

激光二极管端面抽运的 $1.34 \mu\text{m}$ Nd :YVO₄ 平凹腔型激光器

尚连聚[†]

(曲阜师范大学物理系,曲阜 273165)

(2002 年 12 月 20 日收到 2003 年 1 月 23 日收到修改稿)

理论上分析了端面抽运的 $1.34 \mu\text{m}$ Nd :YVO₄ 平凹腔型激光器的各项参数, 实验上实现了 LD 端面抽运的 $1.34 \mu\text{m}$ Nd :YVO₄ 平凹腔型激光器的运转。

关键词: 固体激光, Nd :YVO₄ 晶体, 平凹腔

PACC: 4255R, 4260B, 4260D

1. 引言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器具有高效率、紧凑、稳定、长寿命和光束质量高等优点, 在军事、工业、医学和科研等领域已经得到了广泛应用^[1]。在适合激光二极管抽运的众多激光晶体中, Nd :YVO₄ 晶体因其一系列优良的性质^[2]而备受人们青睐, 它已经成为激光二极管抽运中小功率激光器的理想工作材料^[3]。Nd :YVO₄ 晶体 $^4\text{F}_{3/2} - ^4\text{I}_{11/2}$ 能级跃迁可产生 $1.34 \mu\text{m}$ 的激光, 在该波长处的受激发射截面是 $(6 \pm 1.8) \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 与 Nd :YAG 晶体在 $1.06 \mu\text{m}$ 处的发射截面 $(4.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2)$ 相当, 容易实现 $1.34 \mu\text{m}$ 激光振荡。 $1.34 \mu\text{m}$ 波段是人眼安全区, 同时与硅光纤低色散和低损耗的波长一致, 因此 $1.34 \mu\text{m}$ 区域的激光在激光医学、光纤通信、光传感定位和中红外参量振荡的抽运源等领域有广阔的应用前景^[1,4]。本文在详细分析各项参数的基础上成功设计了 LD 端面抽运的 $1.34 \mu\text{m}$ Nd :YVO₄ 平凹腔型激光器。

2. 实验装置

如图 1 所示, 实验中所采用的抽运光源 LD 是

美国 SDL 公司生产的 SDL-3460-P6 型号, 带光纤耦合输出, 光纤输出口径为 $600 \mu\text{m}$, 光纤数值孔径为 0.37, LD 最大输出功率为 16W, 峰值波长在 808.9 nm 处, 光学耦合系统焦距约为 35 mm , LD 光束经光学耦合系统后束腰半径为 $300 \mu\text{m}$, 平凹镜 M_2 的曲率半径为 100 mm , Nd :YVO₄ 晶体由中科院物理所生长, 晶体尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 通光方向长度为 5 mm , Nd :YVO₄ 晶体采用 a 轴切割, Nd 离子掺杂浓度约为 0.7%, 实验中将 Nd :YVO₄ 晶体固定在紫铜夹上, 紫铜夹用净化了的水冷却, 冷却水的温度采用 HX-10555 型恒温循环器进行控制, 温度可在 $10-40^\circ\text{C}$ 之间调节, 控制精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$; 为了保证晶体与紫铜夹紧密接触, 晶体侧面用铟片包裹, 铟片的导热性能很好, 这样能使晶体上的热量迅速传给紫铜夹并让循环水带走, 整个水冷装置固定在五维调节架上, 以便能准确调节晶体位置, 保证抽运光相对于 Nd :YVO₄ 晶体呈 π 偏振, 这样抽运更为有效; 为了抑制 Nd :YVO₄ 晶体中增益最强的 $1.06 \mu\text{m}$ 谱线起振, 平平镜 M_1 的镀膜除满足对 $1.34 \mu\text{m}$ 全反和 808 nm 高透外, 还要同时对 $1.06 \mu\text{m}$ 高透, Nd :YVO₄ 晶体两端面镀 $1.34 \mu\text{m}$ 增透膜, 以减小腔内的反射损耗; 平凹镜 M_2 镀膜对 $1.34 \mu\text{m}$ 光的透过率为 5.3%, 同时对 $1.06 \mu\text{m}$ 高透, 它作为 $1.34 \mu\text{m}$ 激光的输出镜。

[†]Email: shanglianju@yahoo.com.cn.

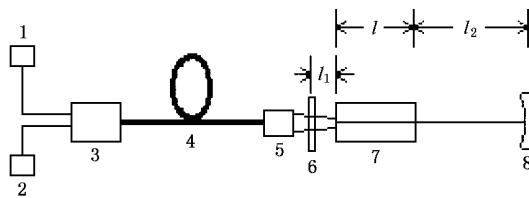


图 1 LD 抽运的 $1.34 \mu\text{m}$ Nd :YVO₄ 激光器的实验装置 1. LD 驱动电源 2. LD 温控器 3. LD 4. LD 耦合光纤 5. 光学耦合系统 6. 平面镜 M_1 7. Nd :YVO₄ 晶体 8. 平凹镜 M_2

3. 激光器参数的理论分析

3.1. 谐振腔参数的选取

对于平凹腔结构的谐振腔,为保证激光器工作在稳区范围之内,必须使平面镜 M_1 和平凹镜 M_2 之间的距离小于平凹镜 M_2 的曲率半径^[5],实验中 M_2 的曲率半径 $R = 100 \text{ mm}$ 。图 1 中 l_1 和 l_2 的选取依据以下原则:1) l_1 要尽可能小,因为振荡光的束腰靠近平面镜 M_1 ,但 l_1 太小不利于平面镜 M_1 和激光晶体调节架的调节移动,所以 l_1 一般在 5—10 mm 内选取;2) l_2 要尽可能大,因为增大 l_2 就相当于增大了谐振腔的激光模体积,便于获得高功率激光输出;3) l_1 和 l_2 的取值要满足谐振腔的稳态振荡条件,也就是要求谐振腔是稳定腔。

现在,看一看谐振腔的稳态振荡条件。根据谐振腔的有关理论^[6,7],旁轴光线在腔内往返一周时的变换矩阵(往返矩阵)为

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

谐振腔的稳态振荡条件为 $\frac{|A + D|}{2} < 1$,式中 n 为激光晶体对振荡光的折射率, l 为激光晶体的通光方向长度。根据谐振腔的稳态振荡条件,采用 C 语言编制程序,可以利用计算机画出平凹腔的稳区图。我们以 l_1 和 l_2 为坐标变量作稳区图。作图时取 $l = 5 \text{ mm}$, $n = 2.15$, $R = 100 \text{ mm}$ 。图 2 为相应的平凹腔的稳区图。

根据以上分析,本文实验中选取 $l_1 = 7 \text{ mm}$, $l_2 = 53 \text{ mm}$ 。

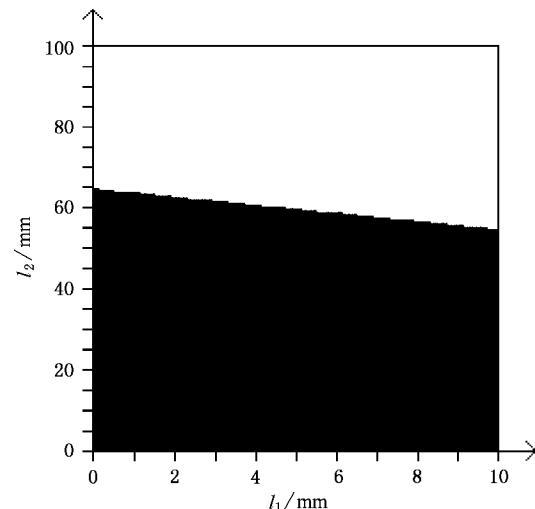


图 2 平凹腔的稳区图

3.2. 振荡光腔模尺寸的计算

由于激光晶体通光方向长度比较短,所以振荡光在激光晶体各处的光斑半径 $\omega_s(z)$ 近似等于振荡光束腰尺寸 ω_{0s} 的大小。平凹腔束腰尺寸的计算公式^[3,6]为

$$\omega_{0s} = [\lambda^2 L (R - L) \pi^2]^{1/4},$$

式中 λ 为振荡光波长; $L = l_1 + l_2 + l$, 为谐振腔的腔长。把数据代入可计算出 ω_{0s} 的值为 $143 \mu\text{m}$ 。束腰尺寸 ω_{0s} 的值作为考虑腔模匹配时抽运光模尺寸选取的依据。

3.3. 抽运光腔模尺寸的选取

抽运光在激光晶体各处的光斑半径 $\omega_p(z)$ 也近似等于抽运光束腰尺寸 ω_{0p} 的大小。 ω_{0p} 的选取依据重叠效率 η_c 随 ω_{0p} 变化的关系曲线。定义重叠效率 $\eta_c = \frac{J_1^2}{J_2}$, 它决定了抽运光与振荡光的空间重叠程度,其中 J_1 和 J_2 的简化表达式^[8]分别为

$$J_1 = \frac{2}{\pi L (\omega_{0p}^2 + \omega_{0s}^2)}, J_2 = \frac{4}{\pi^2 \omega_{0s}^2 L^2 (2\omega_{0p}^2 + \omega_{0s}^2)}.$$

根据以上两式和重叠效率的定义式,图 3 给出了抽运光斑 ω_{0p} 的大小对重叠效率 η_c 的影响情况。在 $\omega_{0s} = 143 \mu\text{m}$ 的情况下, ω_{0p} 的取值要适当,如果 ω_{0p} 太小,不但容易打坏激光晶体,而且由于发散角大而导致耦合效率较低;如果 ω_{0p} 太大,重叠效率也将下降,因为 ω_{0p} 较大时,抽运能量不能有效耦合到振荡

光模体积内. 根据图 3 所反映的规律, 在实验中我们选取 ω_{0p} 的值为 $300 \mu\text{m}$, 选取这样一个数值, 虽然重叠效率低了些, 但由于 ω_{0p} 的值较大, 激光器工作过程中抽运光带来的热效应明显减小了, 这样不但保证了激光器工作的稳定, 而且激光晶体的使用寿命也将相对延长.

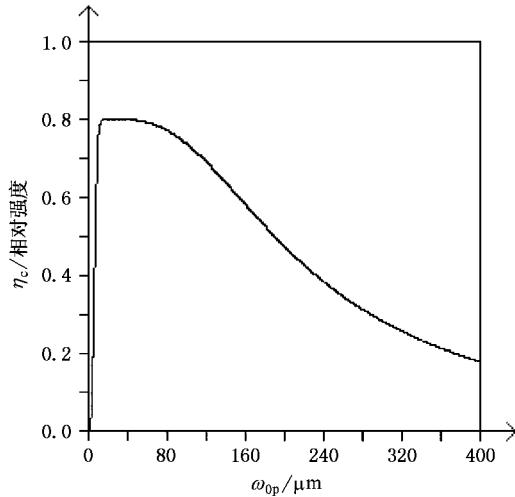


图 3 重叠效率 η_c 与抽运腰斑 ω_{0p} 的关系曲线

3.4. 抽运光焦点位置的确定

抽运光焦点在激光介质中的位置(焦点至前端面的距离)直接影响抽运阈值的大小, 我们根据这种影响关系确定抽运光的焦点位置. Nd:YVO₄ 晶体的辐射机理是典型的四能级过程, 根据理想四能级系统的速率方程理论, 激光器的抽运阈值^[8]为

$$P_{th} = \frac{h\nu_p}{\eta_i \cdot \eta_a} \cdot \frac{1}{\sigma\tau_f} \cdot \frac{\delta}{2} \cdot \frac{n}{L} \cdot \frac{1}{J_1},$$

其中 $h\nu_p$ 为抽运光子能量; η_i 为光学系统的耦合效率; η_a 为增益介质的吸收效率; σ 为受激发射截面; τ_f 为激活介质的荧光寿命; δ 为腔的往返损耗; n 为激光晶体对振荡光的折射率; L 为腔长; J_1 是表示抽运模与振荡模相互重叠的积分^[4]. η_a 和 J_1 的理论表达式分别为

$$\eta_a = 1 - \exp(-\alpha_p \cdot l),$$

$$J_1 = \frac{2\alpha_p}{\pi I [1 - \exp(-\alpha_p l)]} \int_0^l \frac{\exp(-\alpha_p z)}{\omega_p^2(z) + \omega_{0s}^2} dz,$$

其中, α_p 为增益介质对抽运光的吸收系数; 通常抽运光光斑半径 $\omega_p(z)$ 满足 $\omega_p(z) = \omega_{0p} + \theta |z - z_{0p}|$, 式中 z_{0p} , θ 分别为抽运光的焦点位置、发散角.

激光器的抽运阈值公式表明, 抽运光焦点位置

存在一最佳值 $z_{0p,s}$, 使得激光器的抽运阈值最低. 根据抽运阈值公式, 通过数值积分可算出抽运光焦点位置 z_{0p} 对抽运阈值的影响, 如图 4 所示.

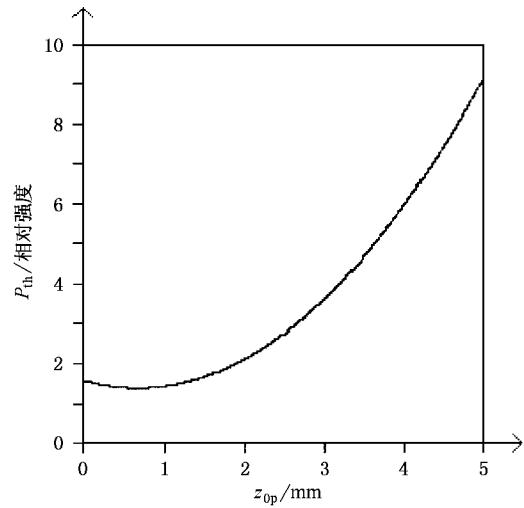


图 4 抽运阈值 P_{th} 与抽运光腰斑位置 z_{0p} 的关系曲线

从图 4 可以看出, 对于端面抽运方式, 在其他条件一定时, 存在一个使抽运阈值最低的 z_{0p} . 在本文给定的具体参数下, 通过数值计算可知, 图 4 所示的抽运光焦点最佳位置 $z_{0p,s}$ 的值为 0.7 mm .

4. 激光功率的测量方案

$1.34 \mu\text{m}$ 输出激光中含有抽运光成分, 通常采用加滤光片或三棱镜的方法除掉抽运光, 但滤光片不能完全滤掉抽运光成分, 三棱镜的损耗又比较大, 因此, 这两种方法均不能准确地测量 $1.34 \mu\text{m}$ 激光的输出功率. 我们采取了一种比较巧妙的方法, 准确地测量了 $1.34 \mu\text{m}$ 激光的输出功率. 测量方案如下: 1) 直接测量输出光的功率, 记为 P_1 , 功率 P_1 包括抽运光的功率 X_1 和 $1.34 \mu\text{m}$ 激光的功率 X_2 两部分, 即 $P_1 = X_1 + X_2$; 2) 在输出镜和功率测试设备之间放置一片谐振腔备用的平面镜片(该镜片对抽运光的透过率 $T_1 = 97.6\%$, 对 $1.34 \mu\text{m}$ 激光的透过率 $T_2 = 0.3\%$), 然后进行功率测量, 测得功率记为 P_2 , 功率 $P_2 = X_1 T_1 + X_2 T_2$; 3) 根据 P_1 和 P_2 的表达式, 可得 $1.34 \mu\text{m}$ 激光的输出功率 $X_2 = \frac{P_1 T_1 - P_2}{T_1 - T_2}$. 在实验中, 各种输入功率情况下的输出功率均采取以上方案进行测量. 测量过程中我们所采用的功率测试设备是美国产的 EPM-2000 双通道激光能量/功率比率

计,所用的功率探头型号为:①PM30V1,灵敏度为10mW,最大量程为30W,光谱适用范围为 $0.19\text{ }\mu\text{m}$ — $6.0\text{ }\mu\text{m}$,②PM3Q,灵敏度为0.01mW,最大量程为3W,光谱适用范围为 $0.19\text{ }\mu\text{m}$ — $11.0\text{ }\mu\text{m}$.

5. 实验结果与分析

1. 图5给出了激光器输出功率随输入功率变化的关系曲线.

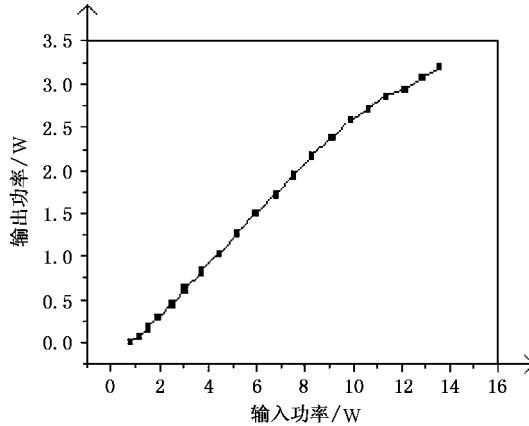


图5 输出功率随输入功率变化的关系曲线

2. 激光器的抽运阈值约为690mW,与理论估算值^[8]基本一致,在输入功率为13.30W时,得到最大输出功率为3.22W,光—光转换效率为24.2%,斜效率为25.5%.通过远场观察证明 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 激光输出为 TEM_{00} 模.

3. 我们对激光器的稳定性进行了测量,在激光输出功率为1.952W时,对激光器进行了30min的连续监测,激光输出功率不稳定度小于1%.

4. 图5表明,在输入功率大于11.2W时,激光输出功率开始出现饱和现象,可能是晶体的热效应造成的,也可能是Nd离子掺杂浓度过高引起的浓度猝灭效应;今后,我们会选择Nd离子浓度稍低、通光方向稍长的Nd:YVO₄晶体继续研究.

5. 在找到解决激光器热效应问题的良好方案之后,我们会减小抽运光的束腰尺寸 ω_{0p} ,以提高重叠效率 η_c .因此,激光输出功率能够进一步提高.

6. 笔者认为,我们的整体研究方案可为同类激光器的设计提供参考.

感谢郑义先生的悉心指导.

- [1] Zhang H L *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1579 (in Chinese) [张恒利等 1998 *物理学报* **47** 1579]
- [2] Wang C Q *et al* 1998 *Chinese Journal of Lasers* **25** 1129 (in Chinese) [王长青等 1998 *中国激光* **25** 1129]
- [3] Wang C Q *et al* 1996 *Acta Opt. Sin.* **16** 1393 (in Chinese) [王长青等 1996 *光学学报* **16** 1393]
- [4] Feng Y *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 335 (in Chinese) [冯衍等 2001 *物理学报* **50** 335]
- [5] Wang Q P,Zhang X Y,Zhao S Z 1993 *Laser Physics* (Jinan:Shandong University Press) p126 (in Chinese) [王青圃、张行愚、赵圣

之,激光物理学(济南:山东大学出版社)第126页]

- [6] Zhou B K,Gao Y Z,Chen J H 1995 *Principle of Laser* (Beijing:National Defense Industry Press) p29,65 (in Chinese) [周炳琨、高以智、陈家骅 1995 *激光原理*(北京:国防工业出版社)第29,65页]
- [7] Shang L J *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2015 (in Chinese) [尚连聚等 2002 *物理学报* **51** 2015]
- [8] He J L 1998 *Doctoral Dissertation* (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences) [何京良 1998 博士学位论文(中国科学院物理研究所)]

1.34 μm Nd :YVO₄ laser end-pumped by a diode-laser with flat-concave cavity type

Shang Lian-Ju

(*Department of Physics, Qufu Teachers' University, Qufu 273165, China*)

(Received 20 December 2002 ; revised manuscript received 23 January 2003)

Abstract

The parameters of 1.34 μm Nd :YVO₄ flat-concave cavity laser with an end-pumped mode are theoretically analyzed. The operation of 1.34 μm Nd :YVO₄ flat-concave cavity laser end-pumped by a diode-laser is achieved.

Keywords : solid-state laser, Nd :YVO₄ crystal, flat-concave cavity

PACC : 4255R A260B A260D