

文章编号: 1001-3806(2003)04-0279-03

## LD 泵浦 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 1342nm 激光器实验研究\*

扈 燕

王 英 刘吉清

(华中科技大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

(华中科技大学光电系, 武汉, 430074)

摘要: 介绍了 LD 泵浦  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  1342nm 激光器得到 296mW 的激光输出, 最大斜率效率达到 21.2%。同时给出了 1342nm 激光的光谱曲线及其输入-输出功率特性曲线。

关键词:  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ ; LD 泵浦; 二极管泵浦; 1342nm 激光

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Laser diode end pumped $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ lasers at 1342nm

Hu Yan<sup>1</sup>, Wang Ying<sup>2</sup>, Liu Jiqing<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Laser Technology and Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

(<sup>2</sup> Department of Optoelectronic Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** A LD pumped  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  laser emitting at 1342nm is introduced. The laser output power about 296mW was obtained, the maximum slope efficiency is up to 21.2%. The spectrum curve at 1342nm and the input-output power curve are given.

**Key words:**  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ ; LD pumped; laser diode pump; 1342nm laser

### 引 言

1.3 $\mu\text{m}$  区域激光由于正好处于硅光纤的传输窗口内, 非常适合于光纤通讯中的应用, 可用于制造光通讯中的光发送机、放大器等, 同时, 作为中红外参量激光器的泵浦源将更为有效, 此外, 经过倍频的红色激光取代氦离子激光也将有相当的市场, 还可用于光电子、激光微加工、激光医疗、光数据存储等诸多领域, 因此, LD 泵浦的  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  晶体 1342nm 激光器的用途十分广泛。

$\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  是当前现有的二极管泵浦的固体激光器效率最高的晶体之一。与  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  和  $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$  相比,  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  对二极管激光器的泵浦波长和温度控制的要求更低, 受激发射截面大, 在泵浦波长上吸收系数高, 吸收带宽, 斜率效率高, 激光阈值低, 线偏振激发, 能单模输出。此外,  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  晶体的一个吸收峰正好位于二极管激光器的中心波长, 因此,  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  很适合用于高

功率、高稳定性、高性价比的二极管泵浦固体激光器。在集成设计和单纵模输出中,  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  比其它的普通晶体表现出它特有的优点。二极管激光器泵浦  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  集成激光器及其倍频绿、红或蓝光激光器将成为加工、材料处理、光谱学、微片光刻、光学成像、医疗诊断、激光打印和其它更广泛应用的理想激光工具。但是, 与  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  相比,  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  的热效应现象更为严重, 影响了激光效率、腔的稳定性和输出光束质量等。而且, 掺杂浓度越高, 热效应现象越明显。

国内对  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  晶体 1342nm 波段的研究不多, 主要有山东大学晶体材料研究所王长青<sup>[1]</sup> 等获得最大激光输出 157mW, 光光转换效率 30.5% 和中国科学院张恒利<sup>[2]</sup> 等最大获得 3W 激光输出, 斜率效率 43.7% 的报道, 此外, 张恒利等还对 1342nm 激光进行 II 临界相位匹配 KTP 晶体腔内倍频获得 273mW 671nm 红光输出。

### 1 激光器及其结构

#### 1.1 关于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体

3 价钕离子在  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  晶体中作为激活粒子,  $\text{YVO}_4$  作基质, 其能级图<sup>[3]</sup> 如图 1 所示。处于基态  $^4\text{I}_{9/2}$  的钕离子吸收光泵发射的相应波长的光子能

\* 国家八六三计划支持项目。

作者简介: 扈 燕, 女, 1977 年 7 月出生。硕士研究生。现从事喇曼放大器泵浦激光器及其耦合系统的研究。

收稿日期: 2002-09-25; 收到修改稿日期: 2002-10-22

量后跃迁到 $^4F_{3/2}$ ,  $^2H_{9/2}$ 和 $^4F_{7/2}$ ,  $^4S_{3/2}$ 能级(吸收带的中心波长是809nm和600nm),然后几乎全部通过无辐射跃迁迅速落到 $^4F_{3/2}$ 能级。 $^4F_{3/2}$ 是亚稳态能级。处于 $^4F_{3/2}$ 能级的 $Nd^{3+}$ 离子可以向多个终端能级跃迁并产生辐射,其中几率最大的是 $^4F_{3/2}$ 至 $^4I_{11/2}$ 的跃迁(波长为1064nm),其次是 $^4F_{3/2}$ 至 $^4I_{13/2}$ 的跃迁(波长1342nm), $^4F_{3/2}$ 至 $^4I_{9/2}$ 的跃迁几率最小(波长914nm)。 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁虽然也属于4能级系统,但跃迁几率小,只在抑制1064nm激光的情况下,才能产生1342nm的激光。 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 跃迁属3能级系统,室温下难以产生激光。

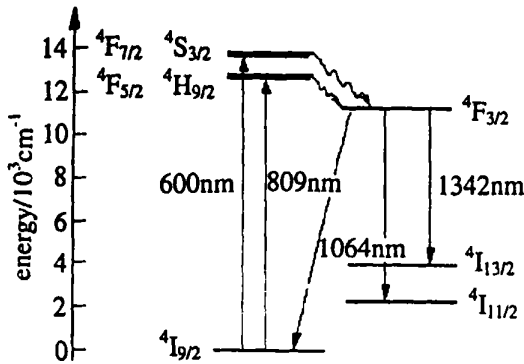


Fig. 1  $Nd^{3+} : YVO_4$  crystal energy

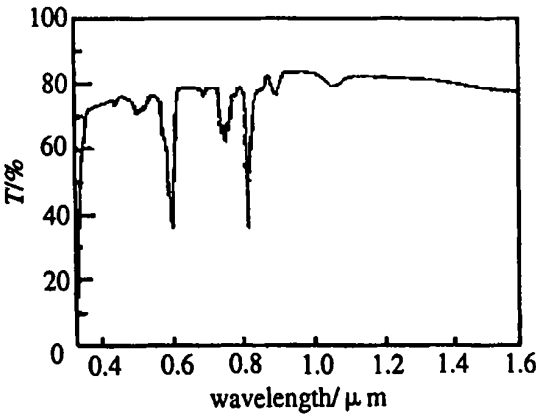


Fig. 2 Absorption curve of 0.5% doping  $YVO_4$

$Nd^{3+} : YVO_4$  晶体具有较宽的吸收带宽,较大的受激发射截面, $Nd^{3+}$ 离子除了1.064 $\mu m$ 的受激辐射跃迁外,还可产生1.3 $\mu m$ 波段的弱辐射(例如: $Nd^{3+} : YVO_4$ 为1.342 $\mu m$ , $Nd^{3+} : YAG$ 为1.320 $\mu m$ )。 $Nd^{3+}$ 离子在 $YVO_4$ 中比在 $YAG$ 中掺杂的浓度高,其在1.342 $\mu m$ 处的发射截面仍然较大(约为 $6 \times 10^{-19} cm^2$ ),与1.064 $\mu m$ 的分支比(为0.24)高于 $YAG$ (为0.18),并且偏振发射,特别适用于用LD泵浦,如图2所示为掺杂0.5%的 $Nd^{3+} : YVO_4$ 晶体的吸收谱线,纵坐标 $T\%$ 表示晶体的透过率,透过得越少,则表示吸收得越多。由图可知

晶体在808nm附近有一吸收峰,这正是LD的中心波长。图3是晶体800nm~1600nm的归一化荧光谱线, $Nd^{3+} : YVO_4$ 晶体对泵浦光偏振敏感,泵浦光为s偏振比p偏振时增益高。

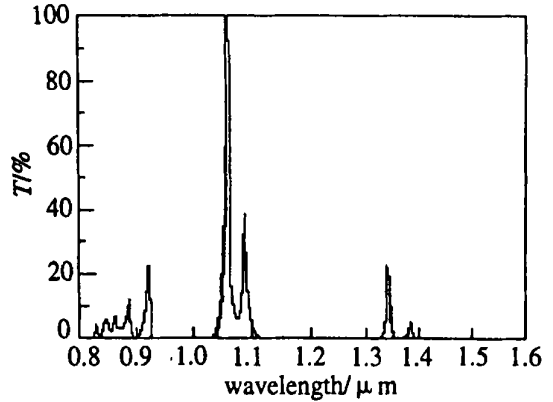


Fig. 3 Normalized fluorescence spectra from 800nm to 1600nm of  $Nd^{3+} : YVO_4$

激光二极管端面泵浦固体激光器的阈值为<sup>[4]</sup>:

$$P_{th} = \frac{\pi hc (\omega_c^2 + \omega_p^2) \cdot \delta}{4\sigma\tau\lambda_p\eta_p} \quad (1)$$

式中, $h$ 为普朗克常量, $c$ 为光速, $\lambda_p$ 为泵浦光波长, $\omega_c, \omega_p$ 分别为腔模和泵浦光斑束腰, $\delta$ 为腔的损耗(输出镜的透过率 $T$ ), $\sigma$ 为净增益截面, $\tau$ 为晶体上能级寿命, $\eta_p$ 为量子效率。忽略腔模和上能级寿命的差别,则1.06 $\mu m$ 谱线和1.34 $\mu m$ 谱线的阈值之比为:  $P_{1.34}/P_{1.06} = \sigma_{1.06} \delta_{1.34} / \sigma_{1.34} \delta_{1.06}$  (2) 计算中取 $\sigma_{1.06} / \sigma_{1.34} = 0.24, \delta_{1.34} / \delta_{1.06} = 18$ ,则可估算出其阈值之比为约4.32。

### 1.2 晶体热透镜效应

对连续端面泵浦、激光振荡束腰远小于晶体尺寸的情况下,可将方块晶体等效为圆柱状。由于激光晶体侧面用硅胶皮包裹夹在紫铜夹具中间,用半导体温控装置加风扇对晶体进行制冷,可看作侧面导热且表面温度稳定。在这些近似下及忽略热应力和形变时,可由稳态热传导方程解出激光晶体的温度分布,进而可求出近似的等效热透镜焦距<sup>[5]</sup>:

$$f = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{th} (dn/dT)} \left[ \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (3)$$

式中, $\alpha$ 为吸收系数, $l = 5mm$ 为晶体通光长度, $P_{th}$ 为转化为热的泵浦功率, $\omega_p$ 为泵浦光斑尺寸, $K_c = 5.2W/(m \cdot K)$ 为晶体热导率, $dn/dT = 4.7 \times 10^{-6} K^{-1}$ 为晶体折射率的温度变化系数。图4中给出了在取 $P_{th} = 1W$ 的情况下,晶体热焦距与泵浦光斑尺寸关系的理论曲线。

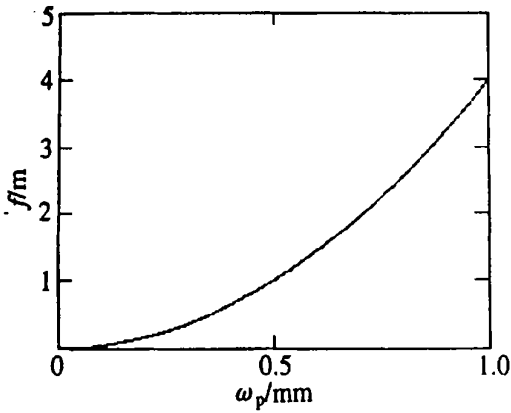


Fig. 4 Thermal focal length(*f*) vs pump beam waist( $\omega_p$ ) curve

由于忽略热效应和晶体形变的影响,及实验中晶体的散热情况不理想,实际的热焦距比上式求得的小,也即热致屈光度( $D = 1/f$ , 单位为 1/mm)要大。从上式中可以看出,泵浦光斑尺寸对晶体热焦距的影响是很大的,在其它参数确定的情况下,呈 2 次曲线关系,所以,适当加大泵浦光斑尺寸可以有效地减小热透镜效应的影响。但是,由于  $P_{th}$  并不是一个完全确定的量,随着泵浦功率的增加,  $P_{th}$  也随之增加,这样,  $f$  与  $\omega_p$  并非完全的 2 次关系。

### 1.3 激光器结构

实验装置如图 5 所示。激光器采用 LD 端面泵浦。泵浦源 LD 带尾纤输出,可通过调节其控制电流改变其输出功率,最大输出功率约为 20W。LD 内部配有温度控制系统,可将其温度波动控制在 1℃ 的范围内。由于光纤输出的泵浦光光束发散角很大,因此尾纤输出的泵浦光经过两个凸透镜,对其进行整形聚焦。调整泵浦光聚焦到晶体中的光斑大小及位置,使晶体因热效应而引起的等效热焦距尽可能大,可以降低激光器阈值,提高输出功率。

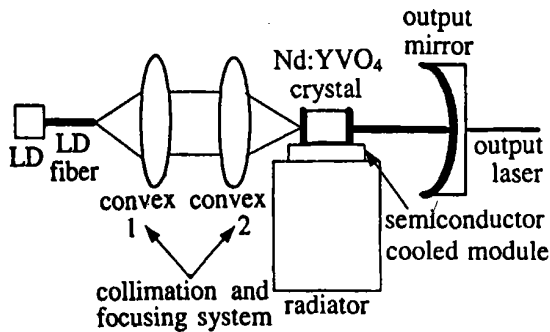


Fig. 5 Structure of the laser

Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> 晶体尺寸为 3mm × 3mm × 5mm, 掺杂浓度 1%, *a* 向切割,其前端面镀有 1342nm 全反和 808nm 增透膜,后端面镀有 1342nm 增透膜。输出镜采用曲率半径为 0.5m 的凹透镜,凹面上镀膜,对 1342nm 的反射率是 97.3%,同时对 808nm 的反射

率达 99% 以上。谐振腔长约 50mm。晶体下方采用半导体温控装置加散热片对晶体进行制冷。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 1342nm 激光光谱曲线

图 6 是用准直器将部分光束耦合到光纤里,用分辨率为 0.06nm 的光谱分析仪(86140B 型,Agilent 公司)对输出激光的光谱进行分析得到的光谱曲线。可以看到,激光是多纵模输出,其最强纵模的中心波长为 1342.025nm,3dB 带宽为 0.144nm。由于激光器没有采取任何选模措施,因此,其产生多纵模是正常现象。

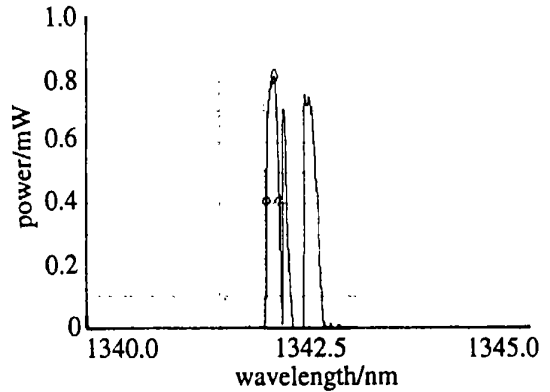


Fig. 6 Laser spectrum

### 2.2 激光器功率特性曲线

图 7 是腔长为 50mm 时激光器的输入-输出功率曲线。激光器的泵浦阈值功率约为 296mW。在从阈值上升到 1.2W 的过程中,激光器的输出功率基本成线性增长,最大斜率效率为 21.2%。当输入功率继续增加,激光器输出功率增长趋缓。开始时,

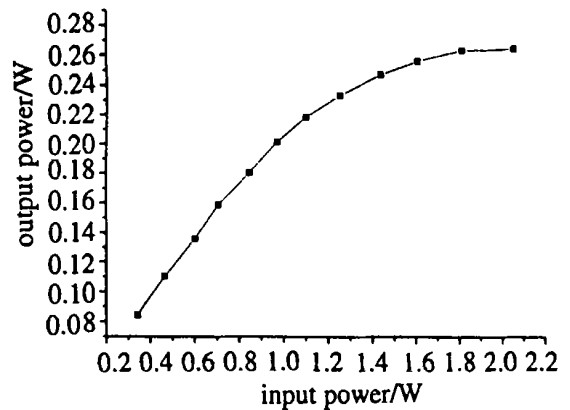


Fig. 7 Laser input-output power curve

随着输入功率的增加,使 Nd<sup>3+</sup> 的反转粒子数迅速增加,故激光输出功率也随之增加。随着输入功率的进一步增加,晶体发热加剧,使各向同性的晶体变成

(下转第 292 页)

## 5 结 论

新型结构的基于 SOA 的光开关矩阵通过巧妙的设计解决了常用结构类型中存在的规模局限性问题。它们克服了树状分支结构中存在的放大的自发辐射 (ASE) 噪声的积累等缺点,表现出 SOA 光开关在高开关速度和净增益等方面的优势。特别是最新出现的应用有源垂直耦合器的交叉点结构的空分光开关矩阵,它采用了独特的正交立体分层结构,吸取了 MOEMS 光开关矩阵在矩阵结构(正交矩阵结构)上的优点。同时,在交叉点处采用新机理(有源垂直耦合器)作为交换机构,使得开关速度达到纳秒量级,且集成度最为致密。它还可用于波长转换,使其功能从空分光交换扩展到波分光交换。在未来的高速和高度灵活的全光包交换网络中将有着巨大的应用潜力。它具有其它机制的光开关矩阵不可比拟的优越性,表现出诱人的应用前景。

目前,在制作大规模的基于 SOA 的光开关矩阵中存在工艺稳定性、开关单元性能一致性和可靠性等问题。这是因为大规模的光开关矩阵对工艺过程要求极高。基于 SOA 的光开关矩阵在制造中要用

到金属有机化学气相沉积(MOCVD)生长技术、精确的光刻和等离子刻蚀等技术。各研究生产机构正加速努力,使它们满足实用化要求。随着基于 SOA 的光开关矩阵的理论和设计水平的不断提高和工艺过程的不断完善,基于 SOA 的光开关矩阵将成为未来全光通信中的关键器件之一,在将来的高速光网络中将扮演重要的角色。

### 参 考 文 献

- [1] Liu D M, Hu X J, Huang D X. Proc SPIE, 1999, 3899: 159~ 165.
- [2] 刘德明, 胡晓君, 黄德修 *et al.* 华中理工大学学报, 1999, 27(10): 4~ 6.
- [3] 张新亮, 任雪斌, 黄德修 *et al.* 半导体技术, 1997(6): 17~ 19.
- [4] Kato T, Sasaki J, Shimoda T *et al.* IEICE Trans on Electronics, 1999, E82C(2): 305~ 312.
- [5] Fan R S, Hooker R B. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(4): 546~ 554.
- [6] Kirihara T, Ogawa M, Inoue H *et al.* IEEE Photon Technol Lett, 1994, 6(2): 218~ 221.
- [7] Fish G A, Coldren L A, DenBaars S P. IEEE Photon Technol Lett, 1998, 10(2): 230~ 232.
- [8] Yu S Y, Owen M, Varrazza R *et al.* Proceedings of APCC/OECC' 99, 1999(2): 1623~ 1626.
- [9] Yu S Y, Owen M, Varrazza R *et al.* Conference on Lasers and Electr Optics, 2000: 256~ 257.

(上接第 281 页)

各向异性,产生了双折射现象,同时,因存在着热梯度,也产生了热应力,使晶体的折射率发生变化,总的来说,晶体在热效应的作用下,随着温度的升高,焦距由远及近地变化,使谐振腔逐步从稳定腔向非稳腔过渡,激光器的输出功率增长逐渐趋缓。由于仅仅处于实验阶段,制冷装置只是简单地置于晶体下方,再通过风扇吹散热片进行散热,晶体的散热情况并不是很好,还有耦合泵浦光的两个凸透镜参数没有经过精确计算和调整,镜片上也没有镀膜,耦合效率很低,若对晶体的散热方式和泵浦耦合方式进行改进,得到的输出功率、效率都会有大幅度提高。

## 3 结 论

利用半导体激光器端面泵浦  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  晶

体,通过对晶体端面 and 输出镜的镀膜,抑制了增益更强的 1064nm 谱线的起振,产生了 1342nm 激光,最大输出功率达到 296mW,最大斜率效率 21.2%。

### 参 考 文 献

- [1] 王长青, 沈德元, 卢建仁 *et al.* 光学学报, 1997, 17(9): 1176~ 1179.
- [2] 张恒利, 杨乾锁, 竺乃宜 *et al.* 量子电子学报, 2000, 17(5): 400~ 404.
- [3] 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘 *et al.* 激光原理. 4 版, 北京: 国防工业出版社, 2000: 275~ 276.
- [4] 张恒利, 何京良, 侯 玮 *et al.* 中国激光, 1999, 26(6): 481~ 484.
- [5] 张恒利, 竺乃宜, 杨乾锁 *et al.* 光子学报, 2000, 29(5): 470~ 473.