

输出 2.5J/20ps 的高功率钕玻璃激光系统

徐至展 陈时胜 欧阳斌 陆海鹤 林礼煌 李士英
王世杰 樊立明 张正泉 朱国英 彭 辉
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文报道一台输出为 2.5J/20ps, 在 0.3mrad 内占总能量 80% 的高功率超短脉冲钕玻璃激光系统; 该装置还具有其输出激光脉冲宽度从 20ps 到 2ns 大范围内分段可调的性能。
关键词: 高功率激光器, 超短脉冲放大, 空间滤波器。

一、引 言

利用高功率激光开展激光等离子体相互作用、激光核聚变、X 射线激光等方面的研究已有多年历史并取得了重要进展。近年来, 发展更短脉冲的高能量、高亮度激光器并相应开展超短脉冲激光与物质的相互作用、原子的阈上多光子电离、超强场物理及超短脉冲泵浦的 X 射线激光研究已引起世界各国的普遍关注。

为了尽早在我国开展超短脉冲强激光与物质相互作用的研究, 并为正在开展的 1J/1ps 高亮度超短脉冲钕玻璃强激光器的研制打下基础, 我们已研制成功一台脉宽可变的 (20ps~2ns) 新型超短脉冲高功率钕玻璃强激光系统。在 20ps 脉宽运转时, 输出能量大于 2.5J, 功率 $\sim 10^{11}$ W 量级。

本文着重介绍该器件的物理设计及其运转特性。

二、系统概述

图 1 给出了装置的总体布置图。该装置包括一台对撞脉冲主被动锁模 Nd:YAG 振荡器, 一台普克尔盒电光开关单脉冲选择器, 二级双程 Nd:YAG 预放大器, 三级双程 Nd: 玻璃主放大器, 一级孔径 $\phi 40$ mm Nd: 玻璃末级放大器, 一台普克尔盒电光开关隔离器及两台真空空间滤波器。整个系统结构按排紧凑, 安装在两个 5m^2 的防震台上。

1. 振荡器

对撞脉冲主被动锁模 Nd:YAG 振荡器^[1]其结构如图 1 中振荡器部分所示。非谐振环由一个对 S 偏振的半透半反分束板 BS 和两个平面全反射镜 M_1 、 M_2 组成; 可饱和吸收体为五甲川染料或 BDN 染料片等, 将它精确置于此非谐振环中心位置; 一个声光调制器 AOM, 其调制频率为 50MHz, 频率稳定度为 10^{-6} , 紧靠输出镜放置; 输出镜 M_3 的透过率为 45%, 曲率半径为 10m, 装在平移精度为 $10\mu\text{m}$ 的调整架上, 便于精确调节激光腔

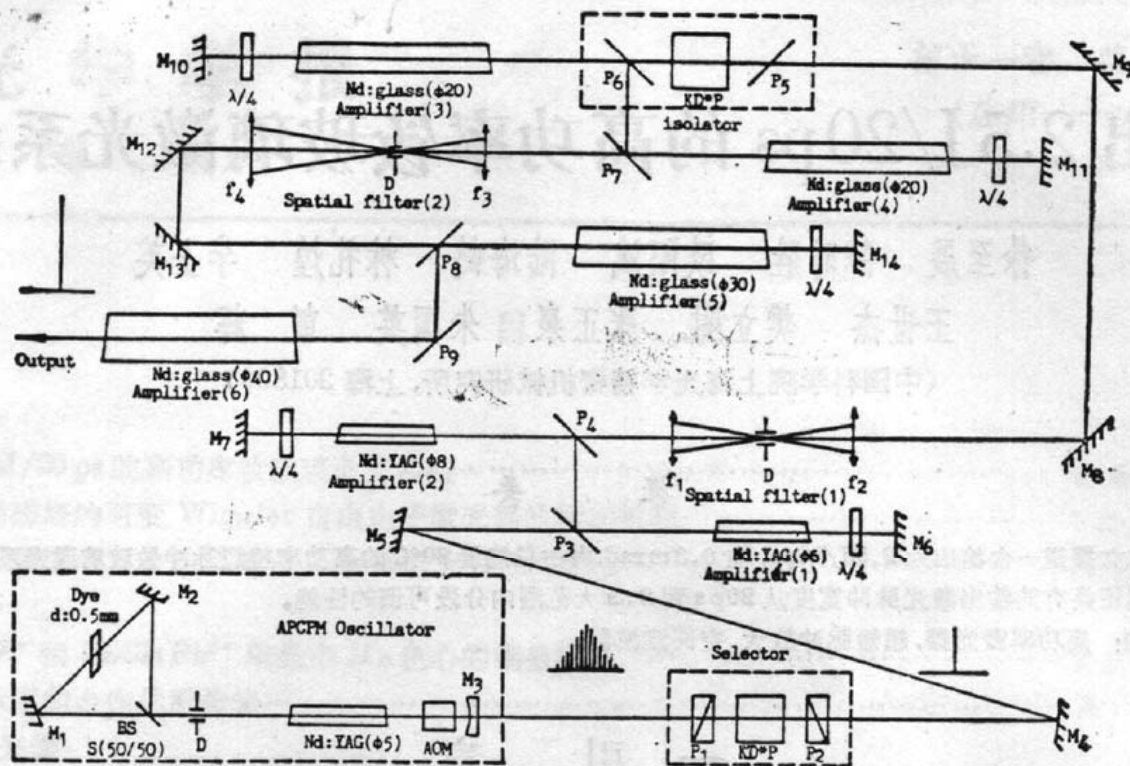


Fig. 1 High power laser system configuration

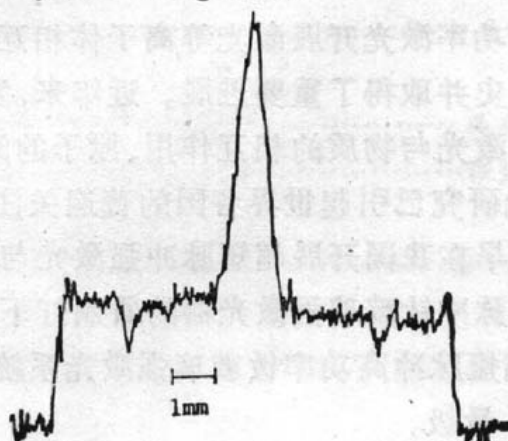
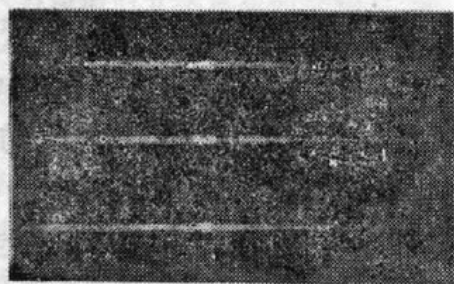


Fig. 2 TPF photograph of pulses from the oscillator with 20ps pulsewidth and its density trace

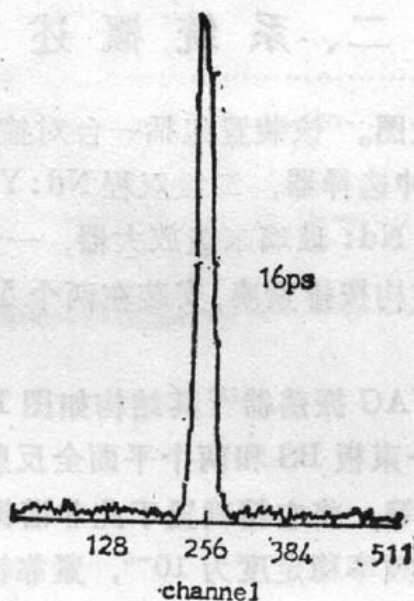


Fig. 3 Pulse shape of single pulse after frequency doubler measured with a streak camera

腔长与 2 倍声光调制器频率相匹配; Nd:YAG 棒尺寸为 $\phi 5 \times 80$ mm。

该振荡器结合了对撞脉冲锁模(CPM)^[2,3]和主被动锁模^[4,5]两种锁模激光器的优点,因此它具有高稳定性和短的脉冲宽度,同时能够方便地调换可饱和吸收体,获得脉冲宽度从 ps 量级到 ns 量级的变化以满足物理实验对不同脉冲宽度的要求。其输出性能如下:

当采用五甲川-二氯乙烷染料作可饱和吸收体时,对应于不同的浓度,锁模脉冲宽度为 20 ps~50 ps;一发到另一发序列脉冲的能量起伏小于 $\pm 4\%$;序列脉冲能量为 ~ 1 mJ。图 2 给出脉冲宽度为 20 ps(FWHM)的双光子荧光照片和对应的黑度扫描。图 3 给出单脉冲倍频光的条纹相机测量脉冲宽度为 16 ps(FWHM);当采用不同浓度的 BDN 染料片作为可饱和吸收体时,脉冲宽度为 200 ps 到 1 ns。当选用 Cr:Nd:YAG 晶体和 LiF:F₂ 晶体作可饱和吸收体时对应的脉冲宽度为 1 ns~2 ns。图 4 给出条纹相机测量四种不同可饱和吸收体典型的锁模脉冲宽度。

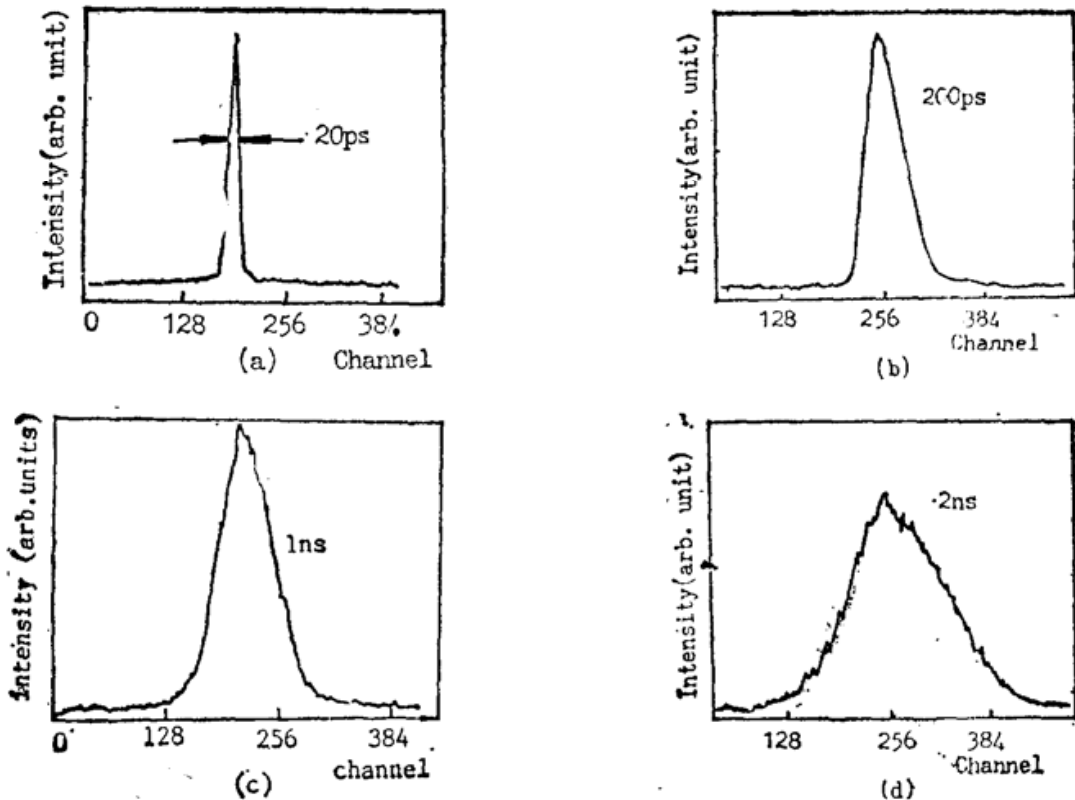


Fig. 4 Streak camera traces of single pulse in APCPM.

(a) Pulsewidth (FWHM) of 20ps for pentamethyldene-1,2 dichloroethene. (b) Pulsewidth (FWHM) of 200ps for BDN film. (c) Pulsewidth (FWHM) of 1ns for Cr:Nd:YAG crystal. (d) Pulsewidth (FWHM) of 2ns for LiF:F₂ color center crystal

2. 单脉冲选择器

采用普克尔盒电光开关作为单脉冲选择器。它是由一对正交的偏振棱镜 P_1 、 P_2 和 KD*P 电光晶体组成。通过激光脉冲信号同步触发、控制加到 KD*P 晶体上的高压脉冲,使之从序列脉冲中选出一个单脉冲。锁模序列脉冲间隔为 10 ns, 普克尔盒开关门脉冲宽度为 8 ns。图 5 给出序列脉冲和选出的单脉冲示波图形。

3. 放大器序列

系统中放大器序列由二级 Nd:YAG 双程预放大器 (AM I, AM II), 三级掺钕硅酸盐

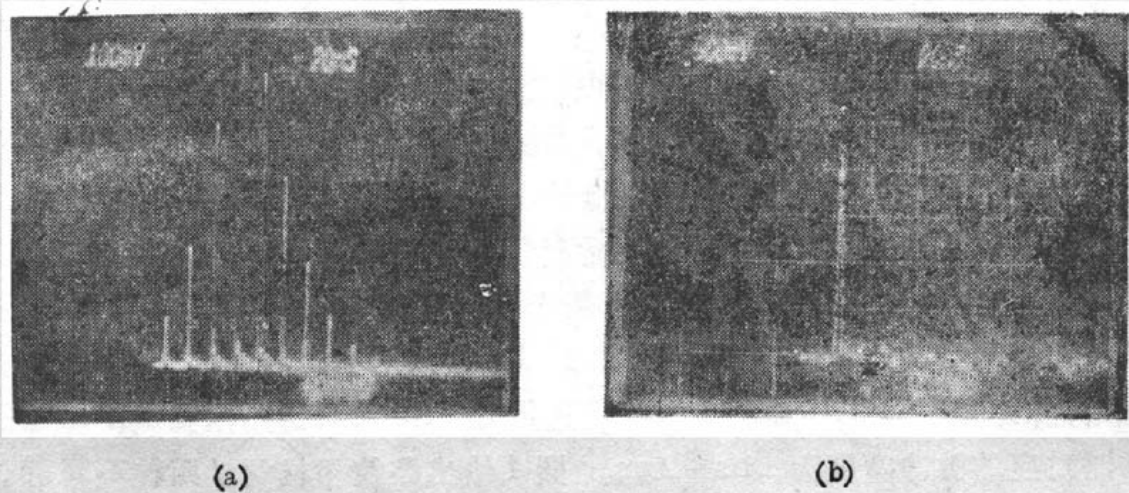


Fig. 5 Photographs of oscillograms. Typical pulsetrain from oscillator (a) and single pulse selected from the pulsetrain (b)

玻璃(Nd:glass)主放大器(AM III, AM IV, AM V)和一级孔径为 $\phi 40$ mm 掺钕硅酸盐玻璃末级放大器(AM VI)组成。从振荡器输出脉冲序列中选出的单脉冲能量为 ~ 0.1 mJ, 要将它放大到2J以上, 要求放大器序列的净增益大于 10^4 。各级放大器的增益按排列如表1。为了提高放大器的效率, 得到更高的净增益能量引出, 采用了同轴双程放大器技术。第一次放大后的光束通过 $1/4$ 波片全反射后再次通过 $1/4$ 波片, 偏振面旋转 90° , 经第二次放大后由两块偏振板(P_3, P_4)耦合进入下一级放大器。放大器增益系数 β 由下式给出^[6]:

$$\beta = \{ \ln [\exp(E_{out}/E_r) - 1] - \ln \{ \exp[(E_{in}/E_r) - 1] \} / L, \quad (1)$$

式中 L 为增益介质长度, 对双程放大取 $2L$; $E_r = h\nu/2\sigma S$, 为饱和能量密度; S 为饱和参量, 取值为1.2; $\sigma = 1.2 \times 10^{-20}$ cm²(Nd:glass), $\sigma = 4.6 \times 10^{-19}$ cm²(Nd:YAG); E_{out} 、 E_{in} 分别为输出输入能量密度。实验上测量出 E_{out} 和 E_{in} , 由(1)式算出各级放大器增益 β 值。表2给出放大器(AM III)不同光泵密度和输入能量密度的增益系数 β 值。

Table 1 Gain arrangement

name	medium length (mm)	gain	output energy (mJ)	energy density mJ/cm ²
oscillator	Nd:YAG $\phi 5 \times 80$		0.1	0.5
pulse selector		50%	0.05	
pre-amplifier I	Nd:YAG $\phi 6 \times 80$	12	0.6	2
pre-amplifier II	Nd:YAG $\phi 8 \times 80$	12	7.2	12
spatial filter		60%	4.2	
isolator		60%	2.5	
main-amplifier III	Nd:glass $\phi 20 \times 500$	10	25	8.3
main-amplifier IV	Nd:glass $\phi 20 \times 500$	10	250	83
spatial filter		70%	175	
main-amplifier V	Nd:glass $\phi 30 \times 500$	6	1050	150
final amplifier VI	Nd:glass $\phi 40 \times 500$	3	3.15(J)	0.25(J/cm ²)

Table 2 Measurement gain of two-pass amplifier
(Nd: glass $\phi 20 \times 500$ (mm))

pump density J/cm^2	input energy density mJ/cm^2	output energy density mJ/cm^2	gain $\beta(cm^{-1})$
0.17	2.76	14.4	0.019
0.22	2.76	18.8	0.021
0.29	1.76	34.0	0.028
0.17	2.44	14.0	0.020
0.22	2.44	21.2	0.024
0.29	2.44	28.0	0.027

4. 空间滤波器^[7]

对高功率激光器, 提高亮度的主要限制是小尺寸自聚焦。使用空间滤波器能消除光束强度的空间起伏, 从而抑制了小尺寸自聚焦。

在放大器中, 由于介质的非线性作用影响, 在不同的空间频率处所产生的激光强度起伏可表示为^[8],

$$\left. \begin{aligned} \Delta I(K) &= I_0 \exp B(K), \\ B(K) &= \int_0^L g(K, x) dx, \\ g(K, x) &= K \left(\frac{\gamma I(x)}{n_0} - \frac{K^2}{4\pi n_0 k_0^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $K = 2\pi/\lambda$, 称为空间频率; $\gamma = 4\pi n_2/n_0 c$, 对于掺钕硅酸盐玻璃 γ 值为 $4.2 \times 10^{-7} (GW/cm^2)$; $I(x) = I_0 e^{\beta x}$, β 为增益系数。图 6 为以功率密度为参变量的一组 $B(K)$ 积分的计算结果。曲线表明, 激光强度通过放大介质的增强与激光束的空间频率的关系, 频率越高激光强度增长越快。正是由于这种激光强度在不同频率处的不同增强, 导致空间截面上光强度分布不均匀引起小尺寸自聚焦, 破坏了光束的方向性。因此使用空间滤波器把增长较快的高频部分滤掉, 使光束截面上光强度分布均匀化, 提高可聚焦功率。空间滤波器的截止频率为 $K_c = kd/2f$, 其中 d 为小孔直径, f 为聚焦透镜焦距。该系统使用二台空间滤波器(选用: $d_1 = 0.5$ mm, $f_1 = 500$ mm; $d_2 = 1$ mm, $f_2 = 1000$ mm)。这样 K_c 为 $29.6 cm^{-1}$, 它只允许大于 λ 为 2.1 mm 的空间条纹通过。经过两次滤波后输出光束远场图样如图 7 所示, 已无细的空间条纹, 光强分布均匀。

空间滤波器的透过率为:

$$T = 1 - \int_{K_0}^{K_{max}} 2\pi K I_0 \exp[B(K)] dK \quad (3)$$

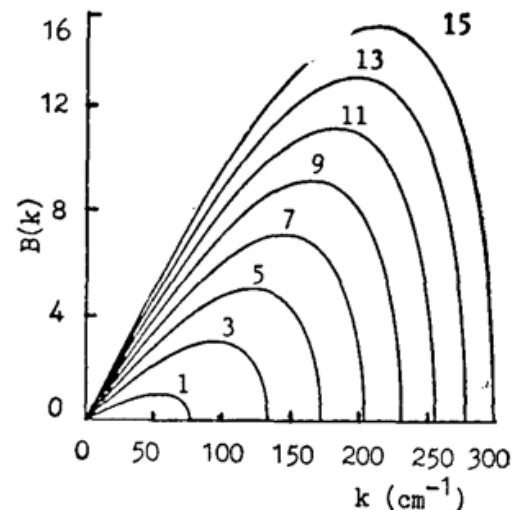


Fig. 6 $B(K)$ vs wavenumber

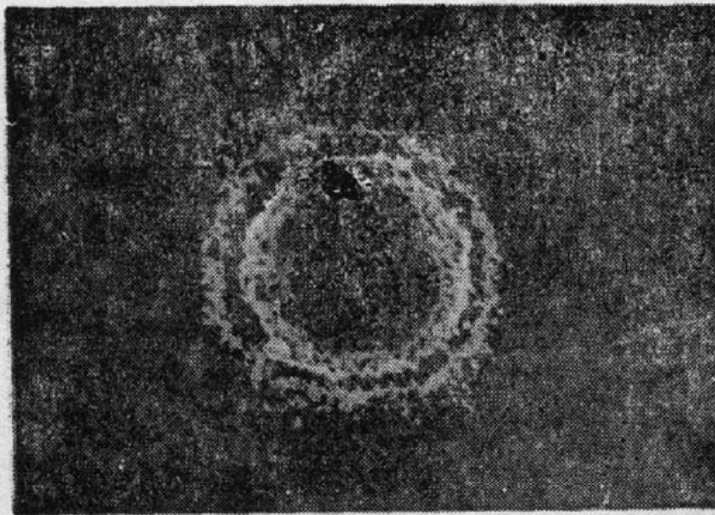


Fig. 7 Far-field pattern of final amplifier output laser after two spatial filters

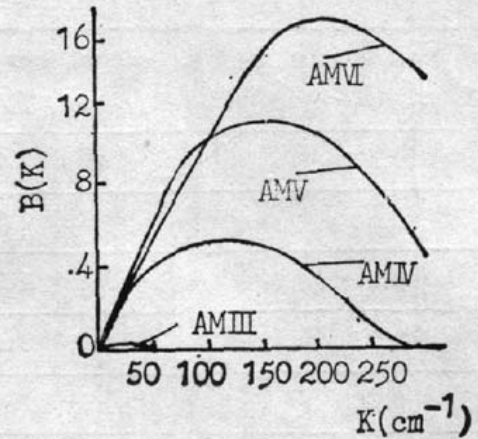


Fig. 8 $B(K)$ of four stage Nd: glass amplifier vs wavenumber

式中 K_{max} 为空间最大增长透过率。(3) 式表明, 空间滤波器的透过率随着 B 积分增长而降低。为了使放大器输出光束均匀, 并有较大透过率, B 积分值应小于 5。根据各级放大器增益计算出各级放大器的 B 积分由图 8 给出, 该系统 B 积分和为 10.7。

5. 隔离器

本系统选用的电光开关隔离器是 $\phi 20$ mm 孔径的 KD*P 普克尔盒, 它由激光脉冲触发火花隙控制高压脉冲开关。

三、输出特性

1. 运转参量

系统各级运转参数列于表 3。其总的输出能量为 2.5J-3J/20 ps, 相应的峰值功率为 10^{11} W。

Table 3 Operation parameters

parameters	OS	AM I	AM II	AM III	AM IV	AM V	AM VI
light beam size (cm ²)	0.20	0.28	0.50	3.14	3.14	7.07	12.6
gain β (cm ⁻¹)		0.17	0.12	0.028	0.038	0.032	0.039
input energy (mJ)		0.03	0.47	1.97	20.0	138	850
output energy (mJ)	0.07	0.47	5.40	20.0	199	850	2500
input energy density (mJ/cm ²)		0.11	0.95	0.63	6.40	19.5	67.5
output energy density (mJ/cm ²)	0.35	1.69	10.8	6.40	63.4	120	198.4
output power density (GW/cm ²)	0.03	0.08	0.54	0.33	3.17	6.00	9.92
B^*				0.40	2.70	3.60	4.00
pulsewidth (ps)	20	20	20	20	20	20	20

* $\sum B=10.7$

2. 远场能量分布

用尖劈法测量了终端输出激光的远场能量分布。测量中用的尖劈板反射率 $R=30\%$ ，透镜焦距为 $f=2\text{m}$ 。测量出当末级放大器输出激光能量为 2.5J、能量密度为 $0.2\text{J}/\text{cm}^2$ 时，在 0.3mrad 内占总能量的 80%，如图 9 所示。

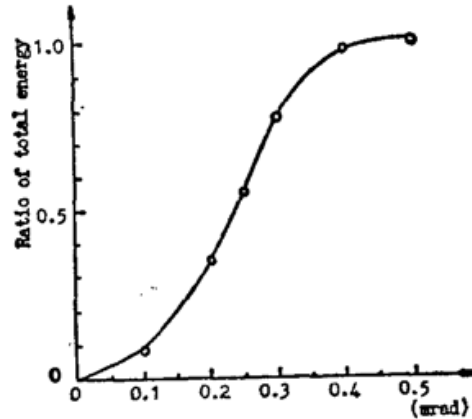


Fig. 9 Final amplifier output energy distribution vs divergence angle

四、结 论

利用对撞脉冲主-被动锁模 Nd:YAG 激光振荡器，已获得脉宽从 20 ps~2 ns 的分段可变宽度脉冲。这是迄今利用单台振荡器产生可变脉冲的最方便、最好的方法之一。实验已从该振荡器所产生的锁模脉冲序列中选取单脉冲并应用双程 YAG 放大技术，获得 5.4 mJ/20 ps、1 Hz 的脉冲，将此脉冲耦合到由钕玻璃激光放大器及空间滤波器组成的激光系统中，已实现 2.5 J/20 ps、光束发散角 $<0.3\text{mrad}$ 的激光输出。

预计，当系统运转在 1 ns 脉冲宽度时，可输出 30 J/1 ns。这是一台紧凑的、脉宽可变的新高功率钕玻璃器件，它将为 X 射线激光及激光等离子体相互作用的研究提供新的工具。

作者感谢中国科学院上海光学精密机械研究所莽燕萍同志提供的单脉冲开关，感谢竺庆春同志在激光脉宽测量上的帮助。

参 考 文 献

- [1] 王世杰等;《中国激光》, 1989, **16**, No. 8 (Aug), 489~492.
- [2] H. Vanherzeeb *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 20 (Oct), 3484~3486.
- [3] Lin Lihuang *et al.*; *Chinese Phys. Lett.*, 1986, **3**, No. 7, 329~332.
- [4] 李士英等;《光学学报》, 1981, **1**, No. 5 (Sep), 451~455.
- [5] H. Peter Kortz; *IEEE J. Quant Electron.*, 1983, **QE-19**, No. 4 (Apr), 578~584.
- [6] L. M. Frantz *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**, 2346.
- [8] 陈时胜等;《光学学报》, 1983, **3**, No. 3 (May), 259~264.
- [8] V. I. Beapalov *et al.*; *J. E. T. P. Lett.*, 1966, **3**, 307.

A high power Nd:glass laser with output of 2.5J/20 ps

XU ZHIZHAN, CHEN SHISHENG, OUYANG BIN, LU HAIHE, LIN LIHUANG, LI SHIYING
WANG SHIJIE, FAN LIMING, ZHANG ZHENGQUAN, ZHU GUOYING AND PENG HUI

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 8 March 1991; revised 7 May 1991)

Abstract

A high power silicate Nd: glass laser with output of 2.5J/20 ps, and beam divergency of 0.3mrad covering 80% of total output energy is developed. This system can generate variable pulse duration of 20ps-2ns.

Key words: high power laser, ultrashort pulse amplification, spatial filter.