

# LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 1342 nm 激光实验研究

张恒利<sup>1</sup> 杨乾锁<sup>1</sup> 竺乃宜<sup>1</sup> 侯 玮<sup>2</sup> 许祖彦<sup>2</sup>

(1 中国科学院力学研究所高温气体动力学开放实验室 北京 100080)

(2 中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

**摘 要** 报道了采用不同腔长、不同透过率的输出镜及不同掺杂浓度的晶体时,激光二极管端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 1342 nm 激光的输出特性。对三种不同掺杂浓度的晶体的实验结果表明,输出为基横模,在输出 1W 时,稳定性皆优于 0.2%;掺杂浓度较高的晶体,在泵浦功率逐渐增加时更容易饱和。采用 0.5% 掺杂的晶体,最大获得 3 W 激光输出,斜效率 43.7%。

**关键词** 激光二极管, LD 泵浦, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体

## 1 引 言

Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体因具有吸收系数大,发射截面大,输出线偏振等优点而成为近年来研究最多的激光晶体之一。主要的研究工作集中在 1.06 μm;关于 1.3 μm 这条谱线研究相对较少,主要有:1976 年 Tukes<sup>[1]</sup> 利用氩离子激光研究了其在 1.3 μm 的激光特性,并得到了激光输出,斜效率 7%;1993 年, H.Plaessmann 等<sup>[2]</sup> 研究了 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 声光调 Q 1342 nm 的输出特性;1994 年, Bowkett 等<sup>[3]</sup> 用 400 mW 的 LD 泵浦获得 35.9 mW 1342 nm 激光输出,斜效率 22%,用钛宝石激光泵浦斜效率达到 40%;1996 年,王等<sup>[4]</sup> 在晶体吸收泵浦功率 515 mW 时,得到基频光 157 mW,斜效率 31.5%;1997 年 Conroy 等<sup>[5]</sup>,在用 LD 泵浦微片腔 Nd:YVO<sub>4</sub> 时,得到 105 mW 单频基频光输出;1998 年 8 月, A.Agnesi 等<sup>[6]</sup> 利用 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 得到 2 W 基频光输出。对 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 1.3 μm 这条谱线我们也已经做了一些研究工作,激光二极管泵浦连续波输出超过 2 W<sup>[7]</sup>,利用 KTP<sup>[8]</sup> 和 LBO<sup>[9]</sup> 晶体腔内倍频,分别获得超过 270 mW 和 500 mW 的 671 nm 红光输出。本文报道了采用不同腔长、不同透过率的输出镜及不同掺杂浓度的晶体时,激光二极管端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 1342 nm 激光的输出特性。

## 2 实验装置

我们采用普通的平凹腔对激光二极管泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 1342 nm 激光特性进行了实验研究,装置如图 1 所示。其中 1 为激光二极管;2 为二极管耦合输出的光纤;3 为耦合系统,该耦合系统由两个非球面镜组成,焦距约 30 mm,数值孔径约 0.22,物像比约 1.5:1,可微调,将光纤输出聚焦耦合到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,耦合效率约 90%;4 是 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,其前表面镀 808 nm 增透膜和对 1342 nm 的全反膜外,作为平凹谐振腔的输入镜,后表面镀 1342 nm 的增透膜,

收稿日期: 1999-10-18; 修改日期: 1999-12-06

以减小腔内损耗；5 是 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的紫铜夹具，Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体侧面用铝箔包起来，置于紫铜夹具内，并用循环水冷却以保证比较好的热接触，在实验过程中，Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体表面温度保持在略低于室温的水平；6 是耦合输出镜，凹面镀膜，曲率半径为 100 mm，对 1064 nm 透过率大于 60%；7 是滤波片，用以滤掉剩余泵浦光；8 为功率计；9 为对激光二极管进行温度控制的恒温循环器，温度在 10~40 ℃ 之间调节，控温精度 0.5 ℃，对于温度系数为 0.3 nm/℃、发射带宽 3 nm(半高宽)的激光二极管来说，这一精度可以满足其温度控制要求。

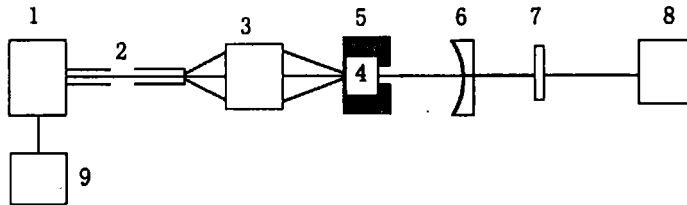


Fig.1 Experimental setup of the LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser.

1:LD; 2:fibre; 3:coupling system; 4: Nd:YVO<sub>4</sub> crystal; 5:copper heatsink; 6:output mirror; 7:filter; 8:power meter; 9:temperature controller.

### 3 实验结果

#### 3.1 基频光在不同腔长时的输出特性

在输出镜曲率半径一定的情况下，改变腔长就相当于改变振荡光的束腰。在其它条件相同，腔长分别为 24 mm、50 mm、80 mm 时，我们测量了基频光的输入输出关系，见图 2。图中点为实验点，直线为拟合曲线。在同样泵浦功率下，50 mm 腔长(也就是半共焦腔，此时腔模束腰最大)激光的输出和斜效率最大。

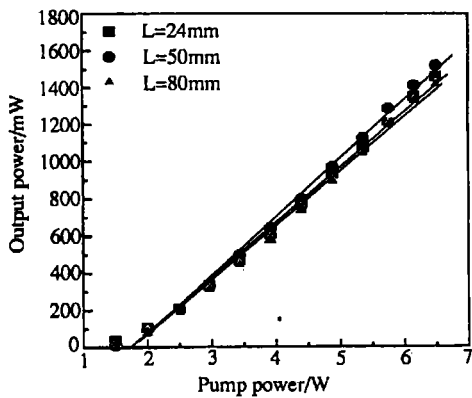


Fig.2 Output power versus pump power under different cavity length .

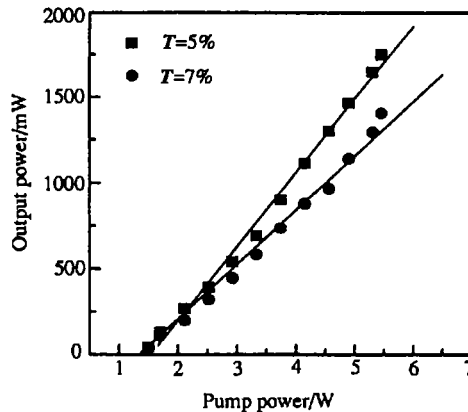


Fig.3 Output power versus pump power with T = 5% and T = 7% output couplers

#### 3.2 基频光在两种不同透过率的输出镜下的输出特性

由理论分析得出：在一定的泵浦功率下，输出耦合镜存在一个最佳透过率，这一最佳透过率随着泵浦功率的增加而增加，随着腔内损耗的增加而增加。在实验研究 1342 nm 激光输出特性时，对 0.5.at.% 掺杂浓度的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体，我们使用了两种不同透过率的耦合输出镜，对

1342 nm 的透过率分别为  $T = 5\%$  和  $T = 7\%$ 。其它条件相同。其输入输出特性如图 3 所示。

对于  $T = 5\%$  和  $T = 7\%$  的输出耦合镜来说, 基频光的斜效率分别为 43% 和 31%(相对于吸收泵浦功率), 阈值泵浦功率约 1.2 W。从斜效率的结果看来,  $T = 5\%$  的输出镜效果好得多。

### 3.3 不同掺杂浓度晶体的输出特性

基于同样的谐振腔型(平凹腔, 腔长  $\sim 50$  mm) 和输出镜透过率相同(凹面输出镜, 曲率半径 100 mm, 透过率  $T = 5\%$ ) 的情况下, 我们对三种不同掺杂浓度的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的输入输出特性进行了研究。晶体的掺杂浓度分别为: 1at.%、0.7at.% 和 0.5at.%, 其中前两种尺寸皆为 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 5 mm, 0.5at.% 掺杂的为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 5 mm, 通光长度都相同, 所镀膜系均相同。测量结果如图 4 所示, 并列于表 1 中。图 4 中横坐标为激光二极管光纤出口处的输出功率。从这些结果可以看出在这三种不同掺杂的晶体中, 掺杂浓度较低的两种晶体斜效率较高。

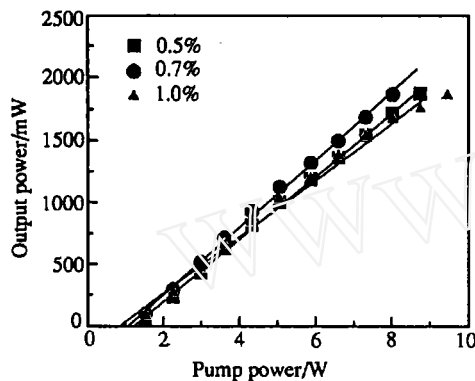


Fig.4 Output power versus pump power with different Nd doped YVO<sub>4</sub> crystals

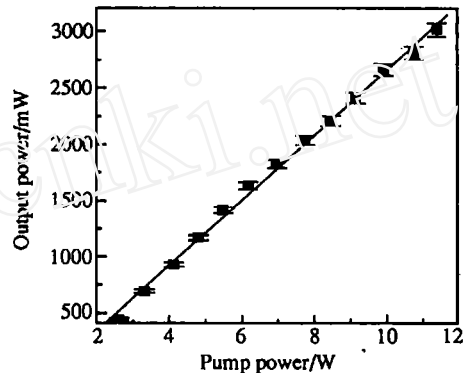


Fig.5 3 W at 1342 nm of LD end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser

表 1 LD 泵浦不同掺杂浓度 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 1342 nm 激光的实验结果

Sample	size(mm <sup>3</sup> )	slope efficiency(%)	stability at 1W in 15min.(rms)
1 at.% doped	3 $\times$ 3 $\times$ 5	23	0.19%
0.7 at.% doped	3 $\times$ 3 $\times$ 5	27	0.18%
0.5 at.% doped	3 $\times$ 3 $\times$ 5	26	0.16%

在输出 1 W 时, 测试了其功率的稳定性。时间 15 分钟, 每隔 30 秒记一次。由表中结果可以看出, 其输出稳定性都很好, 不稳定性均小于 0.2%(方均根), 其中斜效率的计算是相对于激光二极管光纤输出的泵浦功率。从图 4 中可以看出, 在泵浦功率大于 9 W 后, 1.0at.% 掺杂 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的输出开始趋向于饱和, 进一步增加泵浦功率, 输出增加减缓, 在泵浦功率增加到一定程度后, 不可避免的将出现输出下降的趋势, 并有可能使激光晶体破裂。

### 3.4 3 W 基频光输出特性

通过前面的实验研究, 采用半共焦平凹腔型, 腔长约 50 mm, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体采用掺杂浓度 0.5% 的晶体, 尺寸 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 5 mm, 如前所述, 一端面镀 808 nm 增透膜和 1342 nm 的高反膜作为输入镜, 另一端面镀 1342 nm 增透膜, 并采用曲率半径 100 mm, 透过率  $T = 5\%$  的输出镜。调整好激光器, 改变泵浦光功率, 得到 1342 nm 激光的输入输出特性曲线, 如图 5 所示。在泵浦功率(光纤出口处)11.4 W 时, 最大得到了 3 W 的基频光输出。转换效率 26.4%, 斜效率

35%。计及耦合系统 90% 的传输效率和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体前表面对泵浦光 10% 的反射损耗, 则斜效率达 43.7%。

### 3.5 基频光横模特性

在输出功率 1.5 W 时, 利用一维平移的小孔光阑和功率计, 在距离输出镜 500 mm 左右的位置, 我们测量了基频光的横模特性。小孔直径约 0.1 mm。小孔光阑置于一维平移台上, 平移精度 10 μm。图 6 为测量结果, 图中圆点为实验点, 曲线为高斯函数拟合曲线。可以看出, 在水平方向是单横模。

### 3.6 基频光发散角测量

我们对基频光的远场发散角也进行了测量。在距离输出镜  $Z_1$ 、 $Z_2$  的地方, 利用小孔光阑测量了基频光输出的光斑束腰。激光的远场发散角近似由下式决定 (测量处距输出镜的距离远大于腔长):

$$\theta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{Z_1 - Z_2} \quad (1)$$

其中,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为在  $Z_1$ 、 $Z_2$  处测得的光斑束腰。

在腔长分别为  $L = 24$  mm 和  $L = 50$  mm, 泵浦功率分别为 1.3 W、3.5 W 和 6 W 时, 测量了激光的横向分布, 并利用 (1) 式计算了基频光的远场发散角, 测量结果如表 2 所示。

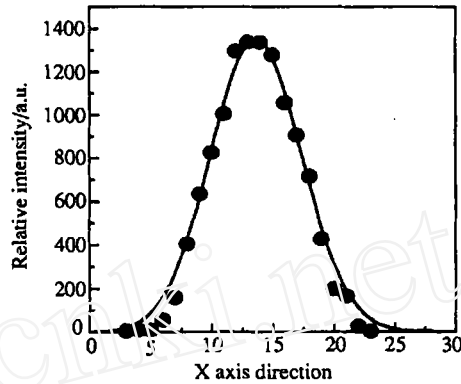


Fig.6 Beam profile of the laser light

表 2 基频光发散角测量结果

	$P = 1.3$	$P = 3.5$	$P = 6$
$L = 24$ mm	3.22	4.9	6.67
$L = 50$ mm	3.78	3.84	4.7

从表 2 中可以看出, 短的腔长发散角随泵浦功率的提高增加较快。在较大功率泵浦时, 24 mm 腔长的发散角比 50 mm 腔长的发散角大 40% 以上。

## 4 结 论

通过上面的实验研究, 我们可以看出高掺杂晶体在泵浦功率较大时将会出现输出饱和; 采用低掺杂的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体和半共焦腔结构, 我们最大获得了 3 W 1342 nm 激光输出, 去除耦合系统和激光晶体前端面对泵浦光的损失, 则斜效率为 43.7%; 激光器输出为基横模, 不稳定性小于 0.2%。

致谢: 本工作是在中科院物理所光物理实验室完成的, 在此向徐瑶老师, 陈毓川博士表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Tucker A W, Birnbaum M, Fincher C L *et al.* Continuous-wave operation of Nd:YVO<sub>4</sub> at 1.06 and 1.34 μm. *J. Appl. Phys.*, 1976, 48: 4907~4911

- 2 Plaessmann H, Yamada K S, Rich C E *et al.* Subnanosecond pulse generation from diode-pumped acousto-optically *Q*-switched solid-state lasers. *Appl. Opt.*, 1993, 32: 6616~6619
- 3 Bowkett G C, Baxter G C, Booth D J *et al.* Single-mode 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub> microchip laser with cw Ti:sapphire and diode-laser pumping. *Opt. Lett.*, 1994, 19: 957~959
- 4 王长青, 沈德元, 卢建仁等. 激光二极管泵浦的 1.34  $\mu\text{m}$  及其腔内倍频红光 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器. *中国激光*, 1999, A24(7): 577~580
- 5 Conroy R S, Kemp A J, Friel G L *et al.* Microchip Nd:vanadate lasers at 1342 and 671 nm. *Opt. Lett.*, 1997, 22: 1781~1783
- 6 Agnesi A, Reali G C, Gobbi P G. 430 mW single-transverse-mode diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 671 nm. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, 34: 1297
- 7 张恒利, 何京良, 侯 玮等. 半导体激光泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的 1.34  $\mu\text{m}$  输出特性. *中国激光*, 1999, A26(6): 481~485
- 8 He Jingliang, Zhang Hengli *et al.* Generation of cw radiation of 273 mW at 671 nm from a diode-pumped intracavity-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser. *Chin. Phy. Lett.*, 1998, 15(5): 343~344
- 9 张恒利, 何京良, 陈毓川等. 激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 1342 nm 和 671 nm 激光器研究. *物理学报*, 1998, 47(9): 1579~1584

## Laser Diode End-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> Lasers at 1342 nm

Zhang Hengli<sup>1</sup> Yang Qiansuo<sup>1</sup> Zhu Naiyi<sup>1</sup> Hou Wei<sup>2</sup> Xu Zuyan<sup>2</sup>

( 1 Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,  
the Chinese Academy of Sciences Beijing 100080 )

( 2 Laboratory of Optics Physics, Institute of Physics, the Chinese Academy  
of Sciences Beijing 100080 )

**Abstract** We report here a high efficient diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser emitting at 1342 nm. The dependence of output power and efficiency on cavity length, transmittance of the output mirrors and doped density of Nd ion in YVO<sub>4</sub> crystals was investigated, a maximum output power of 3 W was obtained.

**Key words** laser diode, LD pump, Nd:YVO<sub>4</sub> crystal

张恒利 1990年毕业于山东大学物理系, 1993~1996年在山东大学晶体材料研究所攻读硕士学位, 1996~1999年在中国科学院物理研究所光物理专业攻读博士学位, 主要从事全固态激光器研究, 已发表及合作发表论文10余篇. 现在中国科学院力学研究所从事博士后研究工作.