

# 纵向泵浦钛宝石激光器中泵浦源模式的影响

王益民 刘玉璞 张影华

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 从效率和模式两个方面讨论了连续纵向泵浦钛宝石激光器中泵浦光束的横模特性对钛宝石激光器的影响, 并与实验结果进行了比较。

**关键词** 钛宝石, 激光器, 纵向泵浦

象其它激光器的泵浦方式一样, 钛宝石激光器的泵浦系统具有许多自身的特点, 值得深入的研究。钛宝石晶体蓝-绿吸收带的存在, 使得氩离子激光器成为它的一种有效泵浦源; 通过将泵浦光束和振荡光束聚焦于工作物质之中的方式, 可以大大降低器件的阈值。关于泵浦光与振荡光的模式匹配问题, 人们已进行了比较多的研究<sup>[1~4]</sup>。我们在实验中注意到, 由于放电管的老化、腔镜的磨损等原因, 会使得用于作为泵浦源的氩离子激光器产生非基模输出, 在高泵浦功率情况下, 更是如此, 由此对于钛宝石激光器的稳定性运转产生了一些不良的影响, 这点在一般的文献中并未提及。本文以  $TEM_{10}$  模为例, 从效率和模式两方面讨论了泵浦源的横模特性对钛宝石激光器的影响, 其结论对于其它的纵向泵浦固体激光器也有一定的参考价值。

## 1 功率输出

考虑图 1 中描述的光束结构, 在一长度为  $L$  的工作物质中, 泵浦光束和振荡光束共线分布, 相对于棒的端面处  $z = 0$ , 腔模和泵浦光束的束腰位置分别在  $z_1, z_2$  处。泵浦光束和振荡光束的强度分布可表示为

$$I(r, \varphi, z) = P(z)f(r, \varphi, z) \quad (1)$$

式中,  $P(z)$  是光束功率,  $f(r, \varphi, z)$  为光束截面上的归一化函数。对于  $TEM_{00}$  模高斯光束, 其归一化函数为

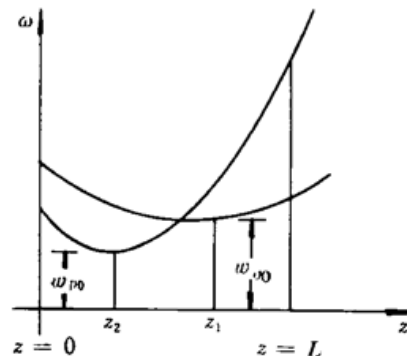


Fig. 1 Collinear beam geometry within a gain medium of  $L$  in length

$$f_{00} = \frac{2}{\pi w^2(z)} e^{-2r^2/w^2(z)} \quad (2)$$

在文献[5]中,已对基模泵浦的钛宝石激光器的功率计算进行了深入的讨论,令(18)式中的  $P_c$  等于 0,并经过化简,可得到器件的阈值表达式为

$$P_{th00} = \frac{(T + 2\alpha_c L + \eta)hc\pi}{4\sigma\tau\lambda_p\alpha_p} \int_0^L \frac{e^{-\alpha_p z}}{w_p^2 + w_c^2} dz \quad (3)$$

其中  $T$  为输出镜透过率,  $\alpha_p, \alpha_c$  分别为工作物质对泵浦光和振荡光的吸收系数,  $\sigma$  为增益发射截面,  $\tau$  为荧光寿命,  $\eta$  为腔镜上的附加损耗, 泵浦光束和振荡光束光斑半径  $w_p, w_c$  分别为

$$w_c^2 = w_{c0}^2 \left[ 1 + \frac{(z - z_1)^2 \lambda_c^2}{\pi^2 w_{c0}^4 n_c^2} \right] \quad w_p^2 = w_{p0}^2 \left[ 1 + \frac{(z - z_2)^2 \lambda_p^2}{\pi^2 w_{p0}^4 n_p^2} \right]$$

$w_{p0}$  和  $w_{c0}$  分别为泵浦光束和振荡光束的束腰。

在有像散存在的情况下,可推得器件的阈值表达式为

$$P_{th00} = \frac{(T + 2\alpha_c L + \eta)hc\pi}{4\sigma\tau\lambda_p\alpha_p} \int_0^L \frac{e^{-\alpha_p z}}{\sqrt{w_{px}^2 + w_{cx}^2} \sqrt{w_{py}^2 + w_{cy}^2}} dz \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} w_{cx}^2 &= w_{cx0}^2 \left[ 1 + \frac{(z - z_{1x})^2 \lambda_c^2}{\pi^2 w_{cx0}^4 n_c^2} \right] & w_{cy}^2 &= w_{cy0}^2 \left[ 1 + \frac{(z - z_{1y})^2 \lambda_c^2}{\pi^2 w_{cy0}^4 n_c^2} \right] \\ w_{px}^2 &= w_{px0}^2 \left[ 1 + \frac{(z - z_{2x})^2 \lambda_p^2}{\pi^2 w_{px0}^4 n_p^2} \right] & w_{py}^2 &= w_{py0}^2 \left[ 1 + \frac{(z - z_{2y})^2 \lambda_p^2}{\pi^2 w_{py0}^4 n_p^2} \right] \end{aligned}$$

其中各参数的意义与(3)式相同,  $x, y$  分别代表两个互相垂直的平面。

文献[5]在推导激光器的功率表达式时,泵浦源的模式被假定为基模,在泵浦源模式为高阶横模的情况下,(3)式将不再适用;因此,器件的功率表达式必须重新推导。下面以  $TEM_{10}$  模为例进行讨论,  $TEM_{10}$  模光强归一化分布函数可表示为

$$f_{10}(r, \varphi, z) = \frac{8r^2}{\pi w^4} e^{-2(r^2/w^2)} \cos^2 \varphi \quad (5)$$

利用与文献[5]中类似的方法,可推导出在泵浦模式为  $TEM_{10}$  模时,工作物质中的非饱和增益系数  $g_{10}$  为

$$g_{10} = \frac{8\sigma\tau\alpha_p\lambda_p P_{p0}}{hc\pi w^4} r^2 e^{-\alpha_p z - 2r^2/w^2} \cos^2 \varphi \quad (6)$$

和光在通过工作物质时的光强变化函数为

$$\frac{dI_c}{dz} = \left[ \frac{8\sigma\tau\alpha_p\lambda_p P_{p0}}{hc\pi w^4} \frac{r^2 e^{-\alpha_p z - 2r^2/w^2} \cos^2 \varphi}{1 + B e^{-Dz}} - \alpha_c \right] I_c \quad (7)$$

其中  $B = 4sP_c/(\pi w_c^2)$ ,  $D = 2/w_c^2$ ,  $c$  为饱和因子,  $P_c$  为振荡光功率。将(1)式代入(7)式中,假定振荡模为  $TEM_{00}$  模,对光束横截面积分,得到振荡光功率的变化函数

$$\frac{dP_c}{dz} = \left[ \frac{16\sigma\tau\alpha_p\lambda_p P_{p0}}{hc\pi} \frac{e^{-\alpha_p z}}{w_p^2 w_c^2} Q(z) - \alpha_c \right] P_c \quad Q(z) = \int_0^\infty \frac{e^{-Ar^2} r^3}{1 + B e^{-Dr^2}} dr \quad (8)$$

式中  $A = 2(w_p^2 + w_c^2)/(w_p^2 w_c^2)$ , 将上式对棒长积分,并乘以 2,将结果等于往返损耗,在低增益近似下,令  $P_c = 0$ ,则得到了在泵浦模为  $TEM_{10}$  模时的器件阈值的表达式

$$P_{th10} = \frac{(T + 2\alpha_c L + \eta)hc\pi}{4\sigma\tau\lambda_r\alpha_r} \int_0^L \frac{e^{-\alpha_r z}}{w_p^2 + w_s^2} k dz \quad k = \frac{1}{1 + (w_p/w_s)^2} \quad (9)$$

当考虑到工作物质中存在像散时,可推得阈值表达式为

$$P_{th10} = \frac{(T + 2\alpha_c L + \eta)hc\pi}{4\sigma\tau\lambda_r\alpha_r} \int_0^L \frac{e^{-\alpha_r z}}{\sqrt{w_p^2 + w_{ps}^2} \sqrt{w_s^2 + w_{ss}^2}} \frac{w_{ps}}{w_p} \frac{w_{ss}^2}{w_{ss}^2 + w_{ps}^2} dz \quad (10)$$

其中各参数与式(4)中相同。

将(9)式与(3)式比较可知,在泵浦源模式为  $TEM_{10}$  模时,其阈值表达式分母的积分因子中多了一项  $k$ ,并且由  $k$  的表达式可以看出,对于任意的  $w_p$  和  $w_s$ ,总有  $0 < k < 1$ ,即总有  $P_{th10} > P_{th00}$ ,也就是说,在泵浦光束的模式为非基横模的情况下,钛宝石激光器的阈值将会增加,从而导致器件的效率下降。我们利用一只运转超过了 3000 h 的氩离子激光器进行了实验,钛宝石激光器采用四镜 Z 型腔结构,表 1,表 2 分别给出了两组结果。其中带“\*”号的部分为利用式(4)和(10)给出的计算值。

Table 1  $r = 100$  mm,  $P_{in} = 5$  W

Pump focus $f$ (mm)	100	75
* $P_{th00}$ (W)	1.85	1.5
* $P_{th10}$ (W)	3.81	2.73
$P_{out}$ (mW)	210	370

Table 2  $f = 100$  mm,  $P_{in} = 5$  W

$r$ (mm)	100	150
* $P_{th00}$ (W)	1.85	1.78
* $P_{th10}$ (W)	3.81	2.48
$P_{out}$ (mW)	210	356

表 1 为在腔参数不变的条件下,只改变泵浦镜焦距  $f$  的大小所得的结果,在固体激光器中,输出功率  $P_{out}$  可表示为<sup>[6]</sup>(文献[5]中给出的钛宝石激光器的功率表达式也具有这一形式)

$$P_{out} = (P_{in} - P_{th})\eta_s \quad (11)$$

其中  $P_{in}$  为注入功率,  $P_{th}$  为激光器的阈值,  $\eta_s$  为激光器的斜率效率,它与激光器本身的损耗因素及工作物质的特征参数有关,在以下的讨论中,由于只考虑泵浦光束的模式变化,所以  $\eta_s$  是一个不变量。因此在泵浦功率不变的情况下,由于泵浦源改变或模式匹配改变所引起的输出功率的变化将表现在激光器阈值的变化中,可表示为

$$\Delta P_{out} = -\Delta P_{th}\eta_s \quad (12)$$

由表 1 可以看出,当泵浦镜焦距由 100 mm 变为 75 mm 时,器件的输出功率有明显的增加,幅度为 160 mW;对于泵浦模为  $TEM_{00}$  的情况,此时阈值的变化为 0.35 W,考虑到器件斜率效率的实际大小(约 20%),其输出功率增加量为 70 mW,不应有如此大的变化,而对于泵浦模为  $TEM_{10}$  的情况,阈值的变化为 1.08 W,所以会引起大的输出功率的变化,约为 200 mW,因此,可以断定此时泵浦源的模式为非单横模,而是低阶横模和高阶横模的混合输出。表 2 中是另外一组实验结果,其泵浦镜焦距保持  $f = 100$  mm 不变,只改变内腔凹面镜的半径  $r$  (100 mm 和 150 mm,腔的其它结构尺寸不变),可以看出,当泵浦源模式为  $TEM_{00}$  模时,钛宝石激光器的输出功率不应有太大的变化,而当考虑  $TEM_{10}$  模时,则输出功率会有比较大的变化,并与实验结果一致,它也表明,泵浦源为非基横模。同时,器件的总体效率也是比较低的 ( $P_{in} = 5$  W),因此我们说,泵浦源光束的横模特性是决定钛宝石激光器效率的一个关键因素;在泵浦源模式不好的情况下,泵浦镜焦距的选择显得特别重要,合适的短焦距值将使得器件的效率有明显的提高。

## 2 横模特性

钛宝石晶体发射截面较小,又有残余的近红外吸收,因此,在钛宝石激光器中,高阶的振荡横模应该不易产生,所以,一般的钛宝石激光器中并没有采取限制横模的措施。但在实验中有时确能观察到钛宝石激光器的高阶横模输出(例如  $TEM_{10}$ ),并且伴随着这一现象的出现,激光器的效率明显下降,自锁模运转也难以稳定。因此,有必要对这一现象进行深入的分析,下面将从振荡光通过工作物质时所获得的增益的情况出发来讨论这一问题,为了问题的直观性,这里不考虑工作物质中的像散。

当泵浦光为  $TEM_{00}$  模时,光在通过工作物质时的光强变化由文献[5]中(10)式表示,在小信号情况下,可表示为

$$\frac{dI_c}{dz} = \left[ \frac{2\sigma\tau\lambda_p\alpha_p P_{p0}}{hc\pi w_p^2} e^{-\alpha_p r^2 - (2r^2/w_p^2)} - \alpha_c \right] I_c \quad (13)$$

将(1)式代入(13)式,对光束横截面积分,得到功率变化

$$\frac{dP}{dz} = \left[ \frac{2\sigma\tau\lambda_p\alpha_p P_{p0}}{hc\pi} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{f(r, z, \varphi)}{w_p^2} e^{-\alpha_p r^2 - 2r^2/w_p^2} r dr d\varphi - \alpha_c \right] P \quad (14)$$

对于基横模激光束,将(2)式代入(14)式中,化简后得到

$$\frac{dP}{dz} = \left( \frac{2\sigma\tau\lambda_p\alpha_p P_{p0}}{hc\pi} \frac{e^{-\alpha_p r^2}}{w_p^2 + w_c^2} - \alpha_c \right) P \quad (15)$$

设入射光功率为  $p_0$ ,增益介质长度为  $L$ ,将(15)式对增益介质长度积分,得到出射光功率  $p_{out}$

$$p_{out} = p_0 e^{-\alpha_c L} \exp \left[ \int_0^L \left( \frac{2\sigma\tau\lambda_p\alpha_p P_{p0}}{hc\pi} \frac{e^{-\alpha_p r^2}}{w_p^2 + w_c^2} \right) dz \right] \quad (16)$$

对于高阶横模激光束  $TEM_{10}$  模,将(5)式代入(14)式中得

$$\frac{dP}{dz} = \left( \frac{2\sigma\tau\lambda_p\alpha_p P_{p0}}{hc\pi} \frac{e^{-\alpha_p r^2}}{w_p^2 + w_c^2} \frac{w_p^2}{w_p^2 + w_c^2} - \alpha_c \right) P \quad (17)$$

将上式对工作物质长度积分,得到出射光功率

$$p'_{out} = p_0 e^{-\alpha_c L} \exp \left[ \int_0^L \left( \frac{2\sigma\tau\lambda_p\alpha_p P_{p0}}{hc\pi} \frac{e^{-\alpha_p r^2}}{w_p^2 + w_c^2} \frac{w_p^2}{w_p^2 + w_c^2} \right) dz \right] \quad (18)$$

比较  $p_{c,at}$  与  $p'_{out}$ ,在(18)式中,由于指数项因子中的  $w_p^2/(w_p^2 + w_c^2) < 1$ ,所以总有  $p'_{out} < p_{out}$ ,即  $TEM_{10}$  模的增益低于  $TEM_{00}$  模的增益,同时,由于高阶横模的衍射损耗大于低阶横模,因此,在泵浦源为  $TEM_{00}$  模,并且泵浦源强度不大的情况下,不应出现钛宝石激光器的高阶横模振荡。从模式匹配的观点来看,这也是合理的。因此,钛宝石激光器的高阶横模的出现,一定与泵浦源模式的变化有关。

当泵浦光束为  $TEM_{10}$  模时,其非饱和增益系数由(6)式表示,在小信号情况下,令(7)式  $B$  中的  $P_c$  等于 0,得到通过增益介质时的光强变化率为

$$\frac{dI_c}{dz} = \left[ \frac{8\sigma\tau\alpha_p\lambda_p P_{p0}}{hc\pi w_p^4} r^2 e^{-\alpha_p r^2 - 2r^2/w_p^2} \cos^2\varphi - \alpha_c \right] I_c \quad (19)$$

将(1)式代入,并对横截面积分,得

$$\frac{dP}{dz} = \left[ \frac{8\sigma\tau\alpha_p\lambda_p P_{p0}}{hc\pi w_p^4} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f(r, \varphi, z) r^3 e^{-\alpha_p r^2 - 2r^2/w_p^2} \cos^2\varphi r dr d\varphi - \alpha_c \right] P \quad (20)$$

将基模归一化函数代入,得到  $TEM_{00}$  模的光通过增益介质时的功率变化为

$$\frac{dP}{dz} = \left[ \frac{2\sigma\tau\lambda_p\alpha_r P_{p0}}{hc\pi} \frac{w_c^2 e^{-\alpha_r z}}{(w_p^2 + w_c^2)^2} - \alpha_c \right] P \quad (21)$$

将上式对工作物质长度积分, 设入射光功率为  $p_0$ , 得到出射光功率  $p_{out1}$  为

$$p_{out1} = p_0 e^{-\alpha_c L} e^k \quad k = \int_0^L \frac{2\sigma\tau\lambda_p\alpha_r P_{p0}}{hc\pi} \frac{w_c^2}{(w_p^2 + w_c^2)^2} e^{-\alpha_r z} dz \quad (22)$$

将  $TEM_{10}$  归一化函数代入(20)式中, 得到

$$\frac{dP}{dz} = \left[ \frac{6\sigma\tau\lambda_p\alpha_r P_{p0}}{hc\pi} \frac{w_p^2 w_c^2 e^{-\alpha_r z}}{(w_p^2 + w_c^2)^3} - \alpha_c \right] P \quad (23)$$

将上式对工作物质长度积分, 设入射光功率为  $p_0$ , 得到出射光功率  $p'_{out1}$  为

$$p'_{out1} = p_0 e^{-\alpha_c L} e^{k'} \quad k' = \int_0^L \frac{6\sigma\tau\lambda_p\alpha_r P_{p0}}{hc\pi} \frac{w_c^2 e^{-\alpha_r z}}{(w_p^2 + w_c^2)^2} \frac{w_p^2}{(w_p^2 + w_c^2)} dz \quad (24)$$

将(22)式与(24)式比较来看,  $p_{out1}$  与  $p'_{out1}$  的不同之处在于指数因子  $k$  和  $k'$  的不同, 它们的大小决定了  $TEM_{00}$  模和  $TEM_{10}$  模振荡光束在通过工作物质时所能获得的增益的大小; 直接比较  $k$  和  $k'$  的大小不太直观, 下面将用数值计算来讨论。

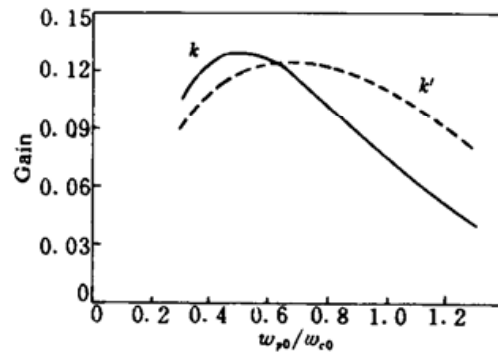


Fig. 2 Gain curve. The pump beam within the gain medium is  $TEM_{10}$  mode. The solid curve represents the gain of the  $TEM_{00}$  laser beam and the dashed curve represents the gain of the  $TEM_{10}$  laser beam

$$P_{p0} = 25 \text{ W}, \lambda_p = 514.5 \text{ nm}, \alpha_r = 1.2 \text{ cm}^{-1}, \\ L = 20 \text{ mm}, z_1 = z_2 = 10 \text{ mm}, w_{c0} = 0.04 \text{ mm}$$

在图 2 中, 利用(22)和(24)式, 计算了在  $w_{c0}$  一定的情况下,  $k$  和  $k'$  随  $w_{p0}/w_{c0}$  的变化曲线, 因为  $w_{c0}$  不变, 因此横轴实际反应了泵浦光束的大小, 也即泵浦镜焦距的大小。其中实线对应  $k$ , 虚线对应  $k'$ ; 由图中可以看出, 当泵浦光束比较大时, 出现了  $k' > k$  的情况; 它表明, 在泵浦光束为  $TEM_{10}$  模的情况下, 振荡光束通过增益介质时,  $TEM_{10}$  模有可能会获得比  $TEM_{00}$  更大的增益, 从而导致激光器的多横模运转, 这与泵浦模为  $TEM_{00}$  模的情况有很大的不同。由图上还可以看出,  $k$  和  $k'$  的大小是随  $w_{p0}$  的大小变化的, 其峰值位置互相错开, 因此可以通过适当选取短焦距的泵浦镜, 使得在增益曲线上满足  $k > l > k'$  (其中  $l$  代表腔中的损耗系数), 则可以抑制高阶振荡横模的产生。

总之, 在纵向泵浦钛宝石激光器中, 泵浦源的横模特性对于保证器件的高效, 稳定运转具有非常重要的意义, 这一点对于其它的纵向泵浦固体激光器也是同样的, 例如用半导体激光器作为泵浦源的固体激光器。其影响主要表现在多横模的泵浦光束将导致器件效率明显降低, 输

出特性变坏;这时,泵浦聚焦镜的选择就显得特别重要,从以上讨论可以看出,通过适当选择短焦距的泵浦镜,可以从一定程度上弥补泵浦源的高阶横模所带来的不利影响,使器件的总体效率得到提高。

### 参 考 文 献

- 1 P. F. Moulton. An investigation of the Co : MgF<sub>2</sub> laser system. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1985, QE-21 : 1582~1595
- 2 D. G. Hall, R. J. Smith, R. R. Rice. Pump-size effects in Nd : YAG lasers. *Appl. Opt.*, 1980, 19 : 3041~3043
- 3 L. W. Casperson. Laser power calculation; sources of error. *Appl. Opt.*, 1980, 19 : 422~434
- 4 W. P. Risk. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, B5 : 1412~1423
- 5 Anthony J. Alfrey. Modeling of longitudinally pumped CW Ti : sapphire laser oscillators. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1989, QE-25 : 760~766
- 6 蔡伯荣. 激光器件. 长沙: 湖南科学出版社, 1988. 107

## Influence of the Pump Beam Mode in a Logitudinally Pumped CW Ti : sapphire Laser

Wang Yimin Liu Yupu Zhang Yinghua

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

**Abstract** In this paper the influence of the pump beam mode on the efficiency and beam mode of a CW Ti : sapphire laser is discussed. The results have been compared with experiments.

**Key words** Ti : sapphire, laser, longitudinally pump