

# 倍频 YAG 泵浦脉冲钛宝石激光器 设计与激光运转

孙 旻 张 强 乔景文 张光明 李成富 李仲伢 邓佩珍  
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

## 提 要

用 10 ns 倍频 YAG 激光泵浦实现了  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  激光运转, 最大输出能量可达 37 mJ, 能量转换效率 40%, 斜率效率 59%, 量子效率 80%, 泵浦阈值  $0.5\sim 1.2 J/cm^2$ , 在 662~938 nm 波长范围内实现了连续调谐。

关键词  $Ti^{3+}:Al_2O_3$ , 脉冲激光器。

## 1 引 言

掺钛蓝宝石晶体的开发和应用是近年来固体激光领域中最引人瞩目的成就之一。由于钛宝石具有优良的力学、热学、光学性质和化学稳定性, 而且它是迄今为止所发现的在室温下工作的具有最宽调谐范围的激光晶体, 人们期望它有朝一日能够取代染料激光器, 在频率转换后成为能在整个可见光区连续调谐的商品激光器。另一方面, 在空间物理和大气探测等领域中, 人们一直试图找到一种性能可靠, 经久耐用, 结构紧凑的激光系统作为可靠的光源, 钛宝石激光器的出现使这种全固化激光系统的设想有了实现的可能。

由于钛宝石激光器的这些显著的优点和诱人的应用前景, 所以从它一出现就受到各国科学家的广泛关注。自从 1982 年 Moulton<sup>[1]</sup> 报道了第一台  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  激光器运转成功之后, 近年来钛宝石激光器的研究一直是固体激光领域里的热门课题。在各国工作者的努力下, 激光输出效率已由开始时的百分之几增大到 50% 左右<sup>[2]</sup>, 输出能量也由当时的每脉冲几毫焦耳增到几百毫焦耳<sup>[3]</sup>, 调谐范围已扩展到 660~1100 nm<sup>[4]</sup>, 连续波和灯泵激光器也都已实现运转<sup>[5,6]</sup>。我国对钛宝石激光的研究始于八十年代中期, 经过多年的努力, 晶体质量已有了显著的提高。激光方面的工作由于起步较晚, 国内做得还不多, 尤其在灯泵和连续激光运转方面还有很多工作要做。

本文报道了同轴泵浦钛宝石脉冲激光器的实验结果, 并讨论了谐振腔结构、晶体掺杂浓度和退火处理对激光输出的影响。

## 2 晶体的选择和谐振腔设计

### 2.1 泵浦形式的确定和光路设计

采用本所生长的掺钛宝石<sup>[8]</sup>进行激光实验。掺钛浓度可以从 0~0.23 wt% 连续调节,

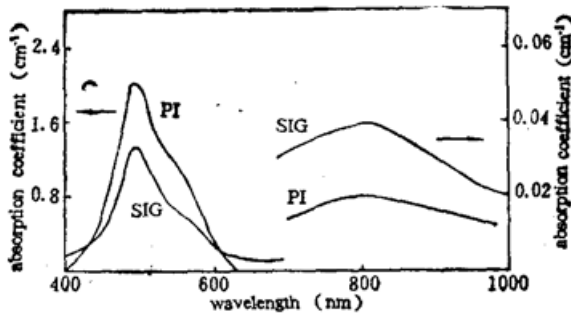


Fig. 1 Polarized measurement of pump absorption band and infrared absorption band in  $Ti:Al_2O_3$

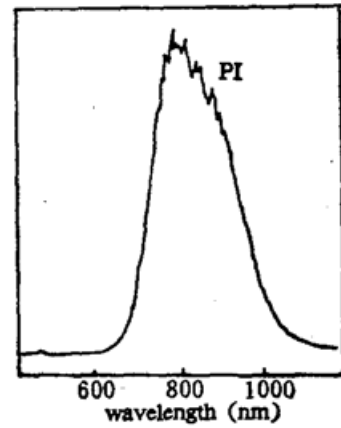


Fig. 2  $Ti:Al_2O_3$  fluorescence spectra

以满足不同的激光器设计的需要。图 1 和图 2 给出了  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  的吸收光谱和发射光谱。它的吸收峰在 490 nm 处, 选用的 532 nm YAG 倍频光处于吸收现峰的肩上, 是现有激光器中较为合适的泵浦光源。采用端面同轴泵浦的形式, 以使泵浦光有较高的利用率, 为此对后腔片进行了特殊加工, 镀膜要求同时满足在 770 nm 全反, 在 532 nm 高透。

### 2.2 晶体的选择和加工

由吸收光谱可知,  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  晶体在它的输出波长 ( $\sim 800$  nm) 处有一个残余吸收带。这将会严重影响激光输出。本文把晶体的泵浦吸收系数和残余吸收系数的比值定义为晶体的品质因数(或优值)  $FOM = \frac{\alpha_{490}}{\alpha_{800}}$ 。FOM 值是判别晶体激光质量的最重要的标准。把晶体毛坯沿平行  $c$  轴方向的两个端面进行研磨和机械抛光后, 测量其吸收光谱, 并由光谱曲线计算出其吸收系数、掺杂浓度和品质因数。从中选出浓度合适, FOM 值较高的晶体加工成激光体棒, 进行激光实验。

根据  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  的吸收光谱, 晶体在泵浦带吸收峰处对  $\pi$  偏振光 ( $E // c$ ) 的吸收率比  $\sigma$  光 ( $E \perp c$ ) 约大一倍, 而红外非激活吸收又比  $\sigma$  光小一倍。为使晶体工作状态的 FOM 值尽可能地大, 在实验中使泵浦光成为线偏振光。并且总是按照使泵浦光成为  $\pi$  光的原则来加工和放置晶体。为了减少反射损失, 把晶体的两个端面加工成布儒斯特面。

针对不同的浓度选取晶体加工长度, 使得泵浦光透射率为 10%~5%, 以保证晶体能得到最有效的利用。

### 2.3 谐振腔的设计

采用最简单的两镜腔形式。用了平平腔和平凹腔两种结构。根据激光一般原理, 实现激光振荡所需的阈值反转粒子数为:

$$\Delta N = n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1 = \frac{g}{\sigma} \tag{1}$$

而由阈值条件有:

$$gl = \alpha \tag{2}$$

因而泵浦阈值能量密度为:

$$E_{th} = \frac{\Delta N \cdot h\nu}{\eta_0} = \frac{g \cdot h\nu}{\sigma \cdot \eta_0} \tag{3}$$

式中  $g$  为增益系数,  $\sigma$  为受激发射截面,  $\alpha$  为腔内损耗,  $l$  为晶体长度,  $h\nu$  为泵浦光子能量. 对于两反射镜曲率半径为  $b_1, b_2$ , 腔长为  $d$  的谐振腔, 其光腰半径为  $w_0$  有:

$$w_0^4 = \left(\frac{2}{k}\right)^2 \frac{(b_1 - d)(b_2 - d)(b_1 + b_2 - d)d}{(b_1 + b_2 - 2d)^2}, \quad (4)$$

由于腔内有工作物质, 所以式中  $d = d_1 + \frac{d_2}{n} + d_3$ ,  $d_2, d_3$  分别是晶体两个端面到前后腔镜的距离,  $d_2$  为晶体长度,  $n$  为晶体折射率. 对平凹腔, 有  $b_1 \rightarrow \infty$ , 则(4)式简化为:

$$w_0^4 = \left(\frac{2}{k}\right)^2 (b_1 - d)d. \quad (5)$$

谐振腔的准直长度

$$2z_n = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda}. \quad (6)$$

腔的设计还需保证准直长度不小于晶体长度. 根据以上各式, 就可以选择适当的腔结构参数和泵浦透镜, 进行数值运算, 完成谐振腔的设计, 使激光输出达到最佳.

对于脉冲钛宝石这样的高增益介质激光器来说, 共焦腔或平行平面腔由于模体积大, 晶体能得到最充分的利用, 因此可以得到最大的输出. 另一方面, 激光器的转换效率只取决于泵浦光和激光腔模在工作物质内的耦合程度. 所以, 从提高激光效率的角度考虑, 应选择低衍射损耗的腔, 并使泵浦光和激光尽量匹配. 此外, 还需考虑泵浦功率密度是否合适, 晶体和腔片的损伤, 足够的振荡次数, 以及调整精度等因素, 特别是当激光输出能量较高时, 腔片或晶体的损伤成为严重的问题, 有时甚至是决定性的. 综合上述考虑, 选用了平行平面腔和平凹大曲率半径腔进行实验.

对平凹腔进行了腔结构计算, 结果列于表 1 中. 为便于比较, 假定两腔镜距离  $d$  不变, 晶体距全反镜距离也不变. 计算所用参数为  $b_1 = 400$ ,  $b_2 = \infty$ .

Table 1 Cavity parameter calculation

(mm)

| Crystal length |        | Cavity length |        | $W_0$  |        |
|----------------|--------|---------------|--------|--------|--------|
| $d=80$         | $d=50$ | $d=80$        | $d=50$ | $d=80$ | $d=50$ |
| 10             |        | 77            | 47     | 0.195  | 0.177  |
| 20             |        | 74            | 44     | 0.194  | 0.174  |
| 30             |        | 71            | 41     | 0.192  | 0.171  |

根据表内算得的光腰大小, 即可选择相应的泵浦透镜焦距和位置, 实现泵浦匹配.

实验中为防止晶体和后腔镜破坏, 总是使透镜处于离焦位置. 由计算可见, 对于大曲率半径腔, 当对不同的晶体进行实验时, 随着晶体长度增加, 若保持腔结构不变, 则腔长变短, 光腰变细, 此时应将透镜位置略放远些, 以保证泵浦光的匹配.

### 3 激光实验结果

#### 3.1 实验方法和光路安排

图 3 是光路示意图. 能量计 1 用来监测每个脉冲的泵浦能量, 能量计 2 测量钛宝石激

光输出。对平平腔采用长焦距透镜,焦点在晶体内;对平凹腔用短焦距透镜,焦点在腔外(输出镜后)。这样设计的目的是有两个:1)使泵浦匹配最好;2)尽量减少腔片及晶体损伤的可能性。考虑到调整精度和保证腔内一定的振荡次数,实验中用了短腔结构。

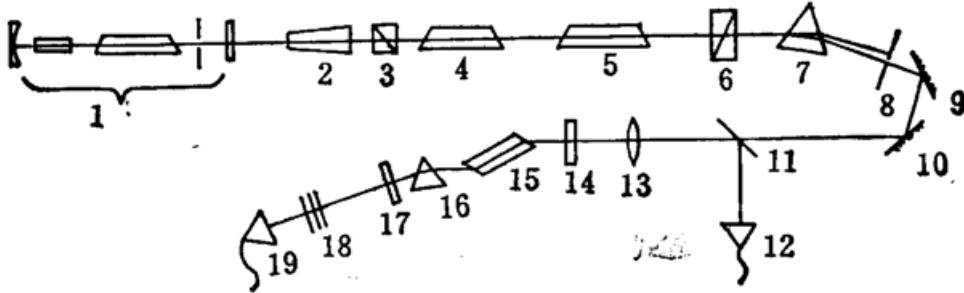


Fig. 3 Experimental setup of Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser

- |  |                            |                  |
|--|----------------------------|------------------|
| 1—YAG Oscillator                             | 2—Beam-expansion telescope | 3—Polarizer      |
| 4, 5—YAG amplifier                           | 6—KDP crystal              | 7—Prism          |
| 8—Aperture                                   | 9, 10—Mirror               | 11—Beam splitter |
| 12—Energy meter 1                            | 13—Pump lens               | 14—HR mirror     |
| 15—Ti:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> crystal | 16—Tune prism              | 17—Output mirror |
| 18—Filter                                    | 19—Energy meter 2          |                  |

Table 2 Experimentally determined properties of crystals with different titanium doping level

| Crystals | $\alpha_{532}$<br>(cm <sup>-1</sup> ) | [Ti <sup>3+</sup> ]<br>(wt.%) | Crystal<br>length<br>(mm) | Laser energy<br>threshold<br>(J/cm <sup>2</sup> ) | Slope<br>efficiency<br>(%) | Quantum<br>efficiency<br>(%) | Transmittivity<br>at 0.532 $\mu$ m<br>(%) |
|----------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|----------------------------|------------------------------|---|
| 1        | 1.15                                  | 0.096                         | 22                        | 0.89  | 49                         | 71                           | 7.7                                       |
| 2        | 0.52                                  | 0.044                         | 28.5                      | 1.12  | 23                         | 33                           | 22.5                                      |
| 3        | 2.22                                  | 0.178                         | 10                        | 0.6   | 51                         | 73                           | 10.2                                      |
| 4        | 1.47                                  | 0.122                         | 18.5                      | 0.66  | 55                         | 79                           | 6.6                                       |
| 5        | 1.49                                  | 0.122                         | 18                        | 0.82  | 43.5                       | 63                           | 7.1                                       |
| 6        | 0.85                                  | 0.068                         | 29                        | 0.84  | 13                         | 19                           | 8.6                                       |

### 3.2 斜率效率和量子效率, 腔内损耗

几块样品的测量结果列在表2中。实验条件为平平腔,腔长50 mm,输出镜透射率50%。表中2#晶体的长度比脉冲激光所要求的长度短了1/3,所以转换效率低,阈值高。6#晶体散射颗粒多,FOM值低,因而晶体的热吸收增大,量子效率降低。从表中还可得知,激光效率与掺杂浓度之间并无直接联系,这是因为脉冲激光器的峰值功率高,增益大,因此对晶体和谐振腔的要求不象连续激光那样严格。

图4是5#晶体的激光效率曲线。为了便于比较,在腔结构不变的条件下,对三种不同输出耦合的情况进行了测量。腔长为80 mm,为大曲率半径平凹腔,全反镜曲率半径为400 mm。由图中可见,当输出镜的透射率由40%增到60%时,激光输出的阈值提高,斜率效率增大,总体效率也呈增大的趋势。

最高的斜率效率是59%,为透射率60%的平凹腔中得到,最大总体效率为40%。最大脉冲输出能量为37 mJ,是在60%输出镜耦合的平平腔中得到的。更高的能量输出受限于泵浦光能量的进一步提高和腔片破坏。

根据图 4 的曲线可以算出腔内量子效率  $\eta_0 = 63\%$ , 腔内单程损耗为 5%, 由此计算得到晶体的 FOM 值大于 70.

### 3.3 阈值和增益饱和

图 4 中的曲线线性部分延长线与横坐标的交点即为激光振荡阈值. 并把饱和光强定义为效率曲线拐点处的入射泵浦光能量. 计算结果列于表 3 中.

显而易见, 激光器正常工作时的泵浦能量应在阈值之上, 饱和能量之下. 由表 2 中数据可以推测, 对这种结构的激光器来说, 最佳泵浦能量密度约为  $1 \sim 4 \text{ J/cm}^2$ . 当输出镜的透射率增大时, 斜率效率一开始是增加的, 泵浦能量的线性范围也增大, 于激光运转是有利的. 但透射率增大到一定程度时, 腔内透射损耗增加, 又使得激光效率下降. 由图 4 和表 3 的数据可以推测, 对上面的谐振腔结构和晶体, 最佳输出镜透射率耦合在  $50\% \sim 60\%$  之间.

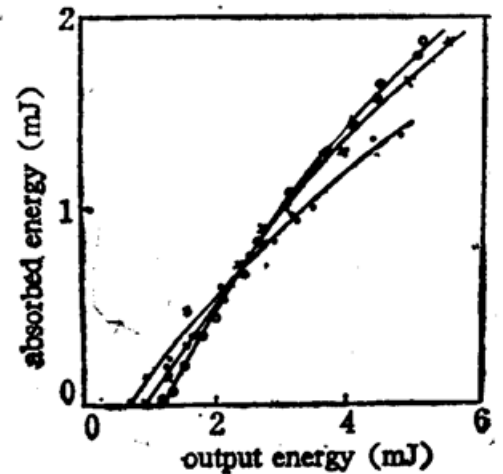


Fig. 4 Laser efficiency curve with different output mirror coupling  
●—40%T, ×—50%T, ○—60%T

Table 3 Experimentally determined laser parameters of crystal 5 with different output mirror coupling

| Output mirror transmittivity (%) | $E_{th}$ ( $\text{J/cm}^2$ ) | $E_{sat}$ ( $\text{J/cm}^2$ ) | Slope efficiency (%) |
|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 40                               | 0.65                         | 3.1                           | 41                   |
| 50                               | 0.82                         | 3.55                          | 47                   |
| 60                               | 1.02                         | 3.7                           | 51                   |

掺钛蓝宝石的表面损伤阈值一般为  $8 \sim 10 \text{ J/cm}^2$ , 由表中可知饱和光强低于损伤阈值  $2 \sim 3$  倍. 表明钛宝石激光器在正确操作下不会造成晶体损伤. 但在调节过程中需避免过高能量的泵浦脉冲入射, 尤其在重复频率使用的情况下更须谨慎.

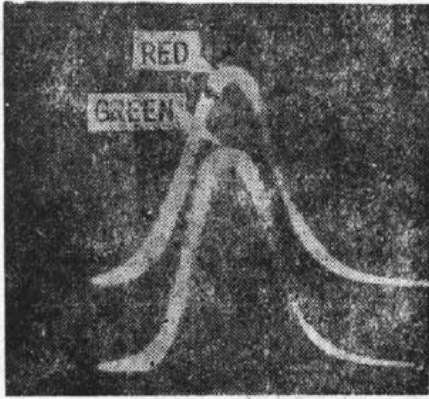
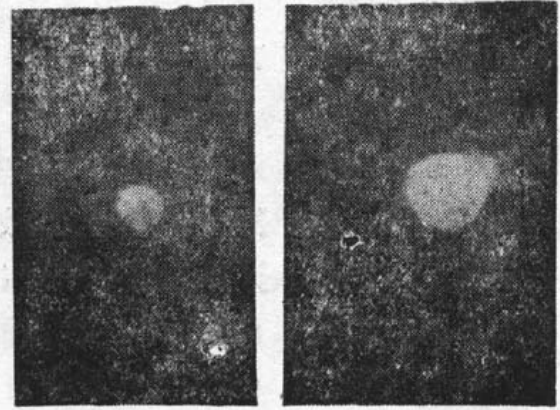
### 3.4 激光波形和远场图样

用存储示波器拍摄输出激光波形. 照片示于图 5 中. 激光输出脉宽和泵浦光相同, 为  $10 \text{ ns}$ . 可见钛宝石激光与泵浦光位相间并无明显差别. 限于时间和条件, 实验中没有观察到钛激光的时间延迟, 而这种延迟肯定存在, 并且与腔结构、泵浦能量密度以及晶体质量有密切关系.

图 6 是在距输出镜  $1.7 \text{ m}$  处和  $4 \text{ m}$  处拍摄的激光光斑图样. 据此得到光束发散角为  $1.22 \text{ mrad}$ . 而根据谐振腔结构算得的  $\text{TEM}_{00}$  模的远场发散角为  $1.19 \text{ mrad}$ . 实验测量结果和理论值非常接近. 由此可推知激光输出为均匀的  $\text{TEM}_{00}$  模.

### 3.5 输出线宽和波长调谐

用单色仪测量了激光输出波长, 在不加调谐元件时中心波长为  $766 \text{ nm}$ , 线宽为  $20 \text{ nm}$ . 用棱镜调谐得到  $662 \sim 938 \text{ nm}$  激光输出, 线宽为  $9 \text{ nm}$ . 用干涉滤光片调谐得到  $667 \sim 847 \text{ nm}$  输出, 线宽为  $0.4 \text{ nm}$ . 调谐截止于干涉滤光片在大于  $850 \text{ nm}$  的强吸收.

Fig. 5 Output Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser pulseFig. 6 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser output pattern

### 3.6 退火效应

晶体在还原气氛下加热到近 2000°C 进行退火处理, 可使晶体中发生  $Ti^{4+} \rightarrow Ti^{3+}$  反应。

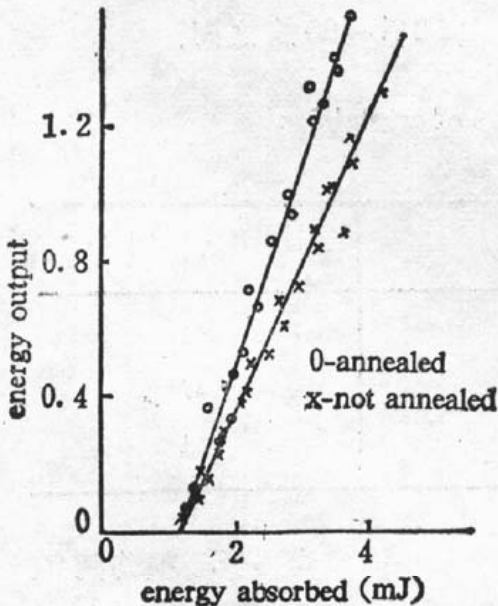


Fig. 7 Laser efficiency curve of annealed and as-grown crystals

而钛宝石晶体中起激活作用的主要是  $Ti^{3+}$  离子,  $Ti^{4+}$  离子对激光无贡献, 反而会增加晶体的非激活吸收. 因此退火能使晶体的 FOM 值增加, 阈值降低, 激光效率提高. 图 7 是对同一块毛坯切下的两块晶体加工成相同尺寸进行的比较实验结果, 其中一块经过退火处理, 另一块未经退火. 测量得到退火和未退火晶体的 FOM 值分别为 130 和 40, 提高了三倍多. 图 7 表明晶体退火后, 斜率效率由 44% 增至 59%. 在这里没有得到退火后阈值降低的结果, 估计可能是因为用的是透射率为 50% 的输出耦合镜, 输出损耗比吸收损耗大得多, 因而吸收损耗的有限减少在实验曲线上反映不出来.

从上面的实验结果可以看出, 退火可以使晶体的质量得到很大改善. 在脉冲泵浦实验中, 由于泵浦光的峰值功率高, 对晶体和腔的要求并不很高. 但在连续波激光器中, 这个问题就会变得很突出.

郭聚平、王晓蓉同志也参加了部分实验工作, 作者谨向他们表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] P. F. Moulton, *Opt. News*, 1982, 8 (6): 9
- [2] W. R. Raopert, C. P. Khatlak, *Appl. Opt.*, 1988, 27 (13): 2677
- [3] G. A. Rines, P. F. Moulton, *Opt. Lett.*, 1990, 15 (8): 434
- [4] A. I. Ferguson, *Opt. Lett.*, 1990, 15 (7): 375
- [5] P. Albers, *J. O. S. A. (B)*, 1986, 3 (1): 125
- [6] L. Esterowitz, P. Lacovara, R. Allen, *Springer Verlag*, 1984, 51: 74
- [7] 吴路生等. 中国激光, 1989, 16 (1): 3
- [8] 颜声辉等. 人工晶体学报,

## Design and operation of a pulsed $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ laser pumped by a frequency-doubled Nd:YAG laser

SUN YANG    ZHANG QIANG    QIAO JINGWEN    ZHANG GUANGMING    LI CHENGFU  
LI ZHONGYA    DENG PEIZHEN

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

(Received 4 December 1991; revised 16 March 1992)

### Abstract

A pulsed  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  laser has been operated by using a 10 ns frequency-doubled Nd:YAG laser as pump source. The maximum output energy of 37 mJ, energy-transformation efficiency of 40%, slope efficiency of 40%, quantum efficiency of 80%, and the pump threshold about  $0.5\sim 1.2\text{ J/cm}^2$  are obtained from this system. The output wavelength can be tuned within the range of 662~938 nm.

**Key words**  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ , pulsed laser.