

大功率激光二极管侧面泵浦固体激光器 谐振腔的优化设计

石 岩¹ 李 松¹ 陈义红²

(¹ 武汉大学电子信息学院 430079; ² 湖北光通光电系统有限公司 430074)

提要 运用激光腔的矩阵理论,推导出了含热厚透镜的平-平腔的 G 参数及热稳条件,用图示法对定腔长的谐振腔进行优化设计,并用优化的参数进行了相关实验。当输入电功率为 450W 时激光器的输出功率为 50W,电-光转换效率 11.1%,光-光效率达到 30%,功率稳定度优于 $\pm 2\%$ 。

关键词 激光二极管 热不灵敏腔 失调灵敏度

Resonator Design Optimization Of High Power Laser Diode Side - Pumped Solide Laser

Shi Yan¹ Li Song¹ Chen Yi Hong²

(¹ School of Electronic Information, Wuhan University; ² Huibei Guangtong Photoelectric System Co., Ltd)

Abstract By using the matrix theory of the laser resonators, the G parameters of plane - plane cavity and the condition of thermal thick len inside laser resonators are given. The optimistic design of laser resonator is made to obtain by using the graphic method. Then the experiments are carried out with the designed resonators parameters. When input electric power is 450W, its output laser power is up to 50W, The electro - optic efficiency is 11.1% and the light to light conversion efficiency is up to 30%. The power stability is $\pm 2\%$.

Key words laser diode thermal insensitive resonator misalignment sensitivity

大功率激光二极管侧面泵浦固体激光器以转换效率高,工作寿命长,结构紧凑和光束质量高等特点而倍受青睐,应用十分广泛。而谐振腔的设计既影响激光器的运转又影响最大功率的获得。本文在给定腔长的前提下,利用热稳腔的三个设计原则对谐振腔进行了优化设计。相关实验表明:经优化设计的激光器不仅有很高的功率稳定度,且电光、光光转换效率都达到了较为理想的水平。

谐振腔的稳定性区的分析

我们设计的是平均功率 50W 的 Nd:YAG 脉冲激光器。设计谐振腔的出发点是使本征基模与泵浦光分布集中处尽可能相互重叠,以实现高效率的基模匹配。虽然非稳腔具有很大的模分辨能力和模体积,但其调整要求高,单程损耗大,可靠性差,受环境及镜腔变形等因素影响大,而且非稳腔一般为环状输出,使得远场图样总表现为一定大小和几何分布形状,光束质量较差。所以在我们设计的 50W 功率的激光器中,选择采用稳定腔。加入声光 Q 开关只是对腔的光程长度有所改变,腔的稳定区的计算与

不加声光器件的方法是一样的。由于泵浦 YAG 棒的激光二极管具有较高的功率,YAG 棒具有热透镜效应。因激光器腔长较短,具有热焦距效应的晶体棒可等效为一个焦距 f 随泵浦功率 P 变化的热厚透镜,如图 1 所示。 M_1, M_2 是平镜, l 为激光棒的长度, h 表示热厚透镜的主平面 H_1 (或 H_2) 到棒的对应端面之间的距离。具有热透镜效应的晶体棒焦距为 f ,其倒数 D 为晶体棒的屈光度。晶体棒的主平面距对应平镜面的距离分别为 l_1, l_2 。根据激光腔的矩阵理论图 1 所示的谐振腔内元件从 M_1 到 M_2 的单程光线传输矩阵为:

$$M' = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{l_2}{f} & l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{l_1}{f} \end{pmatrix} \quad (1)$$

谐振腔的 G 参数为

$$G_1 = 1 - (l_2/f); G_2 = 1 - (l_1/f) \quad (2)$$

根据高斯光束传播理论可知热透镜靠近 M_1 主

平面的棒光斑半径 w_3 为:

$$w_3 = \frac{|l_1 + l_2 - 2b|}{\sqrt{(1 - G_1 G_2) G_1 G_2}} \quad (3)$$

根据上式可做出 l_2/l_1 取不同值时靠近镜面 M_1 处激光光斑随 $D_n = l_2/f$ 的变化的曲线(图 2)。

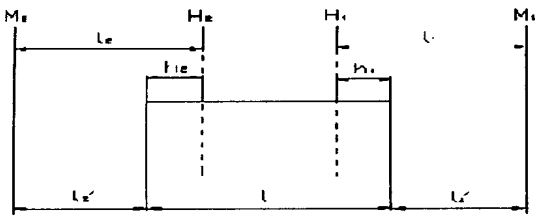


fig. 1 plane - plane cavity with thermal thick

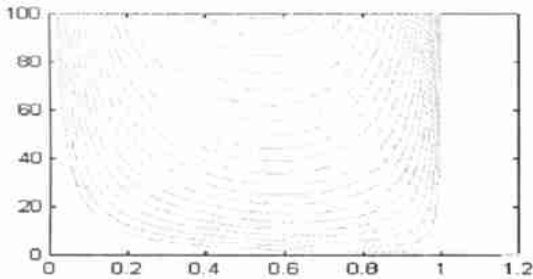


fig. 2 change curve of the rod spot len with the change of D_n

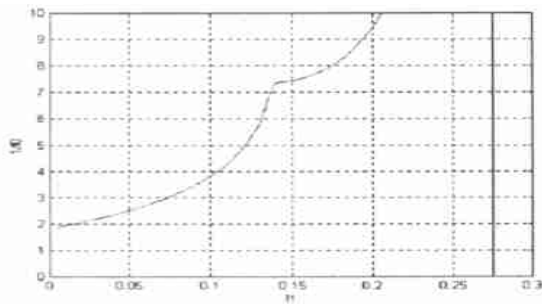


fig. 3 the distribution of thermal thick len with thermal insensitive

由图 2 可见:随着 A 值的减小,棒光斑的最小值 w_{30} 变大。棒光斑值越大,模体积越大,激光的输出功率越大^[1],这是我们所追求的。但随着 A 值的减小,棒光斑的最小值附近的值变化加剧,也就是说,热稳定区宽度 $(1/f)$ 变窄,根据(3)式可得^[2]

$$\left| \left(\frac{1}{f} \right) \right| = \left| \frac{1}{l_2} \right| \quad (4)$$

热扰分析

在二极管泵浦的固体激光器中,工作物质的热效应大为降低,在相同的注入功率情况下,二极管泵浦的热焦距要比灯泵浦的热焦距下降很多。但由于量子损耗的存在,激光二极管泵浦固体激光器的腔

长比灯泵浦固体激光器的腔长要短得多,因此,对热效应也就敏感得多。所以对于二极管泵浦固体激光器来说,热效应仍然是个很严重的问题。热透镜效应主要引起模尺寸和光束发散角改变,在设计激光器的谐振腔时,尽量采用对热扰不十分灵敏的谐振腔。根据计算,棒光斑的最小值对应于热扰动的最稳定区域,可表示为:

$$\frac{dw_3}{d(1/f)} = \frac{dw_3}{dD} = 0 \quad (5)$$

进一步推导得:

$$D = \frac{1}{2} (A + 1 \pm \sqrt{A^2 - 1})$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{l_2}{l_1} + 1 \pm \sqrt{\left(\frac{l_2}{l_1} \right)^2 - 1} \right] \quad (6)$$

$$\frac{1}{f_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \mu \sqrt{\frac{1}{N_1^2} - \frac{1}{l_2^2}} \right) \quad (7)$$

理论上,谐振腔存在两个热不灵敏点。根据上面分析的稳定性条件:取 $(l_2/l_1) > 1$,其稳定区 D 值范围为:

$$\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} > D > \frac{1}{l_1}, \quad \frac{1}{l_2} > D > 0 \quad (8)$$

所以有:

$$\frac{1}{f_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} - \sqrt{\frac{1}{N_1^2} - \frac{1}{l_2^2}} \right) \quad (9)$$

由(9)式作图 3。可见:谐振腔中热稳点随 l_1 的变化而变化。相应的谐振腔在热扰不灵敏条件下的 G 参数为:

$$G_{01} = -\frac{l_2}{2} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \pm \sqrt{\frac{1}{N_1^2} - \frac{1}{l_2^2}} \right) \quad (10 a)$$

$$G_{02} = \frac{l_2}{2} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \mu \sqrt{\frac{1}{N_1^2} - \frac{1}{l_2^2}} \right) \quad (10 b)$$

在热扰不灵敏条件下,应有

$$2 G_{01} G_{02} = 1 - \frac{l_1}{l_2} = 1 - \frac{1}{A} \quad (11)$$

将(11)式代入(3)式可得到棒的主平面上的最小光斑为 $w_{30}^2 = (2 /) |l_2|$ 。根据(4)式可得稳定区的宽度与棒光斑的关系为

$$:w_{30}^2 = \frac{2}{|(1/f)|^2}$$

当棒中的光斑尺寸对焦距变化不敏感时,棒中的模体积与稳定区的宽度以及与输入的泵浦功率的变化范围成反比。

失调灵敏度:

激光器由于环境温度的变化,常出现的故障之

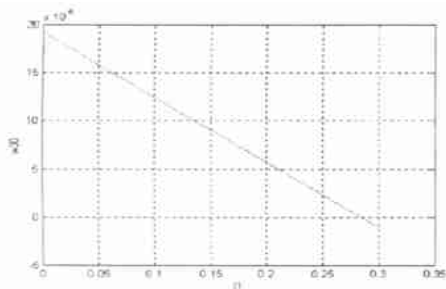


fig. 4 the minimum spot of the rod

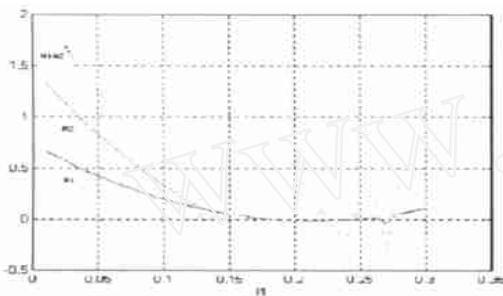


fig. 5 misalignment sensitivity

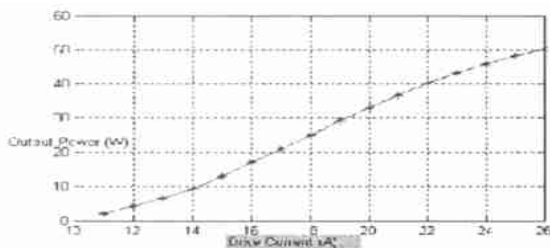


fig. 6 the experiment result of laser

一是激光器的光学谐振腔失调。就是指:在室温下校正好的光学谐振腔的平行性,由于环境温度的变化和长时间工作热效应的影响,光学谐振腔的平行性会受到破坏,引起激光器输出阈值上升,造成输出光束的横向位移和角倾斜,使损耗增加,输出功率降低。引起光学谐振腔失调的原因很多,温度的变化和结构设计不合理是其主要的原因。谐振腔的 M_1, M_2 失调的失调灵敏度参量 D_1, D_2 表示式为^[3]

$$D_1^2 = -b \frac{\sqrt{G_2}}{\sqrt{G_1}} \frac{1 + G_1 G_2}{\sqrt{(1 - G_1 G_2)^3}} \quad (12a)$$

$$D_2^2 = -b \frac{\sqrt{G_1}}{\sqrt{G_2}} \frac{1 + G_1 G_2}{\sqrt{(1 - G_1 G_2)^3}} \quad (12b)$$

若两面反射镜都失调,则谐振腔总的失调灵敏度参量 D 表示为

$$D^2 = -b \frac{(1 + G_1 G_2)}{\sqrt{(1 - G_1 G_2)^3}} \frac{|G_1 + G_2|}{\sqrt{G_1 G_2}} \quad (13)$$

根据 (12), (13) 式作图 5。此图反应了腔的失调

特性随 l_1 变化而变化。理论分析和实验研究表明,失调灵敏度参量 D 能较准确地说明光腔的失调特性。 D_1 或 D_2 越小,则因光腔反射镜失调所引入的附加损耗也越小,光腔对失调就越不灵敏。腔的优化设计原则是:(一)棒光斑最小值 w_{30} 尽可能大,以获得大的模体积,从而使激光器获得高效率。(二)腔模体积对热焦距的变化尽可能不灵敏。(三)腔几何扰动引起的失准直灵敏度 D 尽可能小。通过分析以上各图形可知,上述三种关系随 l_1 变化而呈现出复杂的变化,平衡各种关系我们得到 l_1 取值为 0.12m 附近的情况下谐振腔既满足稳定条件,对热扰不灵敏,而且又兼顾了腔的失调特性。

实验与分析

热透镜效应可以在泵浦(受热)情况下进行实测。实验中,我们采用直接测量方法测量对激光器进行了热焦距的测量。He - Ne 激光器先经扩束,然后通过二极管侧面泵浦的 Nd:YAG 晶体出射的光,用一接收屏来接收光斑,通过移动接收屏的前后位置来寻找焦点位置。从棒中心到会聚的最小光斑的距离即近似为热焦距 f 。这种方法简便但测量误差较大。为提高精度,采取多次测量取平均值的方法,得到其电功率 $P_{电}$ 与其焦距 f 的数据如下:

泵浦功率 $P_{电}(w)$	270	324	360	396	450
热焦距 $f(mm)$	660	580	490	420	370

此次实验我们采用 3 个大功率激光二极管阵列以 120° 分布排在 Nd:YAG 激光棒周围,从侧面将二极管激光能量直接耦合到激光晶体上。掺杂浓度为 0.6% 的 Nd:YAG 晶体棒的几何尺寸为 $3mm \times 63mm$,棒的两端面为平面,镀膜。输出镜的 $T = 20\%$,加入声光 Q 开关,激光二极管的冷却水温设定在 25° 。注入二极管的电压为 18V,DC,电流限制在 25A 以内。图 6 是此次实验用光功率计探测的输出功率结果,图中可看出激光的最大功率达到 50W,电 - 光转换效率为 11.1%。光 - 光转换效率为 30%。且稳定度为 $\pm 2\%$ 。

结论:若要进一步提高激光二极管侧面泵浦固体激光器稳定输出功率,又不使谐振腔过长,一种方法就是在腔内插入一定倍数的望远镜,此法可以减短实际腔长,但腔的结构复杂,调整难度大,既增加了损耗,又易对腔内元件造成伤害;另一种办法是采用大高斯镜的稳定腔(GRMSR),利用 GRM 作为耦合输出和选模元件。(参考文献 下转第 96 页)

选用的计算方法也不同。本文讨论的物理过程,由于变量 n 和 q 都存在突变的过程,这就要求选用的计算方法在具备足够计算精度的前提下,迭代过程必须采用小步长。通过对计算方法的对比分析,我们认为,用小步长 ($t = 5\text{ps}$) 的龙格-库塔法对上述一阶微分速率方程组进行迭代,其计算精度能够满足要求,而且计算过程相对简洁。迭代过程的计算机编程,在此不作讨论。在具体叠代计算过程中,如何合理选取激发态粒子数浓度和腔内光子数密度的初始值 n_0, q_0 , 是获得符合物理意义的正确数值解的关键。如果取 $n_0 = 0$, 或 $q_0 = 0$, 数值求解方程组所得的结果没有任何物理意义,因为激光信号不能从零信号放大而成。但如果 n_0 和 q_0 取一个较大的初始值,则又与激发过程的实际物理情况矛盾,噪声信号是一个微量。所以合理的取值原则应是: $n_0 > 0, q_0 > 0$; $n_0 > 0, q_0 > 0$ 。因为在激发过程初始态,谐振腔内肯定存在激发态粒子和光子的热噪声。

图 1 给出了在不同泵浦速率 (I_p / aN) 条件下,迟豫时间 τ_c , 激发态粒子数 n , 以及输出功率 P 随时间变化的数值计算结果。很明显:泵浦脉冲的泵浦速率越大,DFDL 激光输出脉冲个数越多;在泵浦过程中,DFDL 激光腔迟豫时间 τ_c 存在一个独特的剧烈变化过程,我们称之为自调 Q 效应,这种自调 Q 效应能有效地压缩激光脉冲宽度。在理想条件下,本文实验条件产生单脉冲输出的阈值泵浦条件为 $(I_p / aN) = 3.0 \times 10^{25} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$; 而输出一个、二个、三个、四个脉冲所需的泵浦能量的比值为 $1:1.25:1.5:1.75$; 而在单脉冲输出区,当泵浦速率由阈值 $3.0 \times 10^{25} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 增加到双脉冲阈值 $4.0 \times 10^{25} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,激光输出脉冲宽度可由 100ps 压缩到 20ps 左右。这个结果告诉我们,泵浦脉冲的泵浦速率大小,在改变输出脉冲个数的同时,也改变输出脉冲的宽度。因此,在实验过程中,如果泵浦能量存在波动,想获得稳定的 DFDL 激光脉冲输出是不可能的。

掺 R6G 染料溶-凝胶硅分布反馈激光器实验装置参见文献^[5], 激光增益介质 R6G 染料的掺杂浓度约为 $6.5 \times 10^{-3} \text{ M/L}$ 。

图 2 是用快响应雪崩管 (Hamamatsu R1193

-U) 探测到的溶凝胶硅固态 DFDL 激光输出脉冲典型时序迹线。图 2 a, b, c, d 分别是单个、二个、三个、四个激光脉冲输出的情况,与数值分析结果能够完全对应。但由于测量所用的雪崩管响应速率不够, (上升时间 300ps , 下降时间 160ps), 无法给出脉冲与脉冲之间完全分离的输出脉冲序列。而脉冲迹线显示的脉冲宽度约 0.6ns , 则是雪崩管测量系统时间分辨极限的反映, 实际脉冲宽度应该更窄。对输出脉冲连续多次测量对比后, 我们发现, 固态溶凝胶硅 DFDL 激光输出脉冲形状的再现性很差, 输出脉冲形状具有很大的随机性。我们认为这主要是由泵浦激光脉冲能量的不稳定造成的, 因为实验用的泵浦激光 (N_2) 脉冲能量的起伏达到 $\pm 10\%$ 。

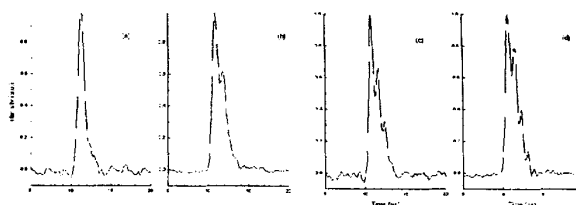


图 2 固态溶凝胶硅 DFDL 输出脉冲形状
(a) 一个脉冲 (b) 二个脉冲 (c) 三个脉冲 (d) 四个脉冲

结 论

本文直接用数值解析一阶微分速率方程组的方法,对掺 R6G 染料的固态溶-凝胶硅分布反馈激光器的时间特性进行了数值模拟。结果表明,固态溶-凝胶硅 DFDL 的时间特性,完全可以通过数值求解其激发态粒子数浓度 n 和谐振腔内光子数密度 q 的一阶微分方程组,得到定性的结论。

感谢香港中文大学物理系朱小磊博士研究生和罗荫权教授在实验验证上提供的帮助及有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] H. Kogelnik et al, *Appl. Phys. Lett.* 1971, 18, 152
- [2] M. Marda, et al, *IEEE J - Quantum Electronics*, 1997, 33, 2146
- [3] Zs. Bor, *IEEE J - Quantum Electr.* 1980, QE- 16, 517
- [4] S. R. Chinn, *Opt. Commun.* 1976, 19, 208
- [5] X. L. ZHU et al, *Appl. Phys. Lett.* 2000, 77, 2647

(上接第 76 页)

参 考 文 献

- [1] 周炳琨等, 激光原理, 国防工业出版社, 2001

- [2] S. D. Silvestri et al, *Opt. Commun.* 1986, 57(5) :339

- [3] 卢亚雄等, 激光束传输与变换技术, 电子科技大学出版社, 1999:177