

1318 nm ZnWO₄/Nd:YAG 二阶拉曼激光器

任席奎^{1,2,4}, 谢建^{1,2}, 阮双琛^{2,4*}, 裴继红¹, 王欣³, 于浩海³, 张怀金³, 吕启涛^{4,5}, 郭丽⁵,
曹洪涛⁵, 谢圣君⁵, 高云峰⁵, 何柏林⁵, 杜晨林^{2,4**}

¹深圳大学电子与信息工程学院, 广东 深圳 518060;

²深圳大学深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060;

³山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100;

⁴深圳技术大学, 广东 深圳 518118;

⁵大族激光科技股份有限公司, 广东 深圳 518057

摘要 为研究 ZnWO₄晶体的二阶拉曼性质,搭建了基于 ZnWO₄晶体的二阶拉曼激光器,实现了重复频率为 9 kHz 的 670 mW 的 1318.3 nm 的二阶斯托克斯激光输出,对应的脉宽为 3.294 ns,光光转换率为 4.7%,峰值功率达到 22.6 kW。实验结果表明,ZnWO₄晶体具有良好的性能,能够实现二阶拉曼激光输出。

关键词 固体激光器; 拉曼激光器; ZnWO₄晶体

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0536001

ZnWO₄/Nd:YAG Second-Order Raman Laser at 1318 nm

Ren Xikui^{1,2,4}, Xie Jian^{1,2}, Ruan Shuangchen^{2,4*}, Pei Jihong¹, Wang Xin³, Yu Haohai³,
Zhang Huaijin³, Lü Qitao^{4,5}, Guo Li⁵, Cao Hongtao⁵, Xie Shengjun⁵, Gao Yunfeng⁵,
He Bolin⁵, Du Chenlin^{2,4**}

¹College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

³State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China;

⁴Shenzhen Technology University, Shenzhen, Guangdong 518118, China;

⁵Han's Laser Technology Industry Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract In order to study the second-order Raman properties of ZnWO₄ crystal, a second-order Raman laser based on ZnWO₄ crystal is built, and the second-order Stokes laser output of 670 mW at 1318.3 nm with a repetition frequency of 9 kHz is realized. The corresponding pulse width is 3.294 ns, the optical-to-optical conversion efficiency is 4.7%, and the peak power is 22.6 kW. The experiment results show that the ZnWO₄ crystal has good performance and can realize second-order Raman laser output.

Key words solid-state laser; Raman laser; ZnWO₄ crystal

OCIS codes 140.3460; 140.3580; 140.3550

固体拉曼激光器具有结构紧凑、转换效率高与稳定性高等优点,通过结合不同拉曼晶体与不同波长的泵浦源,可以实现不同波长的激光输出,极大丰富了固体激光器的输出波长范围,是近年来国内外研究的热点之一。常见的拉曼晶体有 BaNO₃, BaWO₄, SrWO₄, YVO₄与金刚石等,利用它们已经实现了从紫

外到红外的激光输出^[1-5]。ZnWO₄晶体具有良好的物理性质与光学性质:其热导率比 BaWO₄、SrWO₄高,这意味着其具有更小的热透镜效应,适用于高功率固体激光器;其透光范围比 BaNO₃, BaWO₄, SrWO₄等晶体更大,波长 430~6200 nm 的透光率高达 80% (3 mm厚的晶体材料),这意味着其适用于近红外甚

收稿日期: 2019-12-05; 修回日期: 2020-01-05; 录用日期: 2020-01-14

基金项目: 国家重点科技攻关项目(2016YFA0401100)、国家自然科学基金(61575129)、深圳市科技计划基础研究(学科布局)项目(JCYJ20160331114355870)

* E-mail: scruan@sztu.edu.cn; ** E-mail: cldu@szu.edu.cn

至中红外的拉曼激光器^[6]。但是,受限于 ZnWO_4 的生长工艺等, ZnWO_4 晶体很少用于拉曼激光器。Wang 等^[6]报道了 ZnWO_4 的物理与光学性质,并进行了拉曼散射实验,成功观察到了拉曼散射光谱,将波长从 532 nm 频移到 558.95 nm,但是此实验装置没有谐振腔,不是一个真正意义上的激光器。杜晨林课题组搭建了基于 ZnWO_4 晶体的一阶拉曼固体激光器,将 1899 nm 激光转换到 2294 nm,输出功率为 184 mW,此实验虽然实现了 ZnWO_4 一阶拉曼激光的输出,但是输出的功率不高^[7]。

本文使用波长为 808 nm 的激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 晶体以产生基频光,搭建了基于 ZnWO_4 的二阶拉曼激光器,研究了其在不同重复频率下的激光输出特性。最终获得了 1318.3 nm 的二阶拉曼激光输出,在泵浦功率为 14.2 W、重复频率为 9 kHz 时,获得的最大平均输出功率为 670 mW,对应的脉冲宽度为 3.294 ns,光光转换率为 4.7%,峰值功率达到 22.6 kW。本文首次实现了基于 ZnWO_4 的二阶拉曼激光器输出,实验结果表明, ZnWO_4 作为二阶拉曼晶体表现良好,可应用于二阶拉曼激光器中。

实验装置简图如图 1 所示,以中心波长为 808 nm 的激光二极管(LD)为泵浦源,泵浦光经过纤芯为 400 μm 的光纤耦合至一个扩束比为 1:1.5 的透镜组扩束器中,并会聚于 Nd:YAG 晶体的中心。M1 是直径为 20 mm 的 JGS1 凹面石英片,双面均对 808 nm 高透(透射率 $T > 99.9\%$),凹面曲率半径为 250 mm,对 1020~1400 nm 增反(反射率 $R > 99.5\%$)。M2 是直径为 20 mm 的 JGS1 平面石英片,对 1020~1200 nm 高反($R > 99.5\%$),对 1300~1400 nm 的透过率约为 70%。Nd:YAG 晶体用来产生基频激光,晶体的掺杂浓度(原子数分数,全文同)为 1%,几何尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 15 mm,晶体的两端被抛光并对 1064 nm 增透($T > 99.9\%$)。声光 Q 开关晶体长度约为 57 mm,重复频率在 1~

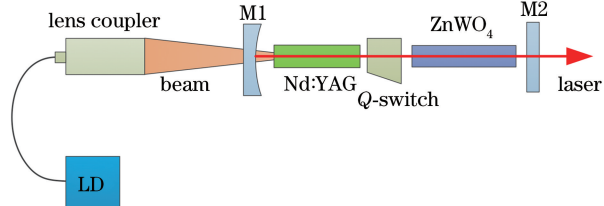


图 1 二极管泵浦 Nd:YAG/ ZnWO_4 二阶拉曼固体激光器

Fig. 1 Diode-pumped Nd:YAG/ ZnWO_4 second-order Raman solid state laser

100 kHz 范围内连续可调,对两端镀膜使其对 1064 nm 基频光增透($T > 99.9\%$)。对 ZnWO_4 晶体两端进行光学抛光。用厚度为 0.1 mm 的钢片包裹 Nd:YAG 晶体与 ZnWO_4 晶体,并将其置于紫铜热沉之上,紫铜热沉通冷却循环水,用恒温水箱将温度控制为 19 $^{\circ}\text{C}$ 。

首先用 ABCD 矩阵分析腔内的光斑分布情况。整个谐振腔 M1 至 M2 的长度约为 140 mm,将晶体 Nd:YAG 等效为一个薄透镜, Nd:YAG 晶体在 8 mm 处, ZnWO_4 晶体在 112 mm 处。当 Nd:YAG 晶体的热透镜焦距在 400~1000 mm 范围内变动时, Nd:YAG 晶体中心处的模直径在 720~600 μm 范围内变动。如图 2 所示,当 Nd:YAG 热透镜焦距为 600 mm 时, Nd:YAG 中心处的模半径为 322 μm , ZnWO_4 晶体中心处的模半径是 170.3 μm 。因此,实验中选择 1:1.5 的扩束镜,以尽量满足基频光与泵浦光的模式匹配要求。基频光与斯托克斯激光共用一个谐振腔,腔内模式分布基本相同。越靠近 M2 位置,激光器的光束越细,故为了提高基频光在拉曼晶体中的功率密度,应将 ZnWO_4 晶体尽量放置在靠近 M2 的位置。

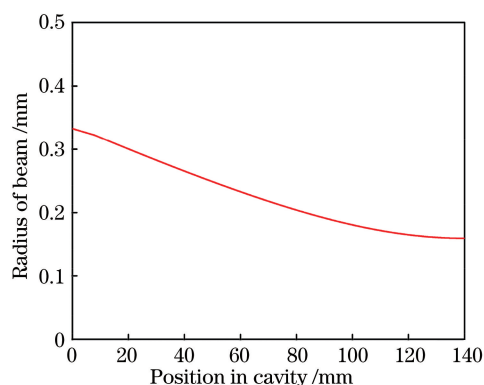


图 2 热透镜焦距为 600 mm 时的腔内基频光模式分布
Fig. 2 Fundamental laser mode distribution in cavity when focal length of hot lens is 600 mm

实验中测试了 ZnWO_4 晶体的拉曼频移谱线,观测到其在 906 cm^{-1} 处有最强的拉曼峰^[7],本文的二阶拉曼激光器主要根据 906 cm^{-1} 这根谱线进行设计。使用光谱仪测量拉曼激光器的输出光谱,结果如图 3 所示。基频光中心波长是 1064.1 nm,一阶斯托克斯激光中心波长是 1177.6 nm,二阶斯托克斯激光的中心波长是 1318.3 nm,频移量分别为 905.8 cm^{-1} 与 906.3 cm^{-1} ,与测试的 ZnWO_4 晶体拉曼频移量 906 cm^{-1} 基本吻合,说明得到的 1318.3 nm 激光是 ZnWO_4 拉曼激光器的二阶斯托克

斯拉曼激光。Nd:YAG 在 1318 nm 处有发射峰,但是由于 1318 nm 发射峰的发射截面远小于 1064 nm 的发射截面,再加上本文选择的输出耦合镜的透过率比较高,理论上 Nd:YAG 晶体的 1318 nm 发射峰起振可以被抑制。进行了实验验证:当声光 Q 开关关闭时,激光器运行在连续状态下,增加泵浦功率至 15.5 W,通过光谱仪只观察到 1064 nm 的信号光,这说明 Nd:YAG 晶体 1318 nm 的发射峰没有起振,后面在调 Q 模式下得到的 1318.3 nm 的激光是 ZnWO₄ 晶体的二阶拉曼激光。

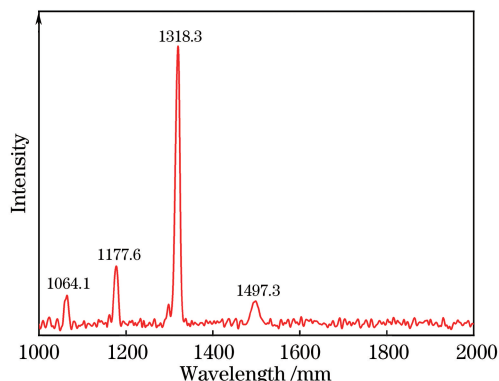


图 3 拉曼激光器的输出光谱
Fig. 3 Output spectrum of Raman laser

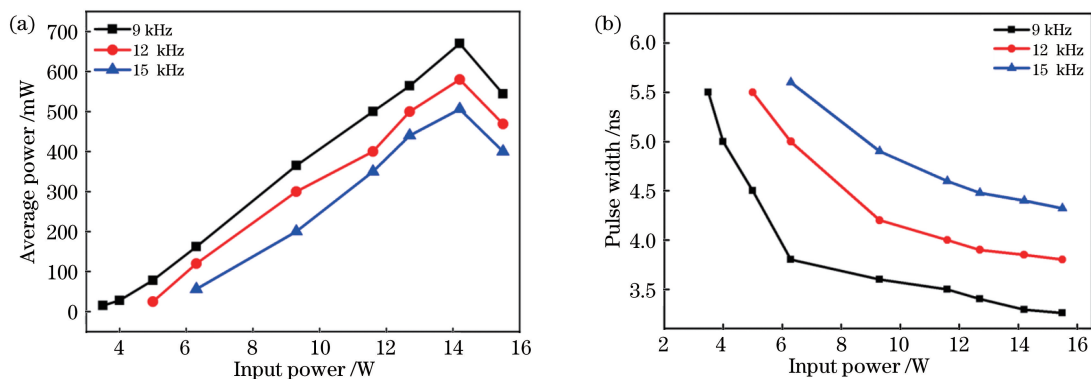


图 4 不同重复频率下平均功率、脉冲宽度与泵浦功率的关系。(a)平均功率;(b)脉冲宽度
Fig. 4 Relationships among average power, pulse width and pump power with different repetition frequencies.
(a) Average power; (b) pulse width

当重复频率为 9 kHz、泵浦功率为 15.5 W 时,脉冲宽度最窄,时域脉冲信号如图 5 所示。之前测得的基频光的脉宽都在 17 ns 以上,由于拉曼激光器具有显著压缩脉冲宽度的作用^[8-9],此时脉冲宽度窄至 3.258 ns,激光器的平均输出功率(544 mW)较低,导致此处的峰值功率(18.6 kW)不是最高的。最高峰值功率在泵浦功率为 14.2 W 处获得,此时的脉冲宽度为 3.294 ns,峰值功率为 22.6 kW。

本文首次实现了 ZnWO₄ 的二阶拉曼激光器的设计,得到的 1318.3 nm 的二阶斯托克斯激光的最

测试了不同重复频率下拉曼激光的平均功率与脉冲宽度,图 4 为平均功率、脉冲宽度与泵浦功率的关系。当重复频率分别为 9, 12, 15 kHz, 泵浦功率分别为 3.3, 4.2, 5.4 W 时,二阶拉曼激光器达到起振阈值,9 kHz 时拉曼激光器的阈值最低,这主要是因为重复频率越低,腔内的峰值功率越高,越利于拉曼激光起振。当 808 nm 泵浦激光的功率小于 14.2 W 时,二阶斯托克斯激光的平均功率随着泵浦功率的增加呈线性增加,当 808 nm 泵浦激光的功率为 14.2 W 时,三者(9, 12, 15 kHz)拉曼激光平均功率均达到最大,分别为 670, 580, 506 mW,对应的光光转换率分别为 4.7%, 4.1%, 3.5%。此后继续增加泵浦功率,拉曼激光的输出功率呈下降趋势,这主要是因为腔内积累了过多的热量,发生了严重的热透镜效应,影响了激光器的稳定运行,降低了拉曼激光的转换效率。用光电探测器结合示波器探测了拉曼激光器的输出脉冲宽度(半峰全宽, FWHM),拉曼激光器的脉冲宽度随着泵浦功率的增加而逐渐变窄,当激光器运行于 9, 12, 15 kHz 重复频率下时,脉冲宽度均在泵浦功率为 15.5 W 处达到最窄,分别为 3.258, 3.800, 4.320 ns。

大输出功率为 670 mW,重复频率为 9 kHz,脉冲宽度为 2.294 ns,光光转换率为 4.7%,峰值功率达到 22.6 kW。实验结果表明,ZnWO₄ 具有良好的性能,可以将其作为拉曼晶体用于二阶拉曼激光器的设计。实验中观测到 1497 nm 谱线的跳跃,这表明 ZnWO₄ 晶体发生了三阶拉曼散射,说明 ZnWO₄ 晶体有望被应用于三阶拉曼激光器的设计之中。受实验条件限制,谐振腔内的 Nd:YAG 晶体、声光 Q 开关晶体与 ZnWO₄ 晶体并没有针对 1177.6 nm 与 1318.3 nm 激光镀增透膜,因此激光器腔内的损耗

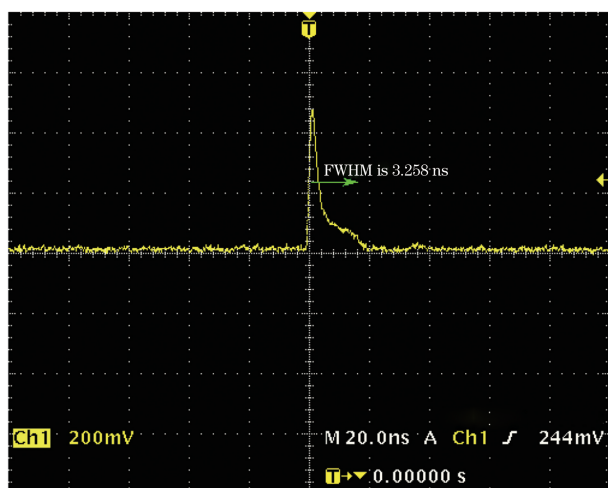


图 5 重复频率为 9 kHz、泵浦功率为 15.5 W 时二阶斯托克斯激光的瞬时脉冲形状

Fig. 5 Instantaneous pulse shape of second-order Stokes laser at repetition frequency of 9 kHz and pumping power of 15.5 W

较大。此外,为了避免 Nd:YAG 发射峰 1318 nm 的起振对二阶拉曼信号的干扰,本文输出耦合镜只研究了透过率为 70% 的情况,可能此透过率并非最佳。上述两点可能是影响拉曼转换效率的主要原因,后期将针对这两方面进行优化与改进,ZnWO₄ 的二阶拉曼激光器的转换效率还有提升空间。

参 考 文 献

[1] Lisinetskii V A, Riesbeck T, Rhee H, et al. High average power generation in barium nitrate Raman

laser[J]. Applied Physics B, 2010, 99(1/2): 127-134.

- [2] Zhang H N, Chen X H, Wang Q P, et al. Efficient diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG/SrWO₄ Raman laser operating at 1252.4 nm [J]. Optics Communications, 2015, 335: 28-31.
- [3] Zhang X L, Ding Y, Qiao Y, et al. Diode-end-pumped efficient 2533 nm intracavity Raman laser with high peak power [J]. Optics Communications, 2015, 355: 433-437.
- [4] Jiang W, Zhu S Q, Chen W D, et al. Q-switched Yb:YAG/YVO₄ Raman laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(10): 1080-1083.
- [5] Murtagh M, Lin J P, Mildren R P, et al. Efficient diamond Raman laser generating 65 fs pulses [J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15504-15513.
- [6] Wang X, Fan Z, Yu H H, et al. Characterization of ZnWO₄ Raman crystal [J]. Optical Materials Express, 2017, 7(6): 1732-1744.
- [7] Xie J, Ren X K, Yu Y Q, et al. 2294 nm end-pumped ZnWO₄ Raman laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1201001.
谢建, 任席奎, 于永芹, 等. 2294 nm 端面抽运 ZnWO₄ 拉曼激光器 [J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201001.
- [8] Band Y B, Ackerhalt J R, Krasinski J S, et al. Intracavity Raman lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(2): 208-213.
- [9] Pask H M. The design and operation of solid-state Raman lasers [J]. Progress in Quantum Electronics, 2003, 27(1): 3-56.