

## (Nd, Tb, Ce):YAG 晶体的激光特性

翟清永 应佐庆 黄永忠 张生秀 肖宗朝

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

**摘要:** (Nd, Tb, Ce):YAG 晶体是我们最近研制的一种新激光晶体。本文将给出在风冷条件下, (Nd, Tb, Ce):YAG 和常用的 Nd:YAG 及 (Nd, Ce):YAG 在不同重复频率下的激光输出, 束散角和光束质量因子的测试结果。对比这些结果, 可以看到 (Nd, Tb, Ce):YAG 晶体的效率不低于 (Nd, Ce):YAG, 而在热畸变和热稳定性方面, 明显优于 Nd:YAG 和 (Nd, Ce):YAG。

**关键词:** 激光晶体 热效应

### Laser output properties of (Nd, Tb, Ce):YAG crystal

Zhai Qingyong, Ying Zuoqing, Huang Yongzhong

Zhang Shengxiu, Xiao Zongchao

(Southwest Institute of Technical Physics)

**Abstract:** (Nd, Tb, Ce):YAG crystal is a new laser material developed recently. In this paper, the comparison research on the laser output properties, for example laser output energy, beam divergence angle and beam quality factor  $M^2$ , with other laser crystals, such as present Nd:YAG and (Nd, Ce):YAG crystal, is reported. The experimental results show that the pulsed laser effectiveness of (Nd, Tb, Ce):YAG crystal may not be lower than other crystal's, but the thermal distortion and the thermal stability of (Nd, Tb, Ce):YAG crystal are obviously better than other crystal's, under the condition of blowing cooling. The crystal can be used in high repetition frequency laser.

**Key words:** laser crystal thermal effect

### 一、引言

众所周知, 在 Nd:YAG 中掺入  $\text{Cr}^{3+}$ <sup>[1]</sup> 或  $\text{Ce}^{3+}$ <sup>[2-5]</sup>, 利用它们到  $\text{Nd}^{3+}$  的能量转移来提高晶体的激光效率。但是, 由于敏化离子的半径与所置换离子的半径不同, 掺入后会破坏晶体的光学均匀性。国内的研究人员从提高掺杂离子在晶体横截面内分布的均匀性着手, 研制出了  $\text{Ce}^{3+}$  浓度较高, 而且光学均匀性良好的 (Nd, Ce):YAG 晶体<sup>[6,7]</sup>, 其脉冲激光效率比 Nd:YAG 提高了 70%。掺敏化离子的另一不利影响是可能增加晶体的热畸变效应和降低热稳定性。因为, 敏化离子增加了掺杂离子的无辐射弛豫<sup>[8]</sup> 和可能导致某些瞬时色心的形成或增加已有瞬时色心的吸收<sup>[5,9]</sup>。(Nd, Ce):YAG 晶体虽然可满足风冷和较低重复频率脉冲操作的使用要求, 但我们很快发现随着重复频率的提高, 不仅其激光输出有所下降, 更突出的是束散角迅速加大, 而且模式分布变差。特别是重复频率高于 20pps 后, 变化更为严重。我们认为, 这些现象是热畸变效应和热稳定性变差所致。显然, 这会严重影响使用效果, 从而限制了 (Nd, Ce):YAG 的应用范围。

研制效率高而热效应低的激光晶体或者设法尽可能保持 (Nd, Ce):YAG 的优点而降低其

热畸变效应是一有意义的课题。我们在(Nd, Ce):YAG 中掺入  $Tb^{3+}$ , 研制出了热畸变效应和热稳定性明显优于(Nd, Ce):YAG 和 Nd:YAG, 而效率和阈值与常用(Nd, Ce):YAG 相当的(Nd, Tb, Ce):YAG 晶体<sup>[10]</sup>。在文献[10]中, 我们给出了简单的热焦距对比测试和用微孔扫描法测出的激光能量分布曲线, 初步证实了(Nd, Tb, Ce):YAG 晶体的热畸变效应低于(Nd, Ce):YAG。本文将给出(Nd, Tb, Ce):YAG 和常用的(Nd, Ce):YAG 及 Nd:YAG 三种晶体在风冷条件下的重复频率激光输出、束散角、光束质量因子和能量分布情况的测试结果。这些结果进一步证实了(Nd, Tb, Ce):YAG 晶体在热稳定性和热畸变方面明显优于另两种晶体。所用重复频率为 5pps, 10pps, 20pps 和 30pps。

## 二、实 验

### 1. 测试样品

实验用的 Nd:YAG, (Nd, Ce):YAG 及(Nd, Tb, Ce):YAG 晶体, 都是用石墨加热引上法生长的。坩埚为钼片冲压坩, 其尺寸为  $\varnothing 80\text{mm} \times 40\text{mm}$ 。Nd:YAG 与(Nd, Ce):YAG 的熔体组份为常用组份。(Nd, Tb, Ce):YAG 晶体的熔体组份按  $Y_{3-x-y-z}Nd_xTb_yCe_zAl_5O_{12}$  配制, 其中 X 与 Nd:YAG 和(Nd, Ce):YAG 相同, 而 Y 和 Z 则在相当宽的范围内改变, 从而可生长出 Nd 浓度与常用 Nd:YAG 和(Nd, Ce):YAG 基本相同, 而 Tb 与 Ce 浓度不同的各种(Nd, Tb, Ce):YAG 晶体。生长过程如文献[10]所述。为保证 Tb 和 Ce 离子的三价态, 保护气氛是还原性的。但需适当控制其还原度以消除  $Al_2O_3$  分解导致的晶体散射颗粒。生长成的晶体经退火处理后加工成  $\varnothing 5\text{mm} \times 80\text{mm}$  激光棒。棒的两端镀有  $1.06\mu\text{m}$  增透膜。

### 2. 激光性能的测试

如前所述, 在脉冲操作下, 晶体的热畸变效应影响激光的光束质量, 如束散角和能量的模式分布等。对光束质量的评定, 目前广泛采纳的先进方法是引进  $M^2$  因子概念, 通过  $M^2$  因子的测量来对比光束质量的优劣, 从而可对比激光晶体的热畸变效应的强弱。 $M^2$  因子的定义为实际光束束腰处与基模高斯光束各自的空间——束宽积之比。因此,  $M^2$  因子反映了实际光束与高斯光束的差异,  $M^2$  愈大则实际光束与高斯光束的差异愈大。而混合模光束质量因子( $M^2$ )、光斑半径和束散角都是激光振幅分布的统计效果。对平-平腔而言, 由实际光束的传播规律可得<sup>[11]</sup>

$$w(Z_j) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{M^2 \lambda Z_j}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad j = 1, 2 \quad (1)$$

式中  $w_z$  为距束腰为  $Z_j$  的垂直于光轴的平面上的光斑半径,  $\lambda$  为波长,  $w_0$  为实际激光束的束腰半径。如测出距束腰为  $Z_1$  和  $Z_2$  处的光斑半径  $w(Z_1)$  和  $w(Z_2)$ , 则可得到

$$w_0^2 = \frac{Z_2^2 w(Z_1)^2 - Z_1^2 w(Z_2)^2}{Z_2^2 - Z_1^2} \quad (2)$$

$$M^4 = \frac{\pi^2 [w^2(Z_2) - w^2(Z_1)] [Z_2^2 w^2(Z_1) - Z_1^2 w^2(Z_2)]}{\lambda^2 (Z_2^2 - Z_1^2)^2} \quad (3)$$

实际光束的束散角为

$$\theta = M^2 \lambda / \pi w_0 \quad (4)$$

我们所用测试装置如图 1 所示。该装置的前半部分是一般的脉冲激光测试系统, 而后半

部分的图象采集和处理是由北京光电所激光参量测试中心研制的 LBA 型激光光束分析仪完成。聚光腔是风冷的, 所用重复频率为 5pps, 10pps, 20pps 和 30pps。利用上述装置, 可在传输方向上的任意两点测出输出能量并同时采集光斑图象。经微机处理后可以给出各点光斑的能量分布图, 光斑长短轴上的能量分布曲线和光斑的等效半径。然后利用(3)式和(4)式算出光束的  $M^2$  和束散角  $\theta$ 。

### 三、结果和讨论

附表给出的是前述装置测出的常用 Nd:YAG, (Nd, Ce):YAG 及不同组份或炉次的 (Nd, Tb, Ce):YAG 晶体的脉冲激光输出能量、光束质量因子  $M^2$  及束散角。测试是在风冷条件下进行的。聚光腔是单灯玻璃镀银腔。输入能量均为 10J。由表中数据可见, 在低重复频率(5~10pps)时, 大部分 (Nd, Tb, Ce):YAG 样品的效率接近或超过常用 (Nd, Ce):YAG 晶体。仅有个别样品的效率与常用 Nd:YAG 晶体相近。但在高重复频率(20~30pps)时, 绝大部分 (Nd, Tb, Ce):YAG 样品的效率超过 (Nd, Ce):YAG。而所有 (Nd, Tb, Ce):YAG 样品的效率均远超过 Nd:YAG。在重复频率为 5pps 时, 绝大部分 (Nd, Tb, Ce):YAG 晶体的光束质量因子  $M^2$  值均优于 (Nd, Ce):YAG 和 Nd:YAG 晶体。而在重复频率高于 10pps 后, 所有 (Nd, Tb, Ce):YAG 晶体的光束质量因子更加优于另两种晶体。束散角的测量结果也有相同的规律。总之, 从表 1 的结果可以看到, 在各个重复频率下, (Nd, Tb, Ce):YAG 晶体的输出能量、 $M^2$  值和束散角均优于另两种晶体, 而 (Nd, Tb, Ce):YAG 晶体的输出能量、 $M^2$  值和束散角随重复频率的变化速度也明显低于另两种晶体的变化速度。

Table Pulsed laser properties of (Nd, Tb, Ce):YAG, (Nd, Ce):YAG and Nd:YAG crystals in blowing cooling condition

sample	5pps			10pps		
	out. energy (mJ)	$M^2$	div. angle (mrad)	out. energy (mJ)	$M^2$	div. angle (mrad)
(Nd, Ce):YAG 1	332	10.2	1.56	337	14.6	2.18
(Nd, Ce):YAG 2	328	12.5	1.82	341	15.8	2.37
Nd:YAG	213	12.3	1.76	233	18.1	2.62
(Nd, Tb, Ce):YAG 1*	342	10.5	1.46	349	12.0	1.71
(Nd, Tb, Ce):YAG 2	318	11.5	1.64	326	12.7	1.87
(Nd, Tb, Ce):YAG 3	317	8.6	1.21	313	10.6	1.52
(Nd, Tb, Ce):YAG 4	345	11.4	1.64	344	13.5	1.82
(Nd, Tb, Ce):YAG 5	332	9.9	1.45	333	11.6	1.66
(Nd, Tb, Ce):YAG 6	264	7.2	1.04	266	11.2	1.63

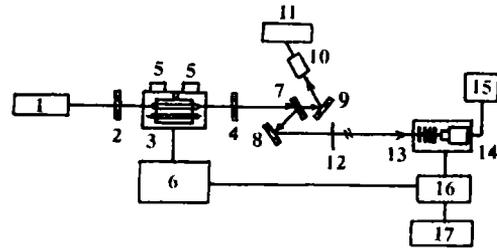


Fig. 1 Schematic diagram of the beam characteristics testing set and its optical path

1 - He-Ne laser 2 - 1.06 $\mu$ m totally reflecting mirror 3 - laser pump cavity 4 - output mirror 5 - 400Hz blower 6 - laser power source 7, 8 - wedge mirror 9 - 1.06 $\mu$ m totally reflecting mirror 10 - energy-meter probe 11 - energy-meter display 12 - locating block 13 - neutral attenuator 14 - planar array CCD camera 15 - monitor 16 - imageprocessor 17 - microcomputer

(Nd, Tb, Ce):YAG 7	314	7.9	1.03	297	12.9	1.74
(Nd, Tb, Ce):YAG 8	242	7.0	1.01	249	9.7	1.43
(Nd, Tb, Ce):YAG 9	212	8.7	1.28	221	9.7	1.53
(Nd, Tb, Ce):YAG 10	319	5.9	0.86	323	10.2	1.55
(Nd, Tb, Ce):YAG 11	354	5.5	0.79	344	8.8	1.32
(Nd, Tb, Ce):YAG 12	294	7.5	1.08	280	8.2	1.22
(Nd, Tb, Ce):YAG 13	315	7.5	1.11	313	9.7	1.43
(Nd, Tb, Ce):YAG 14	297	10.1	1.52	303	10.5	1.50
(Nd, Tb, Ce):YAG 15	262	8.6	1.15	259	9.9	1.27
(Nd, Tb, Ce):YAG 16	325	7.8	1.14	329	8.9	1.23

sample	20pps			30pps		
	out. energy (mJ)	$M^2$	div. angle (mrad)	out. energy (mJ)	$M^2$	div. angle (mrad)
(Nd, Ce):YAG 1	278	15.4	2.54	207	29.7	4.11
(Nd, Ce):YAG 2	268	17.8	2.58	166	20.7	3.98
Nd:YAG	164	16.5	3.06	116	18.2	3.61
(Nd, Tb, Ce):YAG 1*	332	13.4	1.95	291	13.8	2.01
(Nd, Tb, Ce):YAG 2	302	13.2	2.03	256	13.5	2.19
(Nd, Tb, Ce):YAG 3	301	12.4	1.79	252	12.1	1.88
(Nd, Tb, Ce):YAG 4	343	13.1	1.89	259	13.5	2.08
(Nd, Tb, Ce):YAG 5	317	13.1	1.80	287	13.8	2.04
(Nd, Tb, Ce):YAG 6	248	13.1	1.91	210	13.0	1.91
(Nd, Tb, Ce):YAG 7	283	13.4	1.90	245	14.2	2.16
(Nd, Tb, Ce):YAG 8	248	10.5	1.55	221	11.9	1.78
(Nd, Tb, Ce):YAG 9	204	11.8	1.79	158	12.7	1.95
(Nd, Tb, Ce):YAG 10	324	11.1	1.62	258	12.0	1.98
(Nd, Tb, Ce):YAG 11	306	9.3	1.41	266	10.2	1.62
(Nd, Tb, Ce):YAG 12	263	10.1	1.31	219	13.1	1.90
(Nd, Tb, Ce):YAG 13	295	9.9	1.49	238	12.5	2.14
(Nd, Tb, Ce):YAG 14	289	11.0	1.72	258	12.1	1.88
(Nd, Tb, Ce):YAG 15	221	10.9	1.54	148	11.1	1.58
(Nd, Tb, Ce):YAG 16	316	10.3	1.43	277	10.5	1.47

\* The numbers mean different compositions or grown runs

图2是光束分析仪给出的三种晶体的近场和远场光斑的能量分布。图3是沿光斑的长、短轴方向(见该图左上角光斑图中的交叉线)的能量分布曲线。由图2和图3可以明显看出,即使在低重复频率时,Nd:YAG和(Nd,Ce):YAG的光束中高阶模式也是非常显著的。而(Nd,Tb,Ce):YAG晶体的光束中,基模成分明显高于另两种晶体的基模成分。三种晶体的

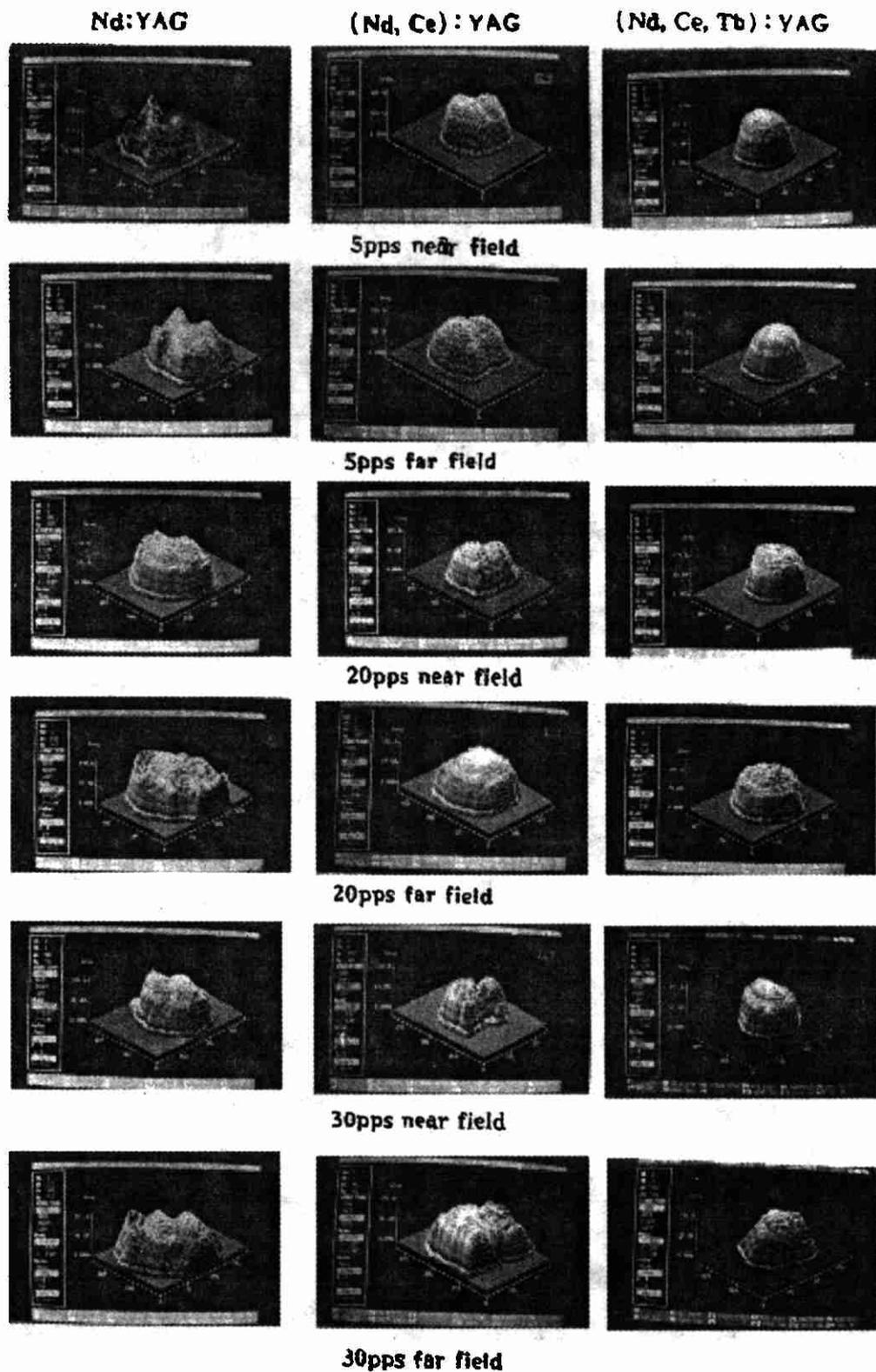


Fig. 2 Diagrams of energy distribution of beam spots at various repetition frequencies

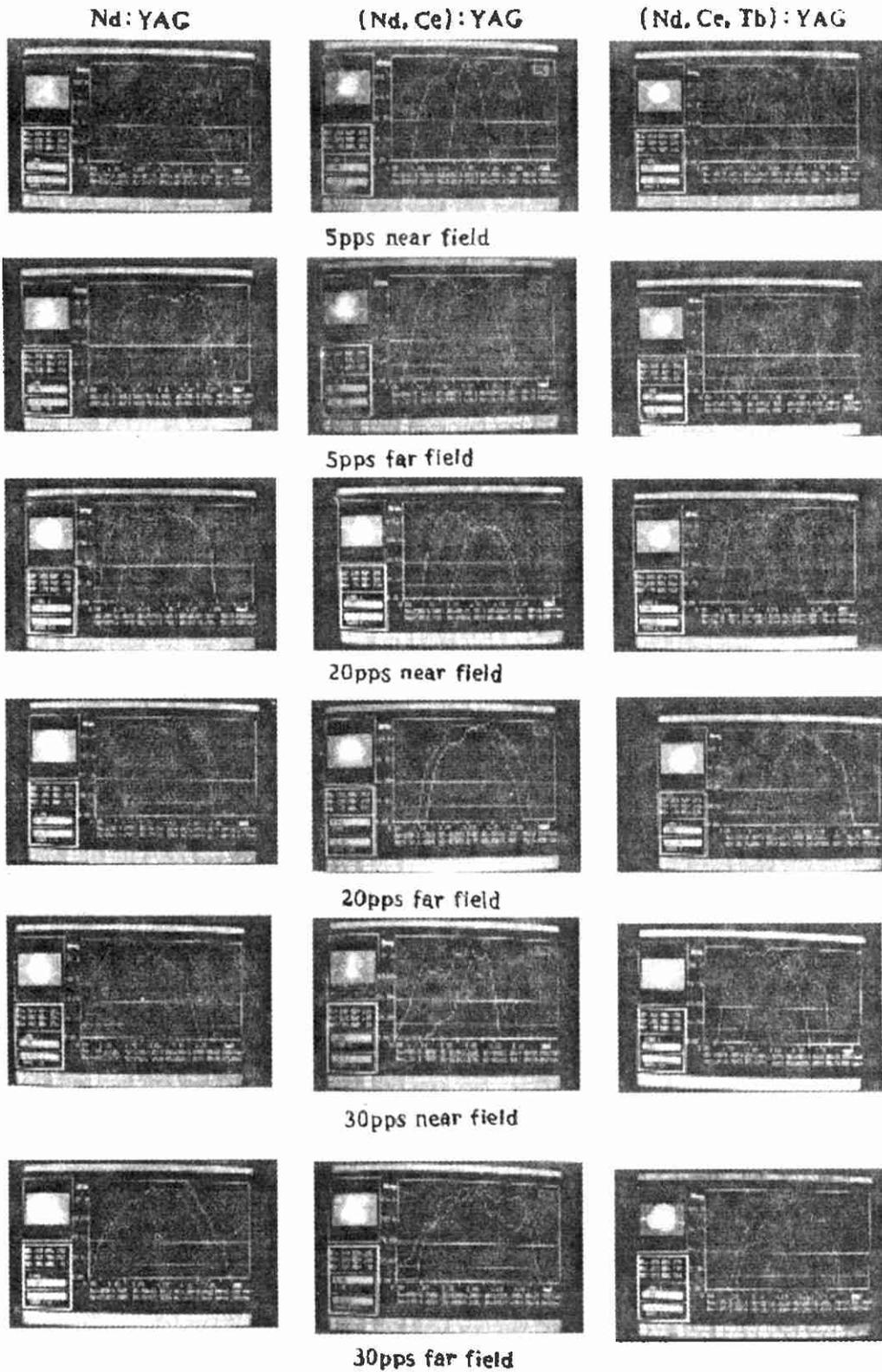


Fig.3 The energy distribution curves of the spots in X and Y direction

模式分布均随重复频率的增加而变差,但(Nd, Tb, Ce):YAG晶体的变化速度明显低于另两种晶体。

我们在进行样品的每种测试时,都是将装置调到最佳状态。因此,在同一重复频率下,三种晶体的  $M^2$  值,光束的能量分布和束散角的差异应归因于热畸变效应的强弱不同,而各种晶体的输出能量、 $M^2$  值、束散角和能量分布随重复频率的变化速度则可说明各晶体的热稳定性的差异。从表1、图2和图3给出的实验结果说明(Nd, Tb, Ce):YAG晶体在脉冲激光效率、模式分布、热畸变和热稳定性等方面均优于(Nd, Ce):YAG和Nd:YAG。它更适于高重复频率脉冲激光器和选模激光器使用。

热畸变效应和热稳定性的强弱与无辐射弛豫<sup>[8]</sup>及瞬时色心的吸收<sup>[5,9]</sup>等“热源”有关,也与晶体的热胀系数、导热系数及折射率的温度系数等参数有关<sup>[12]</sup>。本文的实验表明在(Nd, Ce):YAG中掺入  $Tb^{3+}$  可以改善热畸变效应,提高其热稳定性,但其作用机理究竟是改善了折射率的温度系数等参数,还是抑制了瞬时色心的吸收,减少了“热源”,目前尚不清楚,有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 Blass G. J Chem Phys, 1967;47:1290
- 2 Holloway W W, Kestigian M. J O S A, 1969; 59:60
- 3 Ковалева Н С, Иванов Б Г, Прик Ж. Спект, 1977;27:546
- 4 Mares J A. Czech J Phys, 1985; B35:833 1986; B:36:1079 Rev Phys Appl, 1987;22:145
- 5 Kvapil J, Kvapil Jos, Kubelka J *et al.* Czech J Phys, 1984, B34:581
- 6 翟清水,张思远,梁泽荣 *et al.* 中华人民共和国专利, 88 1 02651. 4. 公开号 CN 1030798A. 1988
- 7 孙洪健,张思远,梁泽荣 *et al.* 人工晶体学报, 1989;18:287
- 8 Shokin A A. Кван Элект, 1974;1:423 Kovaleva N S, Kotelnikova V G, Ivanov A O *et al.* Кван Элект, 1981;8:1045 1981;8:2433
- 9 曹余惠. 激光与红外, 1994;24:8
- 10 翟清水,应佐庆,孙洪建 *et al.* 中华人民共和国专利, Z1. 93 121298. 7. 公开号 CN 1088635A
- 11 孙小卫,史红民,杨杰 *et al.* 中国激光, 1994;21(2):96
- 12 杨臣华,梅遂生,林钧键. 激光与红外技术手册. 北京:国防工业出版社, 1990

作者简介:翟清水,男,1935年5月出生。研究员。主要从事激光材料方面的研究工作。

收稿日期:1995-07-20

·产品简讯·

## 激光光斑跟踪器

加拿大 Merchantek Electro Optics 公司推出一种由 PC 机控制的光斑跟踪器,监控 CW 光束位置和漂移,重频为 10Hz,波长为可见光至  $1\mu\text{m}$  的近红外区。当仪器超量程时,可自动报警。该仪器包括软件包,可用于光束定位,监控功率起伏。

丁育明,巩马理 供稿