

# 连续可调谐钛宝石激光器的实验研究

刘玉璞·张影华 陆培华

(中国科学院上海光机所激光技术开放研究实验室, 上海 201800)

**提要** 本文讨论了氩离子激光泵浦的连续可调谐钛宝石激光器的物理设计, 给出了激光器结构参数和实验结果, 泵浦阈值  $< 1$  W, 输出功率达 1.35 W, 总体效率为 15%, 调谐范围 715~880 nm。

**关键词** 连续钛宝石激光器, 纵向泵浦, 像散补偿腔

## Experimental study of CW tunable Ti-sapphire laser

*Liu Yupu, Zhang Yinghua, Lu Peihua*

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

**Abstract** The design consideration of CW tunable Ti-sapphire laser is discussed. The construction parameters and some experimental results are presented. The pumping threshold is of less than 1 W. The output power is up to 1.35 W with an efficiency of 15% and a tuning range of 715~880 nm.

**Key words** CW Ti-sapphire laser, longitudinal pumping, astigmatically compensated cavity, tunable

## 1 引 言

由于许多科学和工程应用的需要, 近几年来, 可调谐固体激光器受到普遍的关注<sup>[1]</sup>, 其中掺钛宝石激光器因其高输出、宽调谐、使用方便和运转可靠等优点, 是当前公认的可见~近红外波段最好的可调谐激光器。近几年来, 在晶体材料、脉冲和连续激光器研究中都取得了很大的进展。我们在 1992 年报道了连续钛宝石激光器运转<sup>[2]</sup>。在输出功率和调谐性能等方面现在又取得了一些新结果。

## 2 设计考虑

低阈值、高效率 and 宽调谐是设计连续可调谐激光器要考虑的主要问题。

从钛宝石的生长和光谱研究中得知,尽管钛宝石中激活离子  $Ti^{3+}$  的发射截面并不比通常的固体激光介质,如  $Nd^{3+} : YAG$  小得多,但激活离子的浓度却比  $Nd : YAG$  中的  $Nd^{3+}$  低得多。这是因为高掺杂  $Ti^{3+}$  浓度常常会形成过多的  $Ti^{3+}-Ti^{4+}$  对,使在激光波长处的剩余吸收增大,所以连续钛宝石激光器大多采用低掺杂浓度的长棒。为使泵浦光束能有效地耦合到振荡光束,一般是采用纵向泵浦方式。

理论分析指出<sup>(3)</sup>,纵向泵浦连续钛宝石激光器的阈值振荡泵浦功率可表示为

$$P_{th} = \frac{\pi}{2}(1 + a^2)\omega^2 \frac{I_s}{\chi} \cdot \frac{(T_i + L_i + x/F)}{A} \quad (1)$$

其中  $a \equiv \omega_p/\omega$ ,  $\omega_p$  和  $\omega$  分别为泵浦光束和腔内激光振荡光束半径;  $I_s = (hc)/(\lambda\sigma_e\tau_f)$  是钛宝石的饱和强度,对于  $\lambda \simeq 780 \text{ nm}$ ,它约等于  $2.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ,发射截面  $\sigma_e \simeq 3.0 \times 10^{19} \text{ cm}^2$ ,荧光寿命  $\tau_f \simeq 3.15 \mu\text{s}$ ,  $\chi \equiv \lambda_p/\lambda$  为泵浦波长  $\lambda_p$  与激光波长  $\lambda$  之比;  $L_i$  是腔内光学元件插入损耗;  $x \equiv \alpha_p d$  为归一化棒长,其中  $\alpha_p$  和  $d$  分别为钛宝石晶体对泵浦辐射的吸收系数和晶体沿激光束方向的长度;  $T$  是输出耦合镜透过率;  $F \equiv \alpha_p/\alpha_r$  为晶体材料的品质因数(FOM),其中  $\alpha_r$  是晶体在激光波长处的剩余吸收系数;  $A = 1 - \exp(-x)$ 。

另外,纵向泵浦钛宝石激光器输出功率与晶体材料特性和器件结构参数之间的关系可表示为<sup>(4)</sup>

$$P_{out} = \frac{\pi\omega^2 T I_s}{4} \left\{ \frac{2P_p \tau_f \lambda_p \sigma_e (1 - e^{-\alpha_p d})}{hc\pi\omega^2} \cdot \frac{1}{T + 2\alpha_p d + L_i} - 1 \right\} \quad (2)$$

其中  $[2P_p \tau_f \lambda_p \sigma_e (1 - e^{-\alpha_p d})]/(hc\pi\omega^2)$  是腔内往返非饱和增益,  $(T + 2\alpha_p d + L_i)$  是腔的往返总损耗。

显然,为了增大输出功率,应增加泵浦功率  $P_p$  和减小腔内插入损耗  $(2\alpha_p d + L_i)$ ,而输出耦合率  $T$  和光束半径  $\omega$  则需根据其它参数的选择最佳化。

从式(1)可知,用短棒和小束腰半径、低输出耦合率的谐振腔会降低振荡阈值功率。但考虑到能量转换效率和输出功率,晶体长度又不能太短。为了在整个棒长范围内使紧聚焦泵浦光束与振荡光束精确地匹配,以保证泵浦能量有效地向振荡光束转移,晶体长度选择应与腔的共焦参数  $b = 2\pi n\omega_0^2/\lambda$  相匹配,其中  $n$  是晶体折射率,  $\omega_0$  为束腰半径。我们使用  $d = 6.5 \text{ mm}$ ,  $\alpha_p = 3.2 \text{ cm}^{-1}$  的高浓度短棒和  $d = 20 \text{ mm}$ ,  $\alpha_p = 0.7 \text{ cm}^{-1}$  的低浓长棒的实验证明了上面的分析。

钛宝石晶体的增益带宽很大(650 ~ 1100 nm),实验上,这种激光器的可调谐范围主要受腔镜膜层带宽限制,当然也与泵浦强度有关。双折射滤光片因插入损耗小、带宽大,最适合于连续钛宝石激光器调谐。要获得单频窄线宽输出,则还需加入标准具。

### 3 激光器结构参数和实验排布

本研究用实验装置如图 1 所示。泵浦源为国产 A-240 氩离子激光器(南京电子管厂产品),最大输出功率为 10 W。谐振腔设计成“Z”形折叠式像散补偿腔,总腔长近 1.5 m,腔内有两个  $R 150 \text{ mm}$  的凹面离轴反射镜,用以在腔内形成直径几十  $\mu\text{m}$  的聚焦束腰和补偿晶体引入的像散。在束腰处放置端面按布鲁斯特角切割的钛宝石晶体。晶体  $c$  轴与腔内偏振激光束的振动方向平行,以尽量减少剩余双折射的影响。为了散热,晶体装在水冷铜块中。泵浦光学系统采用  $f = 100 \text{ mm}$  单透镜和  $f = -100 \text{ mm}$  加  $f = 75 \text{ mm}$  组合双透镜系统两种。所用激光晶体是由本所激光晶体研究室生长的,也对一块美国 Crystal Systems 公司的  $\phi 6 \times 20 \text{ mm}$  晶体作了比

较实验。输出耦合率用过  $T \approx 2\%$  和  $T \approx 3\%$  两种, 波长调谐是用单片  $0.35 \text{ mm}$  厚的双折射滤光片。

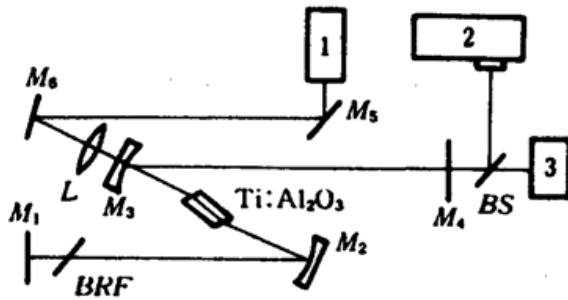


Fig. 1 Experimental arrangement for CW tunable Ti-sapphire laser

1—Ar<sup>+</sup>-Laser; 2—Spectrometer;  
3—Laser power meter; BS—Beamsplitter;  
BRF—Birefringent filter; L—Pumping lens;  
M<sub>4</sub>— $T \approx 3\%$  output mirror

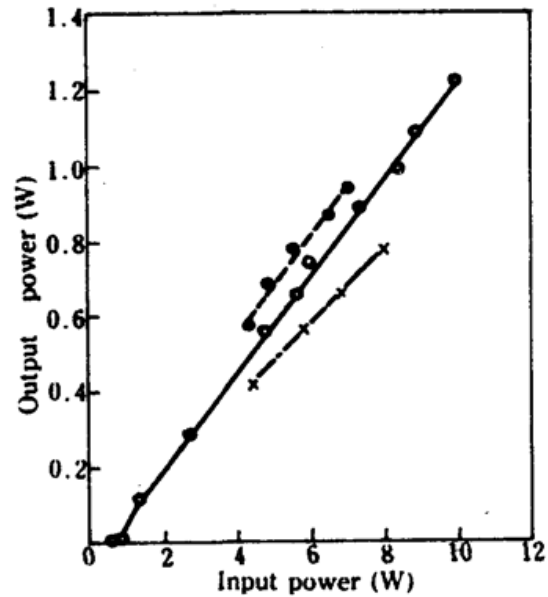


Fig. 2 Output power as a function of input power of Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

○— $3.5 \times 3.5 \times 15 \text{ mm}$  rod, pumping lens  $f = 100 \text{ mm}$   
●— $3.5 \times 3.5 \times 15 \text{ mm}$  rod, pumping lenses  $f = -100 \text{ mm}$  and  $f = 75 \text{ mm}$   
×— $3.5 \times 3.5 \times 6.5 \text{ mm}$  rod, pumping lens  $f = 100 \text{ mm}$ ,  $\lambda \approx 790 \text{ nm}$

## 4 实验结果及讨论

图 2 是用  $3.5 \times 3.5 \times 15 \text{ mm}^3$ ,  $\alpha_{490} \approx 2 \text{ cm}^{-1}$  和  $3.5 \times 3.5 \times 6.5 \text{ mm}^3$ ,  $\alpha_{490} \approx 3.2 \text{ cm}^{-1}$  两根棒得到的输出—输入典型曲线。图中实线为泵浦透镜  $f = 100 \text{ mm}$  时的结果, 虚线是用  $f = -100 \text{ mm}$  和  $f = 75 \text{ mm}$  组合光学系统所得到的结果。采用组合光学系统由于改善了泵浦光束与振荡光束模体积耦合, 器件的效率有所提高, 但实验发现, 这种组合光学系统泵浦方式对氩激光输出光束指向性漂移变得更敏感。图中点划线所示为用  $3.5 \times 3.5 \times 6.5 \text{ mm}^3$ ,  $\alpha_{490} \approx 3.2 \text{ cm}^{-1}$  短棒得到的结果。它的泵浦阈值明显低于  $d = 20 \text{ mm}$  长棒器件。图 3 是用 Crystal Systems  $\phi 6 \times 20 \text{ mm}$ ,  $\alpha_{514} \approx 0.7 \text{ cm}^{-1}$  的晶体, 在泵浦透镜  $f = 100 \text{ mm}$  时得到的一组典型结果。在实验中输出耦合镜全用  $T \approx 3\%$ ,  $T \approx 2\%$  的镜片虽可降低泵浦阈值, 但使输出功率下降, 特别在高泵浦功率时更明显。预计采用更大些的输出耦合还会获得更高的输出。

理论与实验都表明, 在工作物质长度小于泵浦光束和振荡光束束腰处的瑞利长度的情况下, 泵浦光束的纵向聚焦调整容限较大, 但对泵浦光束与振荡光束的共轴性调整极敏感。这就要求腔镜架、晶体台座和泵浦系统的调整机构必须有很高的精度和稳定性。实验还发现, 实验室的清洁程度也是影响器件长期稳定输出的重要因素, 实用型连续钛宝石激光器必须采取良

好的防尘设计。

我们用双折射滤光器和一组镀膜腔后,实现了波长 715~880 nm 调谐输出(图 4)。所用调谐滤光器在激光峰值波长( $\sim 790$  nm)处的插入损耗 $\sim 6.5\%$ 。在一米光栅光谱仪上观察到器件在上述调谐范围内连续平滑的调谐性能。

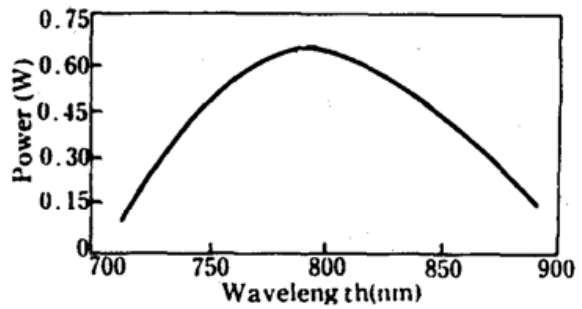
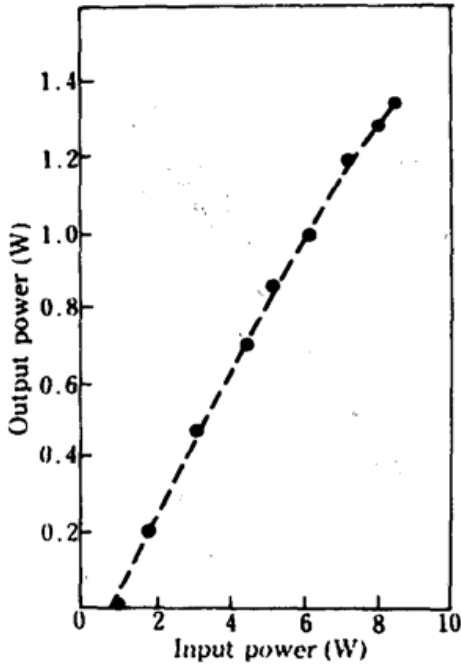


Fig. 3 Power in vs. power out curve for Crystal Systems Ti :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  rod ( $\phi 6 \times 20$ ,  $\alpha_{514} \simeq 0.7 \text{ cm}^{-1}$ ), output coupling  $T \simeq 3\%$ ,  $\lambda \simeq 790 \text{ nm}$

Fig. 4 A typical tuning curve of the laser

作者感谢本所邓佩珍、柴跃和乔景文等同志提供实验中所用钛宝石,李庆国等同志解决了所用镜片的镀膜,以及倪国权和戴明同志协助用 Coherent LAMBASTER-E 型激光功率计作了输出功率核对测量。

### 参 考 文 献

- 1 Tunable Solid-State Lasers, Springer Series in Optical Sciences, Vol. 47(1985) : Tunable Solid-State Lasers I, Springer Series in Optical Sciences, Vol. 52(1986)
- 2 刘玉璞 *et al.*, 中国激光, 19(2), 87(1992)
- 3 A. Sanchez, *IEEE J. Quant. Electr.*, OE-24(6), 995(1988)
- 4 A. J. Alfery, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-25(4), 760(1989)