

# 连续钛宝石激光器最佳输出透射率的测量

王军民 李瑞宁 谢常德 彭堃堃

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

**摘 要** 在连续钛宝石激光器中, 在一定泵浦功率下通过直接测量腔内熔融石英片在不同入射角时的反射耦合输出, 得到了激光器的最佳输出透射率。在两个不同的输出透射率条件下, 测量激光器的泵浦阈值, 经计算求得了不同泵浦功率下激光器的最佳输出透射率的理论值。对浓度不同的钛宝石棒均作了测量和计算, 测量值与理论值基本符合。

**关键词** 连续钛宝石激光器, 最佳输出透射率。

最佳输出透射率是激光器的基本参数之一。实际工作中, 常通过估计腔损耗和激活介质的增益系数来粗略地估算激光器的最佳输出透射率<sup>[1]</sup>, 偏差较大。用更换多个不同透射率的输出耦合镜来确定最佳输出透射率<sup>[2]</sup>, 显然又很不方便。本文介绍在连续钛宝石激光器中, 对于浓度不同的钛宝石棒, 采用直接测量置于腔内的熔融石英片在不同入射角下的反射耦合输出的方法分别测量系统在一定泵浦功率下的最佳输出透射率的实验结果; 还通过理论模拟计算得到了各系统在不同泵浦功率下的最佳输出透射率, 二者基本相符。

## 1 系统参数

本文的连续钛宝石激光器<sup>[3]</sup>的示意图见图1。激励源为可见多谱线输出(457.9 ~ 528.7 nm)的 Spectra-Physics 2030-20S 型氩离子激光器。

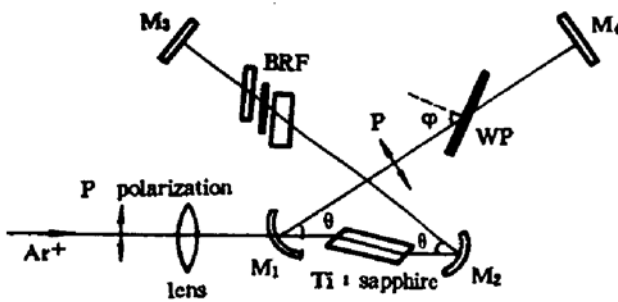


Fig. 1 Experimental setup of cw Ti:sapphire laser

L为焦距  $f = 150$  mm 的双凸透镜, 将相对于钛宝石棒呈  $\pi$  偏振的泵浦光束聚焦在四镜折叠腔中的钛宝石棒中。腔的总体长度约为 800 mm, 腔镜的波长范围为 730~840 nm;  $M_1$ 、 $M_2$  为曲率半径  $r = 102$  mm 的凹面反射镜,  $M_3$ 、 $M_4$  分别为平面全反镜和平面输出耦合镜。钛宝石棒被固定在水冷的激光头中, 置于两个球面反射镜中心。BRF 为由三片厚度比为 4:1:16(最薄一片的厚度为 350  $\mu$ m) 的石英双折射滤光片复合而成的波长调谐器。

实验中先后使用了三根钛宝石激光棒, 均为布儒斯特角切割, 测得各棒的具体参数列于

表 1 中。表 1 中的  $\alpha_{514.5}$  为钛宝石对于呈  $\pi$  偏振的 514.5 nm 光束的吸收系数；钛宝石晶体中  $Ti^{3+}$  的浓度越高，则其  $\alpha_{514.5}$  值越大。考虑到腔模的像散补偿问题，图 1 中合适的腔折叠角  $\theta$ ，可补偿一定长度的布儒斯特角切割钛宝石棒引起的腔模的像散<sup>[3, 4]</sup>；不同长度的钛宝石棒应采用相应的腔折叠角  $\theta$  (见表 1)。

Table 1. Parameters of Ti:sapphire rods and the fold angles of cavities

	size (mm)	$\alpha_{514.5}$ ( $cm^{-1}$ )	$\theta$
SA. 1	6.0×4.5×13.7	1.51	~ 25°56'
SA. 2	5.4×5.8×21.2	0.98	~ 32°11'
SA. 3	∅ 4.0×20.0	1.00	~ 31°16'

## 2 测量方法与测量结果

Patel<sup>[5]</sup> 在二氧化碳激光器的谐振腔内插入平板透明介质，通过调整反射损耗的方法测算了腔损耗。刘志国等<sup>[6]</sup> 采用了类似的方法测量了氩离子激光器的腔损耗及饱和参量等参数。本文中则通过置于腔内的熔融石英片(图 1 中的 WP)所造成的反射耦合输出，来测量连续钛宝石激光器的最佳输出透射率。

呈  $P$  偏振的腔模以一定入射角  $\varphi$  往返通过石英片时，造成多次反射损耗。图 2 可以说明  $P$  偏振光单次通过石英片 WP 时多次反射的情形；实验中所使用的熔融石英片，光学质量优良，所引起的吸收和散射损耗极小，这两项损耗可忽略。

光束在石英片前后表面多次反射“输出”间的强度比为：

$$\frac{I_r'}{I_r} = \frac{I_0(1-r)r(1-r)}{I_0r} = (1-r)^2,$$

$$\frac{I_r''}{I_r} = \frac{I_0(1-r)rrr(1-r)}{I_0r} = r^2(1-r)^2,$$

$$\frac{I_r'''}{I_r} = \frac{I_0(1-r)rrrr(1-r)}{I_0(1-r)r(1-r)} = r^2.$$

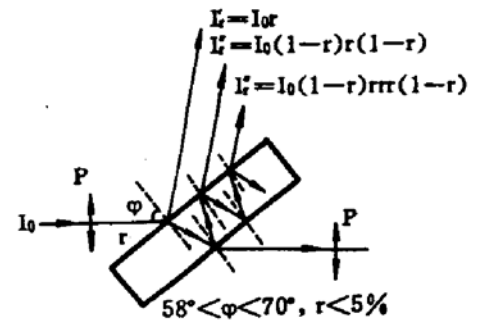


Fig. 2 Schematic diagram of the reflected beams from the fused silica plate at incident angle  $\varphi$

若反射率  $r < 5\%$ ，则  $I_r'$  与  $I_r''$  的强度基本相当，而  $I_r'''$  则较  $I_r'$  与  $I_r''$  弱得多。如果略去  $I_r'''$ ，考虑到  $P$  偏振的腔模往返通过石英片 WP 的情形，则有四次反射“输出”较为显著，且强度基本相等。将图 1 所示腔中的平面输出耦合镜  $M_4$  换为平面全反镜，在一定的入射角下，可以将熔融石英片 WP 的单个光学表面对于  $P$  偏振的腔模的反射率  $r$  的四倍 ( $4r$ )，近似地等效为腔的输出透射率。改变入射角，即等效地改变了腔的输出透射率。对于钛宝石激光峰值波长 780 nm，熔融石英的折射率约为 1.4543；由费涅尔定律可求得熔融石英片 WP 的单个光学表面对于 780 nm  $P$  偏振光的反射率  $r$  与其入射角  $\varphi$  的关系，结果见图 3。由图 3 可知，当熔融石英片 WP 的入射角  $\varphi$  处在  $58 \sim 70^\circ$  之间时， $r < 5\%$ 。入射角  $\varphi$  与其等效输出透射率  $T$  的对应关系见图 4。

调整石英片 WP 的入射角  $\varphi$ ，即可通过石英片反射以不同的等效输出透射率实现耦合输出。图 5 给出三根钛宝石棒对应的系统各自在一定的泵浦功率下，在石英片 WP 不同的入射角时测得的反射耦合输出功率曲线(图中横坐标已经根据图 4 将入射角换算成了等效输出透射率)；曲线的极值点即是相应泵浦功率下各系统的最佳输出透射率。

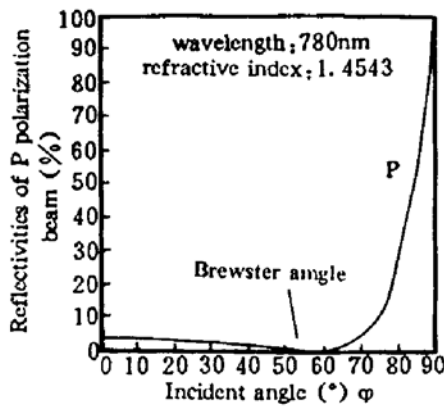


Fig. 3 Calculated reflectivities for P polarization beam at  $\lambda = 780 \text{ nm}$  on a surface of fused silica

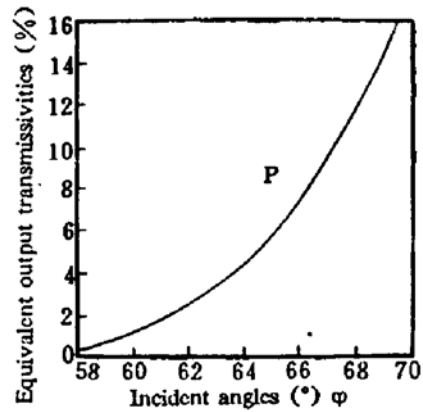


Fig. 4 Curve of equivalent transmissivities versus incident angles of the fused silica plate

### 3 理论模拟

对于连续运转的四能级激光系统，谐振腔的往返损耗与泵浦阈值功率有如下关系<sup>[7]</sup>：

$$L - \ln(1 - T) = 2KP_{th} \quad (1)$$

上式中， $L$  为谐振腔的往返损耗， $T$  为激光器的输出透射率， $K$  为泵浦系数， $P_{th}$  为泵浦阈值功率中注入腔内的部分。

对应于谐振腔的两个输出透射率  $T_1$ 、 $T_2$ ，可通过分别测量其泵浦阈值功率  $P_{th1}$ 、 $P_{th2}$ ，由关系式(1)求得泵浦系数  $K$  和往返损耗  $L$ 。再由最佳输出透射率  $T_{opt}$  与注入腔内的泵浦功率  $P_{in}$  的近似关系<sup>[7]</sup>：

$$T_{opt} \approx (\sqrt{2KLP_{in}} - L)/(1 + L) \quad (2)$$

可模拟出系统在不同泵浦功率下的最佳输出透射率的理论值。

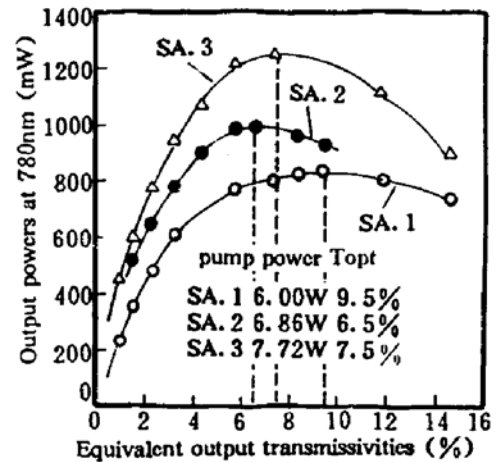


Fig. 5 Output powers of the Ti:sapphire lasers for different equivalent output transmissivities and a given pump power

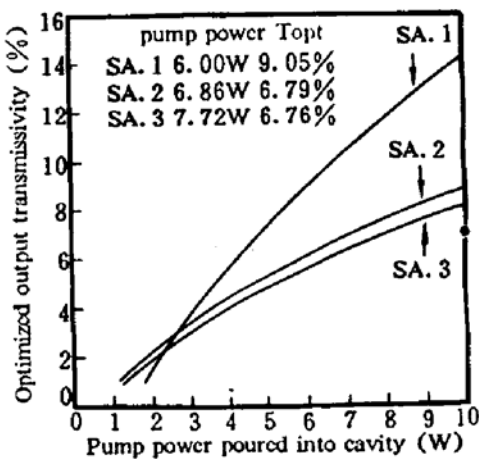


Fig. 6 Theoretical results of optimized output transmissivities versus the pump powers poured into the laser cavity

实验中对于三根钛宝石激光棒所对应的系统，分别换用了两片不同输出透射率的输出耦合镜，测量了相应的泵浦阈值功率，由(1)式求得了各系统的泵浦系数  $K$  和往返损耗  $L$  的值。见表 2。表 2 中的泵浦阈值功率已根据系统参数换算成了注入腔内的泵浦功率。

将各系统腔的往返损耗  $L$ ，除以相应钛宝石棒长度  $l$  的两倍 ( $L/2l$ )，可给出各棒对于 780 nm 激光波长的残余吸收系数的上限<sup>[8]</sup>：0.03505  $\text{cm}^{-1}$ (SA.1)、0.00726  $\text{cm}^{-1}$ (SA.2)、0.00796  $\text{cm}^{-1}$ (SA.3)。

由(2)式及表二中各棒所对应系统的  $K$  和  $L$  值，通过模拟计算可求得各系统的最佳输出透射率与注入腔内的泵浦功率的关系，结果见图 6。对应于同一系统，泵浦功率增大，系统的最佳输出透射率也单调地增大；

一定的泵浦功率对应一个最佳输出透射率值。结果表明：三根钛宝石激光棒所对应系统各自

在一定的泵浦功率下的最佳输出透射率的理论模拟值与实验测量值基本符合。

Table 2. Output transmissivity, pump threshold, pump coefficient and round trip loss of the laser systems

	$T_{780\text{ nm}}$	$P_{\text{th}}$ (W)	$K$ ( $\text{W}^{-1}$ )	$L$
SA. 1	2.29%	1.802	0.03308	9.604%
	11.76%	3.343		
SA. 2	4.35%	1.566	0.02403	3.078%
	9.41%	2.697		
SA. 3	4.00%	1.732	0.02908	3.184%
	5.74%	2.168		

在实验中，测量最佳输出透射率所用的反射耦合输出法是一种方便而又可行的方法，这种测量方法对于腔模为线偏振的连续激光器均适用。

### 参 考 文 献

- [1] 范安辅, 徐天华, 激光技术物理. 成都, 四川大学出版社, 1992, 156
- [2] 吴路生, 陈竑一, 赵梅荣等,  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  激光特性的研究. 中国激光, 1989, 16(1): 4~6
- [3] 王军民, 李瑞宁, 梁晓燕等, 四镜折叠腔波长可调谐连续  $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$  激光器. 激光与红外, 1993, 23(4): 27~30
- [4] H. W. Kogelnik, E. P. Ippen, Andrew Dienes *et al.*, Astigmatically compensated cavities for cw dye lasers. *IEEE J. of Quant. Electron.*, 1972, QE-8(3): 373~379
- [5] P. S. Patel, Power coupling from a  $\text{CO}_2$  laser by a rotatable reflector. *Appl. Opt.*, 1973, 12(5): 943~945
- [6] 刘志国, 刘玉照,  $\text{Ar}^+$  激光器损耗、增益及饱和参数的测量. 激光, 1982, 9(10): 673~675
- [7] Walter Koechner, *Solid-State Laser Engineering*. New York, Springer-Verlag New York Inc., 1976, 86~87
- [8] A. Sanchez, R. E. Fahey, A. J. Strauss *et al.*, Room temperature continuous-wave operation of a  $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$  laser. *Opt. Lett.*, 1986, 11(6): 363~364

## Measurements of Optimized Output Transmissivities of CW Ti:Sapphire Lasers

Wang Junmin    Li Ruining    Xie Changde    Peng Kunchi  
*(Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006)*  
 (Received 28 June 1994; revised 28 November 1994)

**Abstract** The optimized output transmissivities of the cw Ti:sapphire lasers for a given pump power have been experimentally selected by measuring the powers of reflected beams from the fused silica plate placed inside the laser cavity at different incident angles. The optimized output transmissivities for different pump powers can be theoretically derived by using the pump thresholds at two different output transmissivities. The measurements and calculations have been made for three Ti:sapphire rods with the different concentrations. The theoretical results are approximately in accord with the measured values.

**Key words** CW Ti:sapphire laser, optimized output transmissivity