

激光二极管抽运的Nd:YVO₄连续自拉曼1175 nm激光器*

樊莉[†] 陈海涛 朱骏

(扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2014年2月11日收到; 2014年2月27日收到修改稿)

报道了采用激光二极管端面抽运的Nd:YVO₄晶体连续自拉曼激光器的实验研究. 通过对晶体掺杂浓度及晶体结构的选择优化, 减轻自拉曼晶体的热效应, 实现了结构紧凑的1175 nm连续自拉曼激光器的高效运转. 最终以两端键合的复合Nd:YVO₄晶体作为自拉曼介质, 在25.5 W的抽运功率下, 获得了最高3.4 W的1175 nm连续拉曼光输出, 光光转换效率为13.3%, 拉曼阈值低至2.21 W, 斜效率为14.6%.

关键词: 自拉曼激光器, 连续波, Nd:YVO₄晶体, 复合晶体

PACS: 42.55.Ye, 42.60.Pk, 42.65.Ky, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.63.154208

1 引言

受激拉曼散射(stimulated raman scattering, SRS)是一种有效的光学频率转换方法. 固体拉曼激光器利用晶体拉曼介质的受激拉曼散射效应对原有激光波长进行频率转换, 得到固体激光器不能直接发射的波长, 大大拓宽了激光光谱范围. 同气体、液体拉曼介质相比, 固体拉曼介质具有增益高、热导率高、机械和化学稳定性好、易于和全固态激光技术相结合等优点, 以晶体作为拉曼介质的固体拉曼激光器结构紧凑、效率高、稳定性好、寿命长, 在医学、生物、光通讯、雷达、军事、工农业等多个领域有着重要应用.

由于达到拉曼转换阈值所需的基频光功率密度较高, 目前报导的固体拉曼激光器大多数都是工作在脉冲状态^[1-5]. 直到2004年第一台以连续方式运转的固体拉曼激光器才由Grabtchikov等通过Ba(NO₃)₂晶体实现^[6]. 目前报道的固体连续拉曼激光器结构中自拉曼激光器由于采用一块晶体同时作为激光与拉曼介质减少了腔内元件数, 腔

长短、腔内损耗小, 有利于降低阈值、提高转换效率. 而缺点是由于激光产生和拉曼转换过程都发生在一块晶体内, 晶体的热效应更严重. 由于连续拉曼激光器对腔内损耗非常敏感, 要提高激光输出功率就要尽可能的减小腔内损耗, 因此相对于拉曼晶体和激光晶体分离的分体式拉曼激光器, 自拉曼激光器是一种更有前途的连续拉曼激光器结构. 2005—2007年, 研究人员^[7-11]分别实现了Nd:KGd(WO₄)₂, Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄晶体的自拉曼激光连续运转, 其中采用Nd:GdVO₄晶体自拉曼获得了2 W的1173 nm激光输出. 实验中发现晶体热效应严重, 使得激光输出功率在高抽运功率下达到饱和, 限制了激光输出功率的进一步提高. 因此, 在连续自拉曼激光器中要想获得更高功率的激光输出关键问题是要减轻自拉曼晶体的热效应. 2008年, Lee等^[12]采用880 nm LD直接抽运Nd:GdVO₄晶体有效减轻了晶体热效应获得了2.51 W的586.5 nm黄光连续波输出. 近期研究结果表明采用一种不掺杂晶体与同基质掺杂晶体键合在一起形成的复合晶体作为自拉曼介质, 可显著减小晶体内的热效应, 从而可进一步提高激光器的

* 江苏省自然科学基金青年科学基金(批准号: BK20130453)和国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11004170)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: fanli@yzu.edu.cn

输出功率和稳定性^[13,14]. 2010年, Lu等^[15]采用复合Nd:LuVO₄晶体作为自拉曼介质减轻晶体热效应获得了3.5 W的连续589 nm激光输出.

本文对连续运转下的Nd:YVO₄自拉曼1175 nm激光器进行了研究. 从晶体掺杂浓度和晶体结构的选择等方面对连续自拉曼激光器进行设计优化, 显著减轻了自拉曼晶体的热效应, 最终在25.5 W的半导体激光抽运功率下, 获得了3.4 W的1175 nm连续拉曼激光输出, 光光转换效率为13.3%, 拉曼阈值降低至2.21 W, 斜效率为14.6%.

2 YVO₄晶体的特性

YVO₄晶体有很好的光学、机械和热特性, 通常掺杂Nd³⁺, Er³⁺, Gd³⁺, Yb³⁺等稀土激光离子作为激光晶体被广泛运用, 是适合于激光二极管抽运的优良激光介质. Nd:YVO₄晶体属于四方晶系, 锆英石(ZrSiO₄)结构, 其空间点群为D_{4h}, 空间群属I4₁/amd. 与传统的激光晶体Nd:YAG相比, Nd:YVO₄晶体具有许多优势, 例如具有大的吸收截面、受激发射截面和宽的吸收带. 大的吸收截面使Nd:YVO₄晶体具有很好的吸收效率, 相对宽的

吸收光谱带宽, 使得对抽运LD波长控制(主要是温度控制)的苛刻要求有所降低, 大的发射截面能获得更低的激光阈值. 此外YVO₄晶体本身也是一种优良的拉曼频移介质, 具有拉曼增益系数大(1064 nm激光抽运时为4.5 cm/GW^[16]), 损伤阈值高, 热学性质比较好等优点, 所以在拉曼激光器中被广泛使用.

图1为实验中测得的YVO₄晶体的拉曼光谱. 可以看出, 抽运光的偏振方向不同时拉曼谱略有不同. 当基频光的偏振方向平行于拉曼晶体c轴时, 强度比较高的拉曼频移峰有两条: 890 cm⁻¹和838 cm⁻¹(如图1(a)所示). 当基频光的偏振方向垂直于拉曼晶体的c轴, 较强拉曼频移峰则有890 cm⁻¹, 838 cm⁻¹和815 cm⁻¹三条(如图1(b)所示). 从中可以看出YVO₄晶体的最强拉曼峰为890 cm⁻¹.

3 实验装置

图2所示为LD端面抽运Nd:YVO₄自拉曼连续1175 nm激光器实验装置示意图. 抽运源为Visotek公司LD-30光纤耦合输出的中心波长为808 nm的LD激光器, 最大输出功率为30 W, 其光纤芯径为0.4 mm、数值孔径为0.22. 抽运光束经过一个1:1或1:0.8的耦合系统准直聚焦到激光晶体上, 入射光斑半径为0.2 mm或0.16 mm. 实验中采用不同规格的a轴切割的Nd:YVO₄晶体作为自拉曼介质. Nd:YVO₄晶体的两端面都镀有808/1064/1175 nm波长的增透膜. 为了减轻热效应的影响, Nd:YVO₄晶体用铝箔包裹装在采用循环水冷却的铜制热沉中, 水温大约保持在20 °C. 激光腔采用平凹腔结构, 输入镜为平镜, 输出镜为曲率半径R = 200 mm的平凹镜, 镀膜情况为对808 nm高透(T > 98%), 同时对1064和1175 nm波长的光高反(R = 99.8%@1064和1175 nm). 为了减小腔内损耗, 腔内各元件尽量紧凑放置. 腔长大约为17 mm.

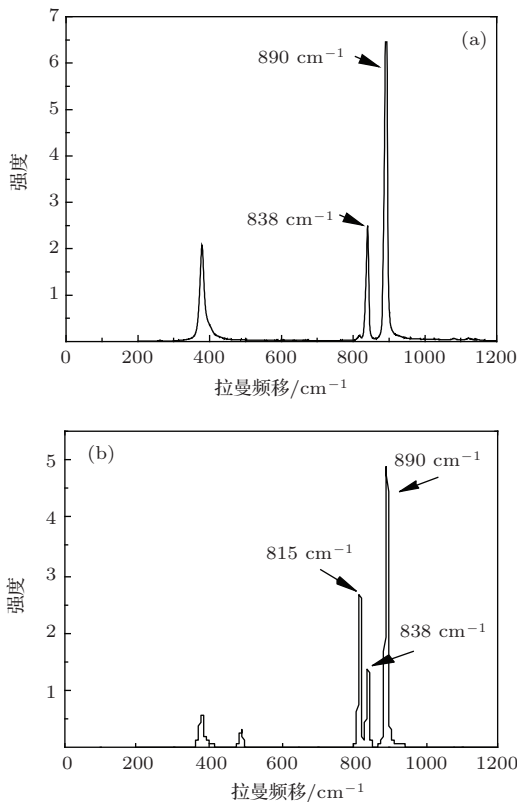


图1 YVO₄晶体的拉曼光谱 (a) 抽运光偏振方向平行于晶体c轴(E || c); (b) 抽运光偏振方向垂直于c轴(E ⊥ c)

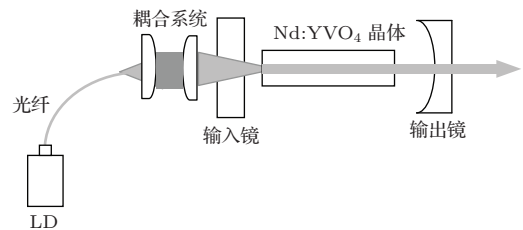


图2 LD端面抽运Nd:YVO₄连续自拉曼激光器结构示意图

4 实验结果与分析

为了减轻连续自拉曼激光器中晶体的热效应以提高拉曼激光输出功率和转换效率, 实验中首先研究对比了不同掺杂浓度Nd:YVO₄晶体基频激光器的输出特性. 由于相对于1064 nm基频激光, 激光振荡在1342 nm波长时, 激光晶体的热效应更严重, 所以本文以1342 nm作为基频激光波长研究了不同掺杂浓度的Nd:YVO₄晶体对1342 nm基频激光输出功率的影响. 1342 nm基频激光器结构与前面拉曼激光器基本相同, 只是将输入镜换为一平凹镜, 曲率半径 $R = 600$ mm, 镀膜情况为: 抽运入射面S1镀有对808 nm抽运光的增透膜, 另一面S2镀有对1342 nm基频光的高反、同时对808 nm及1064 nm激光的增透膜; 输出镜换为平镜, 镀有同时对808 nm及1064 nm激光增透、1342 nm基频光部分透射的高反膜($T_{1342} = 4\%$). 图3给出了采用不同规格Nd:YVO₄晶体时1342 nm基频激光器的输出功率. 从图中可以看出, 掺杂浓度为0.27 at.%, 晶体尺寸为4 mm × 4 mm × 8 mm的Nd:YVO₄晶体的效果最好, 在高抽运功率下输出功率明显高于其他规格的晶体. 当抽运功率为21.25 W时, 输出功率达到7.3 W, 光光转换效率为34%, 斜率效率为37%. 并且实验中还发现这种规格的晶体在LD最大输出抽运功率下也没有发生热裂现象, 而掺杂浓度为0.5 at.%的Nd:YVO₄晶体则常在23 W左右抽运功率时出现热裂现象, 晶体常常被打坏. 这和理论符合得较好, 说明采用低掺杂浓度、长一些的晶体可以减小热效应^[17], 增大晶体发生热裂时所能承受的抽运功率.

根据以上结论, 实验中选用了掺杂浓度为0.27 at.%的Nd:YVO₄晶体研究了连续自拉曼激光的输出特性, 晶体尺寸为4 mm × 4 mm × 10 mm. 实验中采用Ando公司的AQ-6315A型光谱仪测量了Nd:YVO₄连续自拉曼激光器的输出光谱, 输出激光波长有1064 nm和1175 nm两条谱线, 其中1064 nm为基频光, 1175 nm为拉曼频移光, 经过计算得到拉曼光的频移波数为890 cm⁻¹, 与YVO₄晶体拉曼谱中的最强的频移波数符合. 图4为1175 nm连续拉曼激光输出功率随LD抽运功率的变化曲线. 从图中可以看出, 尽管已经通过减小Nd:YVO₄晶体的掺杂浓度来减轻热效应, 但由于在连续自拉曼

激光器, 一块晶体同时作为激光和拉曼介质, 热效应更为严重, 单一Nd:YVO₄晶体还是由于热透镜效应严重, 连续拉曼激光输出功率在高抽运功率下趋于饱和, 在抽运功率为19.6 W时, 输出功率已经开始下降, 最高拉曼激光输出功率为2.13 W, 光光转换效率为10.9%.

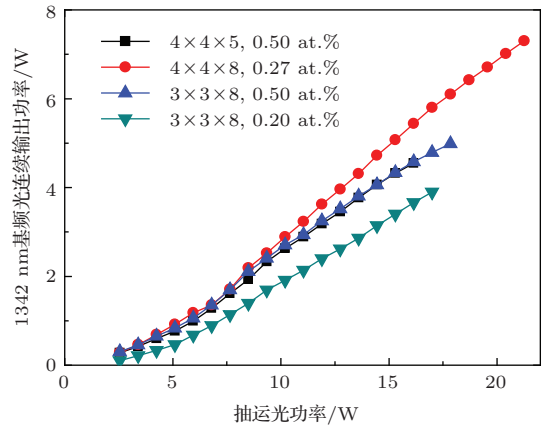


图3 不同掺杂浓度晶体下1342 nm基频激光输出功率曲线

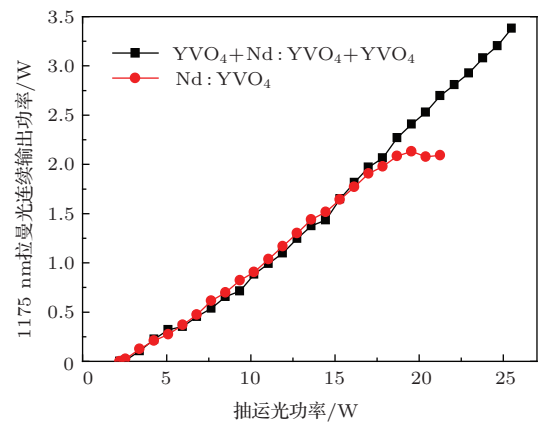


图4 复合和单一Nd:YVO₄晶体连续自拉曼1175 nm激光输出功率曲线

为了进一步减轻连续自拉曼激光器中的热效应获得更高功率的拉曼激光输出, 我们改用复合Nd:YVO₄晶体作为自拉曼介质研究了连续拉曼激光输出特性. 根据文献^[18]中的研究, 复合Nd:YVO₄晶体选用两端键合的YVO₄+Nd:YVO₄+YVO₄晶体, 晶体总长度为14 mm, 中间Nd:YVO₄部分的晶体尺寸为4 mm × 4 mm × 10 mm, 掺杂浓度为0.27 at.%, 前后键合的YVO₄长度为2 mm. 为了与前面单一Nd:YVO₄晶体的实验结果做对比, 复合Nd:YVO₄晶体连续自拉曼1175 nm激光输出功率曲线也画在图4中. 从

图中可以看出由于复合晶体良好的热传导, 在抽运功率范围内, 随着抽运功率的升高, 拉曼激光输出功率一直保持上升的趋势, 特别当抽运功率超过 19.6 W 时, 复合晶体的输出功率相对于前面的单一 Nd:YVO₄ 晶体有明显的提高, 当抽运功率为 25.5 W 时, 得到了 3.4 W 的稳定拉曼激光输出, 光光转换效率达到 13.3%, 且在 25.5 W 最高抽运功率下, 复合晶体镀膜层和晶体本身都没有出现光损伤. 由此可以看出复合晶体相对于单一晶体热效应有了显著的改善. 因此采用复合晶体作为自拉曼介质可以有效的减轻连续自拉曼激光器中的热透镜效应, 使拉曼激光输出功率更高, 且由于谐振腔的稳定区更宽, 可通过进一步增大抽运功率获得更高功率的拉曼激光输出.

5 结 论

本文研究了激光二极管端面抽运的 Nd:YVO₄ 连续自拉曼激光器, 实现了高功率、高效的 1175 nm 连续激光输出. 由于连续自拉曼激光器中晶体热效应是限制激光输出功率提高的主要因素, 所以实验中通过对晶体掺杂浓度和晶体结构的选择优化, 有效减轻了自拉曼晶体的热效应, 最终采用低掺杂浓度、热性能更好的复合晶体作为自拉曼介质, 在抽运功率 25.5 W 时, 获得了最高 3.4 W 的连续 1175 nm 拉曼光输出, 光光转换效率达到 13.3%, 拉曼阈值降低至 2.21 W, 斜效率为 14.6%, 且在最大抽运功率下拉曼激光输出功率也没有出现饱和现象. 由此可以证明采用复合晶体作为自拉曼介质的确可以有效减轻热透镜效应, 提高激光器输出功率和效率. 同时它还可以避免高温和应力对端面膜层的影响和破坏, 这样就可以通过进一步增加抽运功率获得更高功率拉曼激光输出而不至于引起晶体破裂.

参考文献

- [1] Zhu H Y, Zhang G, Zhang Y J, Huang C H, Duan Y M, Wei Y, Wei P F, Yu Y L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094209 (in Chinese) [朱海永, 张戈, 张耀举, 黄呈辉, 段延敏, 魏勇, 尉鹏飞, 于永丽 2011 物理学报 **60** 094209]
- [2] Wang B S, Peng J Y, Miao J G, Li Y M, Hao E J, Zhang Z, Gao L L, Tan H M 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 112
- [3] Wang B S, Tan H M, Gao L L, Peng J Y, Miao J G 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 2095
- [4] Wang Z P, Hu D W, Fang X, Zhang H J, Xu X G, Wang J Y, Shao Z S 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 122
- [5] Su F F, Zhang X Y, Wang Q P, Chang J, Jia P, Li S T, Zhang X L, Cong Z H 2007 *Chin. Phys. B* **16** 3370
- [6] Grabtchikov A S, Lisinetskii V A, Orlovich V A, Schmitt M, Maksimenka R, Kiefer W 2004 *Opt. Lett.* **29** 2524
- [7] Demidovich A A, Grabtchikov A S, Lisinetskii V A, Burakevich V N, Orlovich V A, Kiefer W 2005 *Opt. Lett.* **30** 1701
- [8] Burakevich V N, Lisinetskii V A, Grabtchikov A S, Demidovich A A, Orlovich V A, Matrosov V N 2007 *Appl. Phys. B* **86** 511
- [9] Lisinetskii V A, Grabtchikov A S, Demidovich A A, Burakevich V N, Orlovich V A, Titov A N 2007 *Appl. Phys. B* **88** 499
- [10] Lee A J, Pask H M, Omatsu T, Dekker P, Piper J A 2007 *Appl. Phys. B* **88** 539
- [11] Dekker P, Pask H M, Spence D J, Piper J A 2007 *Opt. Express* **15** 7038
- [12] Lee A J, Pask H M, Dekker P, Piper J A 2008 *Opt. Express* **16** 21958
- [13] MacDonald M P, Graf T, Balmer J E, Weber H P 2000 *Opt. Commun.* **178** 383
- [14] Chang Y T, Su K W, Chang H L, Chen Y F 2009 *Opt. Express* **17** 4330
- [15] Lu Y F, Zhang X H, Li S T, Xia J, Cheng W B, Xiong Z 2010 *Opt. Lett.* **35** 2964
- [16] Kaminskii A A, Ueda K, Eichler, H J, Kuwano Y, Kouta H, Bagaev S N, Chyba T H, Barnes J C, Gad G M A, Murai T, Lu J R 2001 *Opt. Commun.* **194** 201
- [17] Chen Y F 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 234
- [18] Chang Y F, Huang Y P, Su K W, Chen Y F 2008 *Opt. Express* **16** 21155

Laser diode end-pumped continuous-wave Nd:YVO₄ self-Raman laser at 1175 nm*

Fan Li[†] Chen Hai-Tao Zhu Jun

(School of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

(Received 11 February 2014; revised manuscript received 27 February 2014)

Abstract

In this paper, an LD (laser diode) end-pumped continuous-wave Nd:YVO₄ self-Raman laser at 1175 nm is reported. The doping concentration and structure of the self-Raman crystals are optimized to reduce the thermal effects of the crystal, and a high-efficient diode-end-pumped continuous-wave self-Raman laser operated at 1175 nm is demonstrated. Finally, the thermal effects are efficiently improved by using a double-end diffusion-bonded composite Nd:YVO₄ crystal as a gain medium. An output power up to 3.4 W of the first-order Stokes line 1175 nm is achieved at the incident diode pump power of 25.5 W, corresponding to a diode-to-Stokes optical conversion efficiency of 13.3% and a slope efficiency of 14.6%. The Raman threshold is as low as 2.21 W of diode power at 808 nm.

Keywords: self-raman lasers, continuous-wave, Nd:YVO₄ crystal, composite crystal

PACS: 42.55.Ye, 42.60.Pk, 42.65.Ky, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.63.154208

* Project supported by the Young Scientists Fund of the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20130453), and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11004170).

[†] Corresponding author. E-mail: fanli@yzu.edu.cn