

# 钛宝石激光器的性能同元件参数的关系\*

邬承就

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥, 230031)

**摘要:** 根据纵向泵浦激光器优化理论, 计算不同 FOM 值钛宝石的最佳斜率效率, 不同 Q 值钛宝石在不同泵浦功率条件下应取的合适长度和输出镜参数, 由它可能产生的最大输出功率及所需阈值。讨论了性能提高的可能性。

**关键词:** 钛宝石激光器 性能 分析计算

## Ti sapphire laser performances and the dependence upon the part parameters

Wu Chengjiu

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** According to the optimum design theory of a longitudinally pumped laser, the optimum slope efficiency of a laser of Ti sapphire with different FOM-value, the maximum output power of a laser of Ti sapphire with different Q-value for different pumping power, the threshold, the optimum part length and transmittance of the output mirror have been calculated. The possibility of improving laser performances are discussed as well.

**Key words:** Ti sapphire laser performance calculation

### 一、引言

目前, 钛宝石已制成多种运转方式的可调谐激光器<sup>[1]</sup>, 除了闪光灯泵浦器件外, 大多数由其它绿激光纵向泵浦。Sanchez 等<sup>[2]</sup>应用 Moulton<sup>[3]</sup>的纵向泵浦理论估算钛宝石激光器的性能。但是, 由于元件参数甚多, 性能与参数的关系复杂。本文作者<sup>[4]</sup>对纵向泵浦激光器进行了优化设计分析。引入吸收密度、材料优值、品质因素三个元件参数, 利用求极值方法, 推导出激光器最大输出功率, 最佳斜率效率的极值方程和条件方程, 确立了优化设计和优选元件的原则, 本文报导对钛宝石激光器的理论计算结果, 讨论提高钛宝石激光器性能的途径。

### 二、激光优化性能同元件参数的关系

为了提高激光输出等性能, 已有双向泵浦<sup>[1,5,6]</sup>非稳腔<sup>[7]</sup>等新型设计。本文不讨论这些专门情况, 而讨论最常用的一般情况。用小光束腔模激光聚焦泵浦、连续驻波腔、低阈值、元件端面为 Brewster 角的条件下, 激光器的阈值、斜率效率和输出功率分别为<sup>[4]</sup>:

$$P_{th} = \frac{k}{Q} f(x, T) \quad (1)$$

$$\eta = BFTf(x, T) \tag{2}$$

$$P_{out} = \eta_s(P_{in} - P_{th}) = BFT P_{inf}(x, T) - \frac{k}{Q}x \tag{3}$$

式中, 
$$f(x, T) = \frac{1 - \exp(-x)}{F(T + L_i) + x} \tag{4}$$

有关参数意义是

阈值系数  $k = \frac{hc}{4\alpha_e \tau_f} \frac{\lambda_s}{\lambda_p} (1 + a^2)$  (5)

效率系数  $B = \eta_f f_i \lambda_p / \lambda_s$  (6)

吸收密度  $x = \alpha_p l$  (7)

材料优值(FOM)  $F = \alpha_p / \alpha_l$  (8)

品质因素(Q 值)  $Q = \alpha_p F = \alpha_p^2 / \alpha$  (9)

以  $A_{\text{Ti}^{3+}}$  激光(488nm)为泵浦光,输出激光波长 780nm,辐射截面取  $\alpha_e = 30 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 荧光寿命  $\tau_f = 3.15 \mu\text{s}$ , 结构参数  $(1 + a^2) = 3$  (相当于束径比  $a = W_p / W_l = 1.42$ ), 算出  $k = 25.2 \text{ W/cm}$ 。文献报导<sup>[2]</sup>的内量子效率为 55% ~ 75%, 取  $\eta = 65\%$ , 结构因子取  $f_i = 1$ , 算出  $B = 0.407$ 。此外,其它含义是  $h$  为 planck 常数,  $c$  为光速,  $T$  为输出镜透过率,  $L_i$  为其它光学元件插入损耗,  $l$  为钛宝石元件通光长度,  $P_{in}$  为泵浦功率,  $\alpha_p, \alpha_l$  分别为钛宝石在泵光波段和激光波段的吸收系数。由 (1) ~ (3) 式可见,选定钛宝石 ( $k, B, F, Q$ ) 后,其激光性能仅随元件吸收密度(长度和浓度)和输出镜透过率变化而改变。

(1) 斜率效率 具有极值,由  $\partial \eta / \partial x = 0$  求出。

最佳斜率效率:  $\eta_{s0} = BFT / \exp(x_0)$  (10)

条件: 其吸收密度(最佳值)  $x_0$  需满足

$$\exp(x_0) - x_0 = F(T + L_i) + 1 \tag{11}$$

Fig. 1 The optimum slope efficiency of a CW laser of Ti: sapphire with different FOM-value vs the transmittance of the laser output mirror

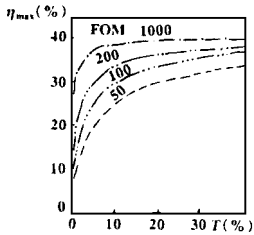


图 1 为不同 FOM 值钛宝石的理论斜率效率与输出镜透过率的关系。高 FOM 值元件的增大趋势更陡,斜率效率的极限值是  $B$ 。

(2) 输出功率 具有极值,由  $\partial P_{out} / \partial x = 0$  和  $\partial P_{out} / \partial T = 0$  联立方程求出。  $L_i = 0$  情况下简化结果是最大输出功率:

$$P_{out \max} = \frac{kB}{Q} [2(e^{x_{00}} - 1) - x_{00}]^2 = \frac{kB}{Q} (FT_{00})^2 \tag{12}$$

条件: 吸收密度 ( $x_{00}$ ) 和输出镜透过率 ( $T_{00}$ ) 必须满足

$$4(e^{x_{00}} - 1)e^{x_{00}} = QP_{in}/k \tag{13}$$

$$FT_{00} = 2(e^{x_{00}} - 1) - x_{00} \tag{14}$$

最佳吸收密度  $x_{00}$  与泵浦功率 ( $P_{in}$ ) 和钛宝石的质量 ( $Q$ ) 有关(结果如图 2b 所示)。二种条件确定后,即可计

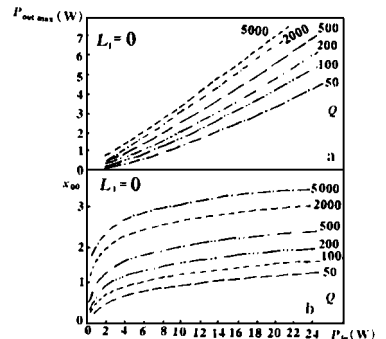


Fig. 2a The maximum output power of a Ti: sapphire laser vs the pumping power for different Q-value Ti: sapphire (above) Fig. 2b The appropriate absorption density of a Ti: sapphire part with different Q-value for optimum output design vs pumping power (below)

算出理论最大输出功率, 结果如图 2a 所示。

(3) 阈值 不存在极值。若按优化斜率效率设计, 阈值为

$$P_{tho} = \frac{k}{Q} x_{0o} \exp(x_{0o}) \quad (15)$$

若按优化功率设计, 阈值为( $L_i = 0$  情况)

$$P_{thoo} = \frac{2k}{Q} x_{0o} \exp(x_{0o}) \quad (16)$$

两种阈值不相等。后者结果如图 3 所示。

(4) 元件参数 包括钛宝石的质量参数、通光长度和输出镜透过率。质量参数有  $\alpha_p, \alpha, F, Q$ , 独立的为两个。由最佳吸收密度  $x_{0o}$  计算值可以计算元件的最佳长度  $l_{oo}(x_{0o} = \alpha_p l_{oo})$ 。图 4 为

$P_{in} = 12W$  条件下, 不同浓度(即不同主吸收系数  $\alpha_p$ ) 钛宝石的最佳长度计算结果。一般常用的钛宝石元件  $F \leq 200, \alpha_p \geq 0.75cm^{-1}$ , 最佳长度应选  $0.5 \sim 2.0cm$ 。只有更高 FOM 值的晶体方可以做得更长。输出镜透过率与  $x_{0o}$  有关(图 5), 一般情况  $F \geq 100, x_{0o} \leq 2$ , 应选  $T_{oo} \leq 10\%$ 。

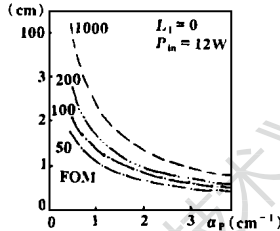


Fig. 4 The optimum length of a Ti:sapphire part with different FOM-value for optimum output design vs its main absorption coefficient with conditions of  $P_{in} = 12W$  and  $L_i = 0$

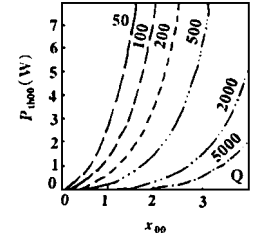


Fig. 3 The threshold of a Ti:sapphire laser with optimum output vs the appropriate absorption density of the Ti:sapphire part with different Q-value

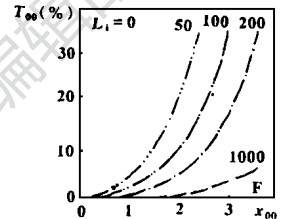


Fig. 5 The optimum transmittance of the output mirror of a Ti:sapphire laser for optimum output design vs the appropriate absorption density of the Ti:sapphire part with different FOM-value

### 三、结果讨论

分析表明, 钛宝石的激光阈值随  $Q$  值增大而下降。目前一般晶体  $Q$

$= 50 \sim 400cm^{-1}$ 。例如, 若元件长度  $l = 3.5cm, \alpha_p = 1.2cm^{-1}, F = 100(Q = 120cm^{-1})$ , 理论阈值为  $7.3W$ ; 若  $F = 50(Q = 60cm^{-1})$ , 则阈值高达  $11.1W$ 。大量实验表明, 长度大于  $3.5cm$  的钛宝石元件很难产生激光。我们曾把同等质量的元件切短成  $l = 1.14cm$ , 理论阈值为  $2.26W$ , 实验阈值<sup>[8]</sup>为  $2.4W$ 。计算表明, 若采用  $Q = 2000cm^{-1}(F = 1000, \alpha_p = 2cm^{-1})$  的钛宝石薄片, 则可能做成阈值  $100mW$  以下的超低阈值激光器。

钛宝石激光器的输出功率受晶体  $Q$  值影响很大。在优化设计情况下, 由  $12W$  泵浦, 用  $Q = 100cm^{-1}$  的晶体, 理论最大输出为  $2.1W$ ; 若改用  $Q = 2000cm^{-1}$  的晶体, 则最大可达  $3.7W$ 。用这种晶体, 按  $20W$  泵浦设计, 理论最大输出  $6.5W$ 。

本文计算工作做完成文后, 看到 Pinto 等人<sup>[10]</sup>用质量参数差别很大的钛宝石做的激光实验结果。根据提供的参数, 用上述理论进行了计算, 两种结果同列于附表。比较可见, 理论最大激光输出功率与实验结果完全相符, 理论和实验阈值也很相近。此外, 从 2, 3 号样品的数据比较可见, 尽管二者的 FOM 值相差近一倍, 输出功率和阈值的差别都很小。原因可以从二者的  $Q$  值相接近来解释。结果进一步证明, “最具代表性的质量参数是  $Q$  因素”, “提高钛宝石质量的关键是提高其  $Q$  值”的理论分析结论<sup>[11]</sup>。  $Q$  值比 FOM 值更能代表质量。

需要指出的问题有两个。分析计算中需要内量子效率数据, 文献报导的差别较大, 连续激光  $\eta_i = 55\% \sim 75\%$ , 脉冲激光<sup>[9]</sup>  $\eta_i = 68\% \sim 86\%$ 。我们计算选用  $65\%$ , 可能偏低。  $\eta_i$  影响  $B$

值、斜率效率和输出的计算结果,精确设计计算时需注意。第二个问题是上述实验所用元件长度并不完全符合理论计算值,尚有改进余地。

Table Theoretical and experimental laser performances of Ti sapphire with different parameters

| sample | concen | $\alpha_{514}$   | $\alpha_{820}$   | FOM  | Q    | L   | output |        | threshold(W) |        |
|--------|--------|------------------|------------------|------|------|-----|--------|--------|--------------|--------|
|        | wt%    | cm <sup>-1</sup> | cm <sup>-1</sup> |      |      |     | exper. | theor. | exper.       | theor. |
| 1      | 0.1    | 2.07             | .023             | 90   | 186  | 1.5 | 1.9    | 1.8    | 1.5          | 3.0    |
| 2      | 0.1    | 2.10             | .0021            | 1000 | 2100 | 1.5 | 3.5    | 3.0    | 0.75         | 1.0    |
| 3      | 0.15   | 3.19             | .0057            | 560  | 1786 | 1.0 | 2.85   | 2.8    | 0.8          | 1.0    |

- Note. 1. The experimental results are from J. F. Pinto et al.<sup>[10]</sup>  
 2. The theoretical output power is the maximum in the pumping power 9.6 W condition.

### 四、结 论

根据纵向泵浦固体激光器优化设计理论,计算了各种参数钛宝石的斜率效率、最大输出和阈值,以及元件最佳长度和输出镜参数。结果与实验相符。方法和结果可作设计参考。

### 参 考 文 献

- 1 Wu Ch J. SPIE, Vol. 1979, Laser and Optoelectronics, 1992; 240
- 2 Sanchez A, Strauss A J, Aggarwal R L et al. IEEE J Q E, 1988; 24(6): 995
- 3 Moulton P F. IEEE J Q E, 1985; QE-21(10): 1582
- 4 邬承就. 物理学报, 1995; 44(4): 552
- 5 Estable F, Mottay E, Salin F. Opt Lett, 1993; 18(9): 711
- 6 吴路生, 韦 丽, 周东方 et al. 中国激光, 1995; 22(3): 168
- 7 Rines G A, Moulton P F. Opt Lett, 1990; 15(8): 434
- 8 谢建平, 孙晓泉, 张运生 et al. 量子电子学, 1993; 10(1): 91
- 9 Moulton P F. J O S A(B), 1986; 3(1): 125
- 10 Pinto J F, Esterowitz L, Rosenblatt G H et al. IEEE J Q E, 1994; 30(11): 2612
- 11 邬承就. 人工晶体学报, 1995; 24(2): 157

\* \* \*

作者简介: 邬承就,男,1940年2月出生。研究员,室主任。中国硅酸盐学会晶体生长和材料专业委员会委员。1981年~1983年在德国汉堡大学研究碘同位素分子超精细光谱。近十年来先后研究钛宝石激光器、Cr:LiSAF激光器、Tm, Ho 2μm激光器。获国家和中科院多项奖。

收稿日期: 1995-05-29 收到修改稿日期: 1996-03-08