi + c_0 a_r a_\phi + b_0 c_r c_\phi + d_0 a_r c_\phi$$

$$H=a_0 b_r c_\phi + c_0 a_r b_r + b_0 c_r a_\phi + d_0 a_r a_\phi$$

为了达到对双折射的补偿, 必须使全系统的传输矩阵  $M_{tot}$  对光的作用像一个各向同性元件。这时必须满足如下的条件:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E & F \\ G & H \end{pmatrix} \quad (6)$$

根据公式(1)和(5), 要使  $B=F$  及  $C=G$ , 必须满足:

$$a_0 = d_0 \quad (7)$$

要使  $A=E$  及  $D=H$ , 则要求:

$$2n_0 b_0 + S^2 c_0 + 2n_0 s d_0 = 0 \quad (8)$$

$$a_0 d_0 - b_0 c_0 = 1 \quad (9)$$

可见, 只要公式(7)~(9)得到满足, 就可以使系统中两个条件完全相同的放大级激光棒内由热吸收造成的偏振获得补偿。又因为, 自由空间传输矩阵为:

$$M_{OS} = \begin{pmatrix} a_0 & b_0 \\ c_0 & d_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

而要使公式(8)得到满足, 取决于正确的系统设计。我们是通过在两级功放之间另加一望远镜(4f系统)实现的。为避免4f系统两透镜之间的焦点处因过高的功率密度而产生空气电离, 采用石英玻璃管抽真空结构。同时, 在石英管中心(即两透镜的焦点处)内置一小孔光阑使得该系统兼具空间滤波器的功能: 利用单透镜实现两次傅里叶变换成像, 滤去因衍射效应而造成的光束的高频空间分量, 使输出的激光光斑具有完美的空间强度分布。

### 3 高功率 DPL 均匀泵浦放大技术

采用线列阵半导体激光器侧泵浦圆柱体 YAG 时,

为了增加激光器输出功率，采用对称放置泵浦源，这种泵浦方式能在增益介质中实现泵浦光的均匀分布，泵浦光的能量中心也与晶体的几何中心重合，提高了泵浦光的利用率和基横模的转换效率<sup>[4]</sup>。设计中泵浦腔分为 5 列，每列互成 72°，对称环绕于 YAG 棒周围，并直接贴于 YAG 棒冷却石英管表面，如图 6 所示。

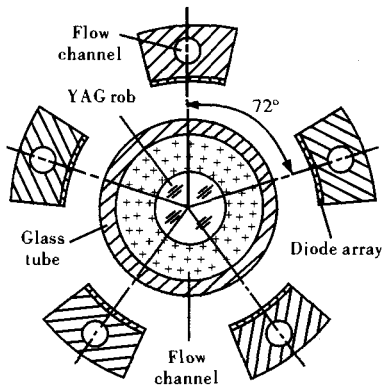


图 6 泵浦腔的结构图

Fig.6 Structure of the pump cavity

按照图 6 耦合方式安装泵浦腔后，对耦合入棒的泵浦光的荧光分布用光束分析仪进行测试。图 7 为单透镜聚焦成像时的荧光分布。从图中可以看出泵浦光有较强的方向性，靠近二极管方向的光斑分布较强。通过重新设计二极管所附热沉曲面曲率参数、聚光腔的泵浦均匀性得到明显的改善。

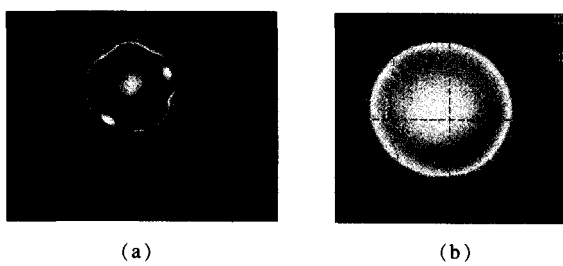


图 7 五向二极管腔改进前(a)后(b)泵浦荧光分布图

Fig.7 Fluorescence distribution before(a)and after(b) improved by pumping with different LD cavity in five directions

### 4 相位共轭镜

#### 4.1 相位共轭基本原理

光学相位共轭是指利用某种光学非线性现象来达到光波的传播方向及各处的位相因子的准确反转。

通过相位共轭反射镜的 SBS 过程能补偿高功率激光束的波前畸变，改善光束质量<sup>[3]</sup>。由种籽源产生的均匀平面波在放大器中能量得到放大，同时由于热效应使波前畸变，普通反射镜在反射光束时只会反射畸变，因此在传播方向上的畸变保持不变；当第二次通过放大器后，能量被再次放大，但是畸变也同时被放大，光束质量也变坏。而通过相位共轭镜的反射可以使波前反相，这样第一次放大过程产生的畸变波前在第二次通过放大器时发生反向的畸变，因此畸变得到了补偿<sup>[5]</sup>，图 8 显示了这样的过程。

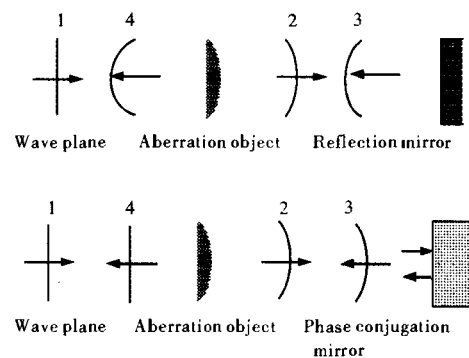


图 8 相位共轭对放大介质引起的光学相位畸变的补偿

Fig.8 Compensation of distort in amplifying material by phase conjugation

产生相位共轭的方法包括四波混频、受激布里渊散射以及非线性效应，如二波混频、三波混频、受激拉曼散射、光子回波、双光子吸收等等。在受激布里渊散射中，泵浦光被介质中建立起来的声波相干地向后反射。在介质中自发的随机密度的涨落对应于许多相位光栅，其中光栅矢量与人射光传播方向一致的光栅所反射的光与人射光干涉造成前向运动的干涉条纹。介质中的电致伸缩效应的作用使光栅进一步增强，从而增强后向散射。这一后向散射具有与介质中声频大小相同的多普勒频移。入射波、声波和后向散射波三者的相互耦合导致了后向散射波指数增长。最后这一后向散射波将因竞争优势而产生后向受激散射。由于光栅的建立是因畸变的人射波与反射波干涉形成的，因此声光栅中包含了入射波的畸变信息，该声光栅就是一个形状和位置随入射波中的相位干扰而变化的反射镜。由于多普勒频移量极小，约为光波频率的  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ ，因此近似地认为频移不影响其位相共轭特性。

SBS 过程起源于噪声,要使之增长到足够的强度,就要求入射光波具有一个阈值强度<sup>[3]</sup>。

#### 4.2 相位共轭镜的基本理论

由耦合波方程得出斯托克斯波的增益指数为:

$$g_s = \frac{\omega_s}{n_0 C^2} \frac{\gamma^2}{\rho_0 \epsilon_0} k_A \alpha_A \frac{1}{(V\alpha_A)^2 + (\omega_s - \omega_s)^2} \quad (11)$$

稳态增益指数为:

$$g_0 = \frac{\omega_s}{n_0 C^2} \frac{\gamma^2}{\rho_0 \epsilon_0} k_A \alpha_A \quad (12)$$

声子寿命为:

$$\Gamma = \alpha_A V \quad (13)$$

式中  $n_0$  为 SBS 介质的折射率;  $\rho_0$  为介质的密度;  $\gamma$  为介质的电致伸缩系数;  $V$  为介质中声波的速度;  $\alpha_A$  为声波在介质内的衰减系数;  $k_A$  为声波在介质中的波矢量。这些量均与 SBS 介质的物理性质有关。

因此, SBS 介质的稳态相位共轭增益与斯托克斯光的频率有关,由物质的物理性质决定。也就是说在一定频率的激光泵浦情况下,一旦选定了一种介质作为 SBS 介质,它的稳态增益、声子寿命均由自身的物理性质决定。

#### 4.3 相位共轭镜的设计

##### 4.3.1 SBS 介质的选择

目前,在很多种介质中存在受激布里渊散射,这些介质按其物理状态可以分为固体、液体和气体。在实际工作中,可以针对不同状态的介质采用不同的装置来实现有效的 SBS 输出。

液体是当前经常采用的相位共轭介质。主要有  $CS_2$ 、 $CCl_4$  等透明液体。这些介质产生的散射光频移约为  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  量级,介质内产生的超声波频率为  $10^9 \sim 10^{10} \text{ Hz}$ ,液体介质对光波的衰减系数为  $10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ,对超声波的衰减系数为  $10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ,声子寿命为  $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ s}$ 。为了提高介质的抗光伤能力和得到较为有效的相位共轭作用, SBS 介质对物质的纯度有很高的要求。表 1 给出了典型的 SBS 介质及其基本的特性参数<sup>[6]</sup>。

通常,调 Q 激光的脉冲宽度约为 7~20 ns,由表 1 可知:气体介质的声子寿命约为 17~30 ns。因此,气体

表 1 典型的 SBS 介质及其基本特性参数

Tab.1 Fundamental character parameter of SBS medium

| Medium type | Phonon lifetime $\tau/\text{ns}$ | Gain coefficient / $\text{cm GW}^{-1}$ |
|-------------|----------------------------------|--|
| Liquid      | $CS_2$                           | 5.2                                    |
|             | Acetone                          | 2.1                                    |
|             | $CCl_4$                          | 0.6                                    |
|             | Freon113                         |  |
|             | Water                            | 1.87                                   |
| Gas         | $CH_4(10032500 \text{ Pa})$      | 17                                     |
|             | $SF_6(3511375 \text{ Pa})$       | 24                                     |
| Solid       | $SiO_2$                          | 4.8                                    |

介质的相位共轭镜在这种情况下表现出瞬态效应,有效 SBS 增益系数将严重下降。而液体介质的声子寿命约为 0.3~5.2 ns,因而液体介质能够满足出稳态条件,有效的相位共轭增益能够达到稳态增益水平。从稳态条件来看,在一般场合液体介质不失为合适的 SBS 介质。

##### 4.3.2 相位共轭池的设计

对于一相位共轭系统而言,在其他条件一定的情况下, SBS 介质存在最佳的长度,聚焦透镜也存在最佳焦距,使得相位共轭光的反射率、保真度达到最佳。普通的 SBS 相位共轭池结构是由聚焦透镜和单个液池组成。有文献报道,在一级近似的情况下,焦距的变化不会影响到阈值或反射率。SBS 的指数增益系数表示为:

$$G = gIL$$

式中  $g$  为介质的 SBS 增益系数;  $I$  为光束束腰处的光强;  $L$  为 SBS 的作用长度(被限制在光束的特征衍射长度,即瑞利范围内)。当焦距缩短, SBS 作用长度  $L$  随之缩短,而光束束腰处的光强增大,在一级近似下,可以认为 SBS 的指数增益系数  $G$  不变。选用短焦距时, SBS 作用长度缩短,声波的分布压缩在很小的范围,其优点是降低了对激光相干长度的要求,同时由于光束束腰处的光强增大,容易造成击穿,消耗能量,降低反射率。单个液池的 SBS 增益有限,容易造成击

穿,但是结构简单,对于中小功率的泵浦还是适用的。这里,对液体介质  $\text{Cl}_4$  采用了三种组合进行实验,泵浦激光源如图 5 所示,实验结果如图 10 所示。图中池长分别为 140、200、300 mm, 焦距分别为 100、140 200 mm。

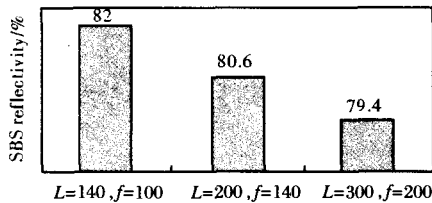


图 9 改变透镜的焦距对 SBS 反射率的影响

Fig.9 Effects of lens' focal length on SBS reflectivity

当 SBS 池  $L=140$  mm,  $f=100$  mm 时,在该 MOPA 系统中,测量了  $\text{Cl}_4$  的反射率曲线,如图 12 所示。由曲线图可知,  $\text{Cl}_4$  SBS 阈值为 3 mJ, 反射率为 15%, 当注入能量大于 40 mJ 时, SBS 反射率达到 60% 以上。

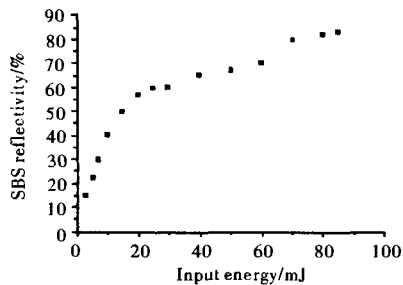


图 10 SBS 反射率曲线图

Fig.10 Curve of the SBS reflectivity

## 5 结束语

在高功率 DPL 相位共轭技术研究中,采用全二极管泵浦的 MOPA 系统,进行了高重复率下的热致及光致双折射效应的补偿、高功率二极管均匀泵浦聚光腔设计及相位共轭镜用于改善 MOPA 激光系统光束质量。最终获得了重复频率 40 Hz、单脉冲能量大于 400 mJ、近衍射极限的高光束质量 ( $M^2 X:1.41$   $M^2 Y:1.50$ ) 激光输出。其远场光斑和光束质量因子  $M^2$  分别如图 11(a)、(b)所示。上述相关的技术研究方法对获取高光束质量的高功率激光器件具有很好的借鉴作用。

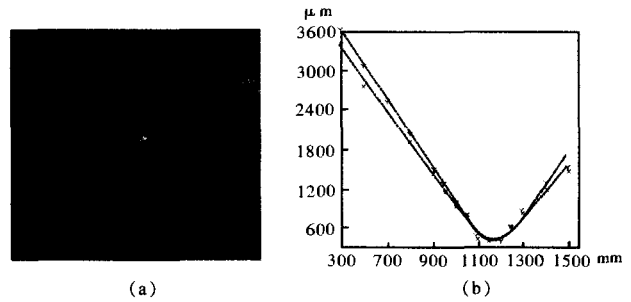


图 11 重复频率 40 Hz、单脉冲能量大于 400 mJ 时,远场光斑图和  $M^2$  图

Fig.11 Beam profile in far field and  $M^2$  more than 400 mJ, 40 Hz output laser

## 参考文献:

- [1] HUANG De-xiu, LIU Xue-feng. Semiconductor Laser and It's Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press(黄德修, 刘雪峰. 半导体激光器及其应用. 北京:国防工业出版社), 1999.
- [2] LV Bai-da, JI Xiao-ling, LOU Shi-rong, et al. Parametric characterization of laser beams and beam quality[J]. Infrared and Laser Engineering(吕百达, 季小玲, 罗时荣, 等. 激光的参数描述和光束质量. 红外与激光工程), 2004, 33(1):14-17.
- [3] CHEN Jun. Optical Phase Conjugating and It's Application[M]. Beijing: Science Press(陈军. 光学位相共轭及其应用. 北京:科学出版社), 1999.
- [4] LIU Zhi-gang, SUN Xiu-ping, ZHANG Xian-hui, et al. 1064 nm YAG laser side pumped by high power diode array[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (刘志刚, 孙秀平, 张先徽, 等. 大功率 1064 nm LD 列阵组侧泵浦 YAG 固体激光器. 长春理工大学学报), 2002, (2):201-203.
- [5] Kobara minoru, Kansei fumihiiko, Sato shanichi. Applied Laser Optical[M]. Beijing: Science Press(小原实, 神成文彦, 佐藤俊一. 应用激光光学. 北京:科学出版社), 2002.
- [6] PENG Hai-bo, WEI Guang-hui. The Nd: YAG laser system of phase conjugating mirror[J]. Laser and Infrared(彭海波, 魏光辉. 带相位共轭镜的 Nd: YAG 激光系统. 激光与红外), 2003, 32(9): 203-205.