

LD 抽运 Nd :LuVO₄ 微片激光器性能研究^{*}

徐方华 王正平[†] 张怀金 刘训民 许心光 王继扬 邵宗书 蒋民华

(山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

(2006 年 9 月 27 日收到, 2006 年 10 月 28 日收到修改稿)

报道了一类新型的 LD 端面抽运 Nd :LuVO₄ 微片激光器, 讨论了在不同掺杂浓度、不同厚度和不同透过率下的激光性质, 测定了在不同抽运功率下, 微片最佳激光输出功率与 LD 抽运温度的关系. 在 2 W 抽运功率下获得 923 mW 的 1064 nm 激光输出, 阈值为 48 mW, 斜效率为 52%. 对微片制冷后斜效率提高到 59%.

关键词: LD 抽运, 微片激光器, Nd :LuVO₄

PACC: 4255R, 4260B, 4260D

1. 引言

随着新型高效激光介质的不断出现以及激光二极管(LD)技术的进一步提高, LD 抽运的固体激光器已逐渐成为激光器发展的主流. 目前固体激光器小型化的一个重要方向是微片激光器. 微片激光器是一种具有固体微型腔结构的端面抽运激光器件, 其典型结构是在激光介质的两个通光端面上分别镀介质膜, 形成微型振荡腔. 微片激光器是结构最紧凑的固体激光器, 具有经济、小型、高效、光束优、寿命长以及调整便利等优点^[1-4].

由于微片激光器的腔长很短, 为了保证激光器的低阈值和高效率, 要求增益介质必须具备较大的吸收截面、长的上能级寿命和好的热导性能等特点. 目前, 钕离子掺杂的钒酸盐系列晶体是适合 LD 抽运微片激光器的优秀激光材料. 例如 Nd :YVO₄ 晶体是最早被研究的激光晶体之一^[5-10]. 与 Nd :YAG 相比, 它具有掺杂浓度高、偏振吸收、偏振发射的特点, 还具有非常大的吸收截面. 利用 Nd :YVO₄ 高吸收特点制成的微片激光器, 很容易获得高功率单频激光器输出^[11]. 但是该晶体的缺点是热导率低, 在高功率条件下的应用受到很大限制. GdVO₄ 是一种与 YVO₄ 同晶型的晶体材料. 它们同为锆英石(ZrSiO₄)型结构, 属四方晶系, 点群为 4/*mmm*, 空间群为

14/*amd*, 是正单轴晶体. 与 Nd :YVO₄ 相比, Nd :GdVO₄ 具有完全类似的激光性能, 而且其吸收系数和受激发射截面比 Nd :YVO₄ 的相应值大得多, 更重要的是 Nd :GdVO₄ 热导率远高于 Nd :YVO₄ (与 Nd :YAG 相当), 逐渐成为 Nd :YVO₄ 晶体的强有力竞争者. 这些优点使 Nd :GdVO₄ 成为 LD 抽运微片激光器和高功率激光器的理想工作物质, 近年来引起了人们极大的研究兴趣^[12-16]. 2002 年 Maunier 报道 Nd :LuVO₄ 也可以作为一种优异的激光晶体^[17], 它与 Nd :GdVO₄ 同属于钒酸盐系列晶体, 其吸收截面(800 nm 附近)和发射截面(1064 nm)均优于 Nd :YVO₄ 和 Nd :GdVO₄. Nd :LuVO₄ 的比热较 Nd :YVO₄ 高, 与 Nd :GdVO₄ 差不多, 因此具有较高的破坏阈值. 在 100 和 001 方向的热导率均高于 Nd :YVO₄, 而比 Nd :GdVO₄ 的热导率略低. 可以看出, Nd :LuVO₄ 也是一种非常适于用作微片激光器的基质材料.

目前关于 Nd :LuVO₄ 晶体激光器已有一些文献报道^[18-20], 但多数文献仅限于对确定长度和掺杂浓度晶体激光性质的研究, 对不同掺杂浓度和不同样品长度的晶体性质少有较系统的研究和性能评估, 而且尚未发现有关 Nd :LuVO₄ 微片激光器的相关报道. 本文对大批 Nd :LuVO₄ 晶体微片进行了系统测试, 分别考察了该晶体在不同掺杂浓度、不同输出光透过率以及不同厚度条件下的激光性质和规律, 并测试了其最佳抽运温度随抽运功率的变化以及热效

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60508010)和山东省泰山学者计划资助的课题.

[†] E-mail: zpwang@icm.sdu.edu.cn

应对激光输出的影响.

2. 实验装置

实验所用装置如图 1 所示.抽运光源为最大输出为 2 W 的光纤耦合 LD(Coherent corp. :F-81-2600C-200-SM-M) ,其电源为 Newport 公司生产的 6060 型带温控模块.初始光纤孔径为 200 μm ,抽运光经聚焦耦合系统照射到 Nd :LuVO₄ 晶体上 ,聚焦系统效率约为 83 % ,经测定聚焦光斑为椭圆偏振光 ,长短轴方向的强度比约为 6 : 1 .实验中调节晶体方位使其 c 轴沿抽运光的长轴偏振方向 ,以实现最大吸收.晶体出射激光经滤色片(HR@808 nm ,HT@1064 nm)后进入功率计探头.

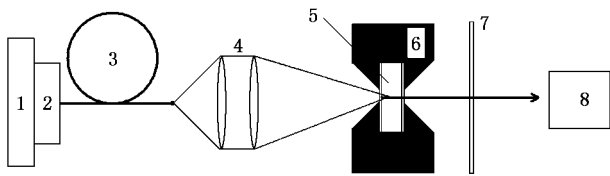


图 1 Nd :LuVO₄ 微片激光器的实验装置 1. 激光二极管电源和控温装置 2. 激光二极管 3. 耦合光纤 4. 聚焦系统 5. 激光晶体 6. “三明治”水冷系统 7. 滤色片 8. 功率计

实验所用晶体为 a 轴切割的 Nd :LuVO₄ 晶体 ,截面大小为 3 mm×3 mm ,通光长度有 1 mm 和 1.5 mm 两种 ,掺杂浓度为 1at% ,晶体靠近抽运光的通光端面镀 1064 nm 高反和 808 nm 增透膜 ,另一面镀 1064 nm 部分反射膜(T = 1% ,2% ,3%).实验中适当调节聚焦系统与晶体之间的距离 ,以获得最大输出.

3. 实验结果与讨论

3.1. 厚度引起的影响

实验测试了厚度分别为 1 mm 和 1.5 mm 的 Nd :LuVO₄ 微片的激光输出随抽运功率的变化规律 ,如图 2 所示.图中晶体的掺杂浓度为 1at% ,输出面 1064 nm 透过率为 1% .

从图中可以看出 ,在低于 2 W 的抽运功率下 ,Nd :LuVO₄ 晶体可以得到较好的线性输出.在透过率和浓度相同时 ,厚度相对较大的微片可以获得更高的激光输出.微片厚度在由 1 mm 增加到 1.5 mm 时 ,输出功率增加约在 5%—8% 之间.

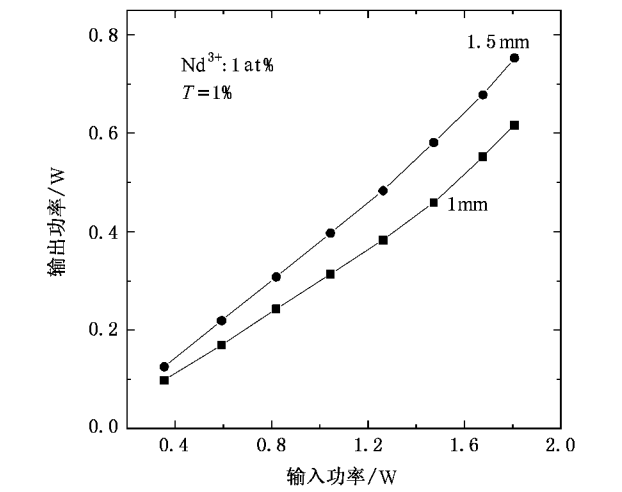


图 2 不同微片厚度与激光输出的关系

对于其他掺杂浓度(0.5at%)和透过率(2% ,3%)的微片样品进行实验 ,均得到相同的实验规律.

3.2. Nd³⁺ 掺杂浓度的影响

实验测试了不同浓度 Nd :LuVO₄ 微片的激光输出随抽运功率的变化规律 ,如图 3 所示 ,图中各晶体输出面 1064 nm 透过率为 1% ,2% 和 3% .可以看出 ,对于确定浓度的微片 ,其最佳激光输出随抽运功率成近似线性增加.掺杂浓度相对高的微片对应较高输出功率.

在抽运功率低于 1.25 W 时 ,斜效率相对较低 ,继续增加抽运功率 ,斜效率有明显增大的趋势 ,这很可能是晶体在高抽运功率下 ,抽运吸收率增加造成的.在 2 W 抽运功率下 ,仍没有出现因热效应而产生的饱和现象 ,说明在该实验条件下 ,Nd :LuVO₄ 微片的热效应较小.

实验发现 ,当抽运功率一定时 ,掺杂浓度的变化对激光输出的影响很大 ,如图 3 所示 ,对于晶体输出面 1064 nm 透过率为 1% ,掺杂浓度从 0.5at% 增加到 1at% 时 ,微片的激光输出显著增加.对于 0.5at% ,1 mm 和 1at% ,1 mm 的两块晶体 ,功率增幅达到 50.6% ;对于 0.5at% ,1.5 mm 和 1at% ,1.5 mm 的两块晶体 ,功率增幅达到 48.6% ,对其他输出透过率的 Nd :LuVO₄ 微片进行测试时 ,发现有相同的实验规律.上述实验说明与晶体厚度相比 ,掺杂浓度对 Nd :LuVO₄ 微片的激光输出有更大的影响.

3.3. 透过率的影响

在 LD 温度恒定(20℃) ,即抽运光波长稳定在

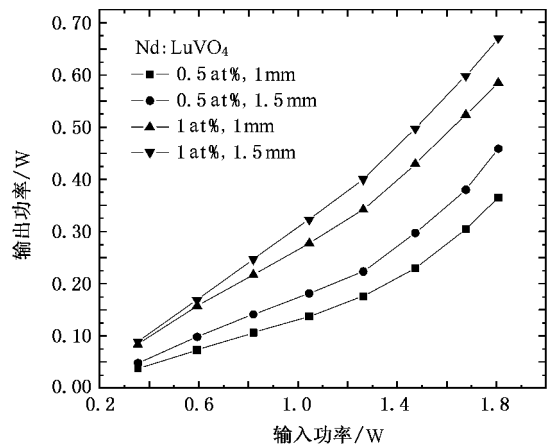


图 3 不同掺杂浓度与激光输出的关系

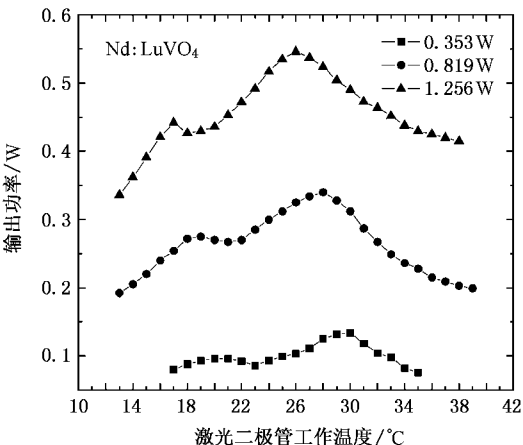


图 5 不同抽运条件下最佳输出与 LD 工作温度的关系

808 nm 时,对于具有确定掺杂浓度和厚度的 Nd : LuVO₄ 晶体(1at% ,1 mm),测试了不同的输出透过率对激光输出的影响.

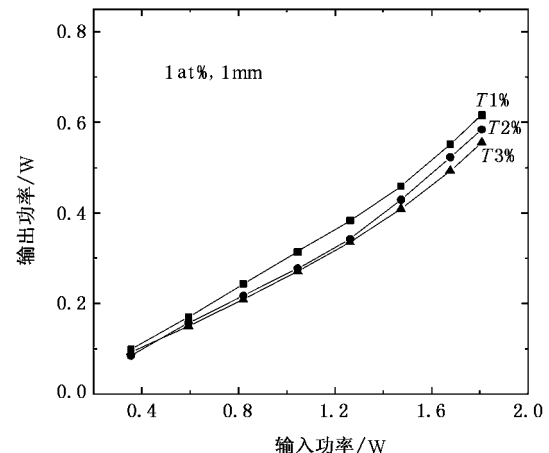


图 4 不同 1064 nm 透过率与激光输出的关系

Nd :LuVO₄ 微片的输出端面分别镀有对 1064 nm 的透过率为 1% ,2% ,3% 的介质膜.由图 4 可知不同透过率的微片 ,最高激光输出功率略有不同.微片透过率由 1% 变化到 3% 时 ,所对应的最高输出功率逐渐减小.对于其他厚度和掺杂浓度的 Nd :LuVO₄ 晶体微片 ,其最高输出功率也对应较低的透过率.

3.4. 微片输出功率所对应的最佳的 LD 抽运温度

LD 工作温度决定了 LD 抽运波长 ,抽运波长与晶体吸收带宽的光谱匹配程度决定了抽运效率的高低、热效应大小以及对制冷系统的要求.大的吸收带宽不但可以降低对 LD 工作温度的限制 ,也可以降低抽运过程中产生的热效应.

在低于 2 W 的抽运功率下 ,我们测试了 Nd : LuVO₄ 晶体微片的激光输出与 LD 工作温度的关系 ,如图 5 所示 ,我们可以得到如下结论 :

1)随着抽运功率的增大 ,激光输出峰所对应的温度半宽也在增加.其原因可能是在高的抽运功率下 ,激光晶体的吸收峰变高变宽 ,反映到图 5 上为 LD 抽运温度带宽的增加.2)随着抽运功率的增大 ,LD 抽运的最佳温度逐渐减小.当抽运功率增大时 ,LD 的中心波长将向长波方向移动 ,假设激光晶体的吸收峰中心波长与晶体温度及入射光功率无关 ,则为保持 LD 的中心波长始终与晶体吸收峰对准 ,就必须调低 LD 温度 ,使其发射波长保持不变 ,抽运功率越大 ,所需调低的温度就越多.3)在不同抽运功率下 ,LD 工作温度从 17℃ 到 32℃ 间变化时 ,Nd :LuVO₄ 微片则始终有一大一小两个峰 ,且两峰间距离始终为 9℃ 左右.这反映出相应晶体吸收峰的细致结构 ,即 Nd :LuVO₄ 晶体在中心吸收波长附近有一小的吸收峰 ,如果按照 LD 温度每变化 1℃ ,其中心发射波长就变化 3 Å 的一般情况来考虑 ,则这两个小吸收峰的间距应为 2.7 nm 左右.

考虑到微片厚度、1064 nm 透过率、Nd³⁺ 掺杂浓度以及 LD 工作温度对激光输出的影响.我们采用厚度为 1.5 mm ,掺杂浓度为 1at% ,1064 nm 透过率为 1% 的微片 ,在抽运功率为 2 W 时 ,获得 923 mW 的 1064 nm 激光输出 ,阈值为 48 mW ,斜效率为 52% ,实验过程中晶体自然放置 ,未采用任何导热或制冷措施.

3.5. 热效应对激光输出的影响

随着抽运功率的不断提高 ,激光晶体中的热效

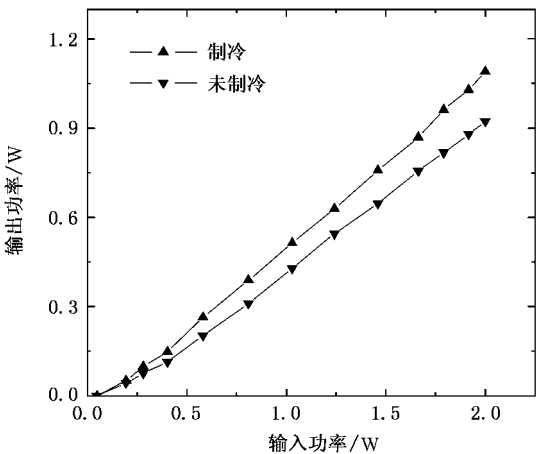


图 6 晶体制冷对激光输出的影响

应成为影响激光输出的最大障碍，因此对晶体进行有效制冷可以有效减少晶体内的热积累，从而实现高效高功率的激光运转。

我们设计了一种“三明治”型制冷装置，如图 1 所示。晶体微片侧面及部分端面用锡箔包裹，并置于铜块包裹的热沉中，前后端面上留有直径为 1.5 mm 的透光孔，采用水冷方式对铜块控温，使晶体制冷面积达 88%—95%。用此装置对原最佳激光输出的

Nd :LuVO₄ 微片进行测试，发现激光输出功率和斜效率有明显提高。在相同的抽运条件下，使 Nd :LuVO₄ 微片激光器的最高输出从原来的 923 mW 上升到 1094 mW，斜效率提高到 59%。

由图 6 可以看出，在抽运功率小于 0.4 W 时，两种情况下的激光输出相差不大。当抽运功率大于 0.4 W 时，由于有效避免了晶体的热效应，制冷后的激光输出比非制冷情况下的激光输出显著增大。

4. 结 论

本文报道了一类新型的 LD 端面抽运 Nd :LuVO₄ 微片激光器，得到了在不同掺杂浓度、不同厚度和多种 1064 nm 透过率条件下激光输出的变化规律。测定了在不同抽运功率下，最佳激光输出功率受 LD 工作温度变化的影响，并通过测试在制冷和非制冷条件下的激光输出，研究了热效应对 Nd :LuVO₄ 微片激光器的影响。在 2 W 抽运功率下，最大输出达到 1.094 W，斜效率高达 59%。研究表明，Nd :LuVO₄ 晶体是一种新型高效的、有实际应用前景的微片激光材料。

[1] Zayhowski J J 1999 *Optical Materials* **11** 255

[2] Chen Y , Zhao Y 1997 *Optical Technology* **2** 4 (in Chinese)
[陈 艳、赵 洋 1997 光学技术 **2** 4]

[3] Li J , He J L , Hou W , Xu Z Y 1999 *Journal of optoelectronics* . *Laser* **5** 395 (in Chinese) [李 健、何京良、侯 玮、许祖彦 1999 光电子·激光 **5** 395]

[4] Yang P Z , Deng P Z , Liu Y P , Zhang Y H , Chen W , Xu J 1999 *Chinese Journal of lasers* **A 26** 865 (in Chinese) [杨培志、邓佩珍、刘玉璞、张影华、陈 伟、徐 军 1999 中国激光 **A 26** 865]

[5] Conner J R O 1966 *Appl. Phys. Lett.* **9** 407

[6] Bagdasarov K S , Kaminskii A A 1968 *Phys. Status Solidi* **A 27** 1

[7] Shang L J 2005 *Chin. Phys.* **14** 1387

[8] Zhang Y P , Zheng Y , Zhang H Y , Wang P , Yao J Q 2006 *Chin. Phys.* **15** 2018

[9] Shang L J , Zheng Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2015 (in Chinese)
[尚连聚、郑 义 2002 物理学报 **51** 2015]

[10] Zhang H L , He J L , Chen Y C , Hou W , Liu R , Feng B H , Xu Z Y , Wang J M , Wu X , Wu B C , Chen C T 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1579 (in Chinese) [张恒利、何京良、陈毓川、侯 玮、刘 嵘、冯宝华、许祖彦、王建明、吴 星、吴柏昌、陈创天 1998 物理学报 **47** 1579]

[11] Sasaki T 1991 *Opt. Lett* **16** 1

[12] Zhang H J , Meng X L , Liu J H , Zhu L , Wang C Q , Shao Z S , Wang J Y , Liu Y G 2000 *Crystal Growth* **216** 367

[13] Zhang H J , Liu J H , Wang J Y , Wang C Q , Zhu L , Shao Z S , Meng X L , Hu X B , Jiang M H , Yuk Tak Chow 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 18

[14] Zhang Q L , Yin S T , Wang A H , Chen C S 2002 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **9** 310 (in Chinese) [张庆礼、殷绍唐、王爱华、陈长水 2002 量子电子学报 **9** 310]

[15] Liu J , Yang J M , He J L 2003 *Laser Journal* **24** 28 (in Chinese)
[刘 杰、杨济民、何京良 2003 激光杂志 **24** 28]

[16] Ng S P , Tang D Y , Qin L J , Meng X L 2004 *Optics Communications* **229** 331

[17] Maunier C , Doualan J L , Moncorgé R , Speghini A , Bettinelli M , Cavalli E 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 1794

[18] Zhang H J , Kong H K , Zhao S R 2003 *Journal of Crystal Growth* **256** 292

[19] Liu J H , Zhang H J , Wang Z P , Wang J Y , Shao Z S , Jiang M H , Weber H 2004 *Optics Letters* **29** 3

[20] Zhao S R , Zhang H J , Hu X B , Kong H K , Liu J H , Xu X G , Wang J Y , Jiang M H 2004 *Journal of Synthetic Crystals* **3** 363 (in Chinese)
[赵守仁、张怀金、胡小波、孔海宽、刘均海、徐现刚、王继扬、蒋民华 2004 人工晶体学报 **3** 363]

Study on the properties of LD-pumped Nd :LuVO₄ microchip laser^{*}

Xu Fang-Hua Wang Zheng-Ping[†] Zhang Huai-Jin Liu Xun-Min Xu Xin-Guang

Wang Ji-Yang Shao Zong-Shu Jiang Min-Hua

(*States Key Laboratory of Crystal Materials Shandong University ,Jinan 250100 ,China*)

(Received 27 September 2006 ; revised manuscript received 28 October 2006)

Abstract

A new LD end pumped Nd :LuVO₄ microchip laser was reported for the first time. Study of laser properties was carried out on the effects of different Nd³⁺ doped concentration ,different cavity length and different 1064 nm transmission. The relationship between the maximum output power and LD performance temperature was measured at different pump power. 923 mW of continuous output at 1064 nm with TEM₀₀ mode was obtained at 2 W pump power ,the pump threshold being 48 mW. The slope efficiency was 52% ,and increased to 59% when the microchip was cooled.

Keywords : LD pumped , microchip laser , Nd :LuVO₄

PACC : 4255R , 4260B , 4260D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60508010) and the Program for Taishan Scholar of Shandong Province , China.

[†] E-mail :zpwang@icm.sdu.edu.cn