

激光技术

分段侧泵双波长拉曼激光器

王巍, 杜鹏飞, 高淦, 裘园, 耿东暉

(清华大学 光子与电子研究中心, 北京 100084)

摘要:报道了一种用于双波长调制的二极管泵浦 Q 开关 Nd:YAG-KGW 拉曼激光器。该激光器采用分段侧面泵浦的结构, 使用传导冷却+风冷的散热方式, 具有小型化潜力。输出波长可通过电光开关在 1 159 nm 和 1 177 nm 之间切换, 并实现了在时间/光谱二维域调制的一阶斯托克斯脉冲输出。拉曼输出脉冲 1 177 nm 和 1 159 nm 的能量分别为 114 mJ 和 98 mJ, 对应 Diode-Stokes 总的光-光效率分别为 15.3% 和 13.2%。

关键词: 固体拉曼激光器; 分段侧泵浦; 多波长激光器

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-04-0018-04

Segmented LD Arrays Side-pumped Double Wavelength Raman Laser

WANG Wei, DU Peng-fei, GAO Gan, QIU Yuan, GENG Dong-xian

(Photon and Electron Research Center of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A diode-pumped Q-switched Nd:YAG-KGW Raman laser operating in dual-wavelength modulation is reported. The novel design of segmented circular laser diode (LD) arrays side-pumped structure with conductive and air cooling has great potential to be used in compact and miniature laser systems. The output wavelength of the 1 159 nm and 1 177 nm modulated in spectra-time domains is achieved by an E-O switch, and first-stokes pulse output modulated at spectra-time two-dimensional domains. Pulse energy up to 114 mJ at 1 177 nm and 98 mJ at 1 159 nm are obtained respectively, corresponding to diode-stokes efficiency of 15.3% at 1 177 nm and 13.2% at 1 159 nm.

Key words: diode-pumped Raman laser; segmented laser diode (LD) arrays side-pumped structure; multi-wavelength laser

双波长激光器有着自身独特的优势, 在光通信、光动力学医疗、光计算、非线性频率变换、环境监测、激光遥感、激光雷达等方面有广泛的应用, 因此近年来成为了热门的研究课题^[1-4]。随着激光技术的发展和运用, 激光器的性能也得到了很大的提高, 如波长的扩展和可控快速切换、激光器体积/重量小型化等^[5-8]。

文中报道的这种二极管泵浦 Q 开关 Nd:YAG-KGW 拉曼激光器, 采用了分段侧泵的结构形式^[9-10], 利用晶体材料的受激拉曼散射(SRS), 通过在拉曼激光器引入一个 $\lambda/2$ 的电光开关, 使得基波的偏振方向可以方便变换, 同时结合 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 晶体的偏

振依靠属性实现了双波长调制输出^[11-12]。

在中心波长 808 nm, 脉冲能量 745 mJ 的泵浦下, 输出脉冲能量 114 mJ (峰值功率 19 MW) 的 1 177 nm 拉曼脉冲, 或脉冲能量 98 mJ (峰值功率 15 MW) 的 1 159 nm 拉曼脉冲, 对应 Diode-Stokes 总的光-光效率分别为 15.3% 和 13.2%, 对应斜效率为 24.3% 和 20.2%。

1 实验装置

实验布局如图 1 所示。使用了一个 T 型折叠腔配置, 其中基波谐振腔和斯托克斯谐振腔分隔布局

且独立工作。该实验设计保证了较高的内腔功率密度和较好的模式匹配条件。其中,基波谐振腔采用环形分段间隔侧泵结构,解决了无液冷装置下的散热问题;斯托克斯谐振腔配合 $\lambda/2$ 的电光开关用以控制基波的偏振方向,从而实现控制并选择拉曼波长。

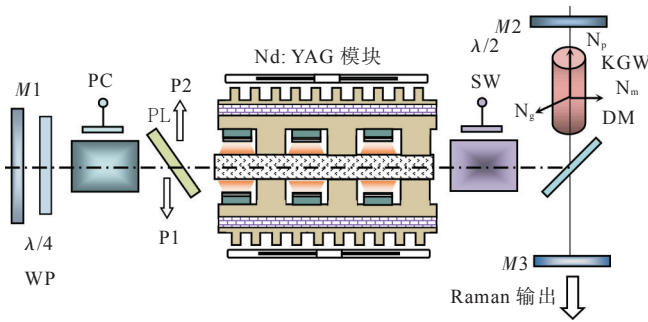
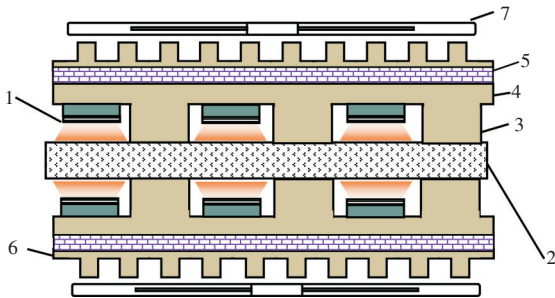


图1 分段侧泵双波长拉曼激光器的实验装置示意图

1.1 环形分段间隔侧面泵浦

基波腔中Nd:YAG模块的实验装置结构如图2所示。



(1-半环形LD泵浦模块;2-激光棒;3-夹持件;4-热沉;5-TEC致冷片;6-热交换器;7-风扇)

图2 Nd:YAG模块分段间隔侧泵结构示意图

使用了一种LD环形阵列侧泵结构。其中,LD环形阵列分段放置在热沉上,上下对称放置并同夹持件留有一定的装配间隙。Nd:YAG激光棒位于环形结构的中心,并被上下夹持件分段固定。模块使用传导冷却+风冷的冷却方式,其中热沉对传导冷却起着重要作用,它将LD阵列和Nd:YAG晶体的产热传导在热电制冷片(TEC)和热交换器上。TEC负责温度控制,而最外侧的风扇完成强制风冷换热,因此热沉的温度可以得到较好控制,从而有效避免LD随温度的波长漂移,也在一定程度上减小了热光效应的危害。

分段间隔侧泵结构能够引导激光棒中的热量沿轴向传播,而非径向传播,从而有效地减小径向方向的温度梯度,减小热光效应的危害。

1.2 “T”型折叠腔配置

为了选择输出两种波长的拉曼光,采用了T型折叠腔配置,其中基波谐振腔和斯托克斯谐振腔分别独立工作。实验设置特别引入了一个 $\lambda/2$ 的电光开关以便控制基波的偏振方向,同时利用KGW晶体的偏振依靠属性,达到控制并选择拉曼波长的目的。

图1中,平面镜M1和M2定义了一个高Q值的基波谐振腔,平面镜M1镀有基波1064nm的高反膜,平面镜M2镀有1064nm、1177nm和1159nm的高反膜,同时M2还镀有二阶斯托克斯光1317nm和1272nm的高透膜。基波由Nd:YAG模块产生,Nd:YAG棒由热沉夹持件分段夹持在模块中间。电光Q开关由一个 $\lambda/4$ 波片,一个普克尔盒和起偏器组成。起偏器对P偏振波高透,对S偏振波高反。引入的 $\lambda/2$ 的电光开关SW也在基波腔中,SW和M2之间的基波偏振方向由电光开关SW控制。

平面镜M2和M3定义了一个斯托克斯腔。其中,M3是两种一阶斯托克斯光1177nm和1159nm的输出耦合镜。拉曼介质两端镀有1064nm和一阶斯托克斯波长的高透膜并沿晶体折射率椭球 N_p 轴切割, N_p 轴向同时也是基波的传播方向。波长分束片DM与基波传播方向呈 45° 摆放,用于隔离基波光场和斯托克斯光场。

1.3 双波长切换

当电光开关SW没加载电压时,基波的偏振方向不会改变,基波谐振腔中的光场保持P偏振,即与KGW晶体折射率椭球的 N_m 轴一致。根据KGW晶体的偏振自发拉曼光谱特性,将得到1177nm的一阶斯托克斯线。而当 $\lambda/2$ 的电光开关SW通电后,经过电光开关SW后的基波偏振方向将旋转 90° 。虽然M1和电光开关SW之间的光场仍然保持P偏振,但电光开关SW和M2之间的光场会改变为S偏振,即平行于KGW晶体折射率椭球的 N_s 轴,因此得到1159nm的一阶斯托克斯线。

另外,镀膜的平面镜M2只支持一阶斯托克斯光谐振,阻碍更高阶的斯托克斯光起振,斯托克斯谐振腔只能输出1177nm和1159nm波长的拉曼

激光。

2 结果与讨论

研究了该拉曼激光器输出的光谱特性,时间特性和光束质量。

在 $\lambda/2$ 的电光开关没有通电的情况下,光谱分析仪(安捷伦86140B)记录了拉曼输出光谱,结果如图3所示。

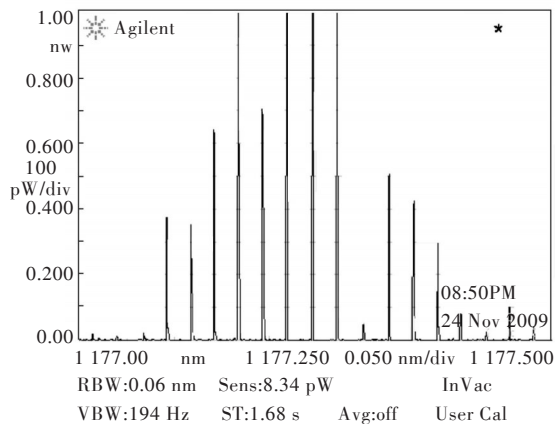


图3 1177 nm拉曼输出光谱

所测得的拉曼光谱显示激光器只输出了波长1177 nm的一阶斯托克斯光,其谱线宽度小于0.4 nm,相对1064 nm的基波频移了 901.5 cm^{-1} ,这也和KGW晶体中 N_m 轴拉曼振动模式的频移一致。同理,当 $\lambda/2$ 的电光开关上电后,拉曼输出的光谱信息如图4所示,且谱宽也小于0.4 nm。

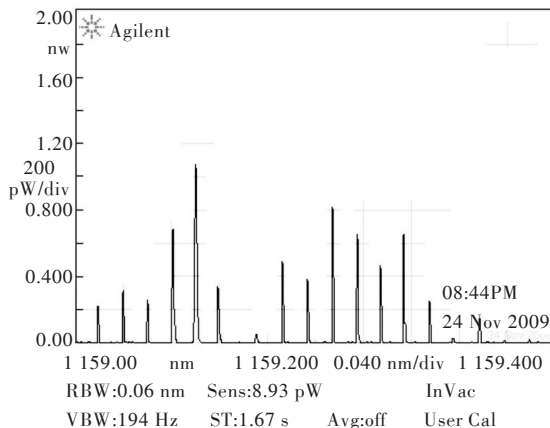


图4 1159 nm拉曼输出光谱

所测的拉曼光谱表明,激光器只输出了波长1159 nm的一阶斯托克斯光,其相对基波波长有

767.5 cm^{-1} 的频移,同KGW晶体中 N_m 轴拉曼振动模式的频移一致。该激光器实现了双波长拉曼线的选择。

双波长拉曼脉冲的时间特性包括脉冲重复频率特性和时间演化特性。该激光器输出的脉冲重复频率测得约为11.5 Hz。图5和图6分别显示了1177 nm和1159 nm拉曼脉冲的时间演化特性。



图5 1177 nm拉曼脉冲时间演化特性



图6 1159 nm拉曼脉冲时间演化特性

当选择输出1177 nm的拉曼脉冲时,其脉宽约为7.09 ns而基波脉冲脉宽约为10.4 ns;当选择输出1159 nm的拉曼脉冲时,其脉宽约为7.09 ns,而基波脉冲宽度约13.5 ns。基波脉冲脉宽通过起偏器PL处P1的插入损耗确定(见图1),并由示波器(安捷伦54845B)记录。可见,该脉宽压缩比不大于2,这是因为较高的内腔环形功率密度使得拉曼光较基波具有更低阈值。拉曼光同基波的延迟约为8.5 ns。

使用Spricon的 M^2 仪($M^2-200 \text{ s}$)测量了近场光斑轮廓,如图7所示。图7a所示的是1177 nm波长的拉曼输出近场光斑,图7b所示的是1159 nm波长的拉曼输出近场光斑。在脉冲能量745 mJ,重复频率11 Hz的脉冲泵浦下,1177 nm激光束在 x 向的发

散角为 3.1 mrad, 在 y 向的发散角为 4.1 mrad; 而 1 159 nm 激光束在 x 向的发散角为 3.8 mrad, 在 y 向的发散角为 4.8 mrad。

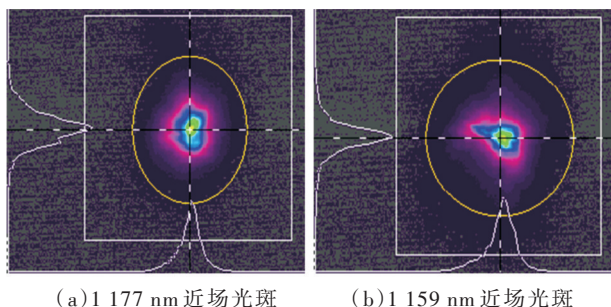


图7 拉曼输出的近场光斑

1 177 nm 和 1 159 nm 的拉曼脉冲能量(峰值功率)由 Moletron EPM-2000 分别记录了下来。图 8 画出了波长 1 177 nm 的拉曼脉冲能量和相应的峰值功率, 以及起偏处基波反射功率损耗 P_1 、 P_2 随 808 nm 的入射泵浦能量变化的曲线。

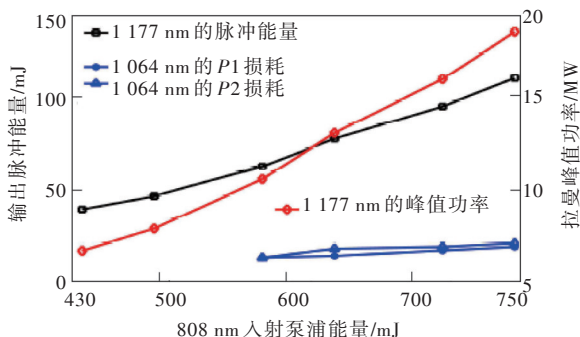


图8 1 177 nm 拉曼脉冲输出能量, 峰值功率以及起偏处基波反射损耗 P_1 、 P_2 随 LD 泵浦输入能量的变化曲线

一旦泵浦能量达到了拉曼效应的阈值, 波长 1 177 nm 一阶斯托克斯光的脉冲能量和峰值功率均会随着 LD 泵浦能量的增加而线性增长。当使用 745 mJ 的脉冲泵浦时, 可得到能量高达 114 mJ, 峰值功率 19 MW 的拉曼输出脉冲, 其对应 Diode-Stokes 总的光-光效率为 15.3%, 斜效率 23.3%。基波反射损耗功率 P_1 、 P_2 随着 LD 泵浦入射能量的提高呈现缓慢的线性增加, 且始终保持在 20 mJ 以下的水平; 而且, 损耗功率 P_1 总是略低于 P_2 , 且没有偏离线性的突变。这意味着热致双折射和热致退偏等热光效应都没有在折叠腔内产生。

图 9 作出了波长 1 159 nm 一阶斯托克斯光的脉

冲能量和峰值功率曲线。

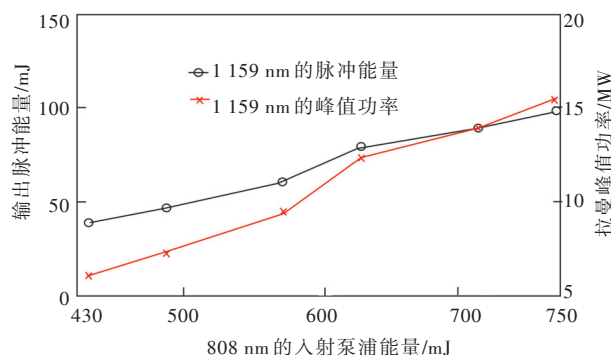


图9 1 159 nm 拉曼脉冲输出能量及峰值功率随 LD 泵浦输入能量的变化曲线

同图 8 相比, 1 159 nm 的光脉冲能量和相应峰值功率情况均和 1 177 nm 类似, 同泵浦脉冲能量基本保持线性关系, 但比 1 177 nm 的光脉冲能量和峰值功率略小。这是由这两种斯托克斯波长具有不同固定增益值和不同损耗以及不同的耦合输出造成的。当入射泵浦脉冲能量为 745 mJ 时, 可得到脉冲能量 98 mJ 的 1 159 nm 一阶斯托克斯光, 峰值功率 15 MW, 对应 Diode-Stokes 总的光-光效率 13.2%, 斜效率 20.2%。

3 结论

报道了一种用于双波长调制的二极管泵浦 Q 开关 Nd: YAG-KGW 拉曼激光器。该激光器分段侧泵的泵浦方式使激光器摆脱复杂的水冷系统, 有利于激光器的紧凑小型化, 通过利用 KGW 晶体的偏振依靠属性和 $\lambda/2$ 的电光开关, 成功实现了 1 177 nm 和 1 159 nm 两种波长的输出以及在光谱/时间二维域的双波长调制输出。

参考文献

- [1] 李森, 吴凡, 吕志伟. 基于液晶空间调制器的激光近场光束整形[J]. 光电技术应用, 2017, 32(3): 19-23.
- [2] 王毕艺, 陈亚楠. 飞秒激光大气等离子体通道诱导放电技术研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(3): 24-27.
- [3] 李庆轩, 杨旭, 秦文斌. 大功率半导体激光器防反射光损伤技术研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(2): 21-24.
- [4] 孙晓泉, 吕跃广. 激光对抗原理[M]. 北京: 解放军出版社, 2000.

(下转第 56 页)

控制不稳定的现象。

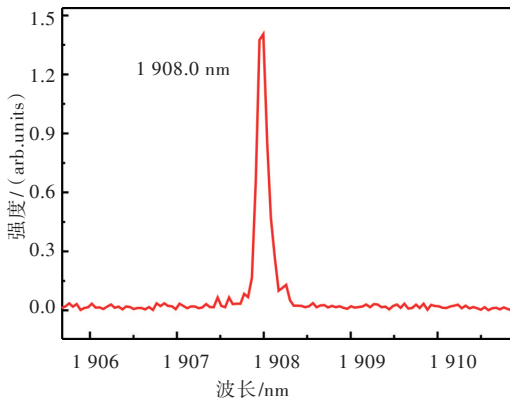


图5 板条状单晶体 Tm:YLF 激光器输出波长

4 结论

在室温条件下,利用激光二极管双端抽运 Tm:YLF 板条激光器方案实现了 1 908 nm 的激光输出,选择合适的泵浦光斑尺寸,当晶体温度控制在 18 ℃,获得的最大连续输出功率为 60.1 W 的,斜率效率为 39.8%,通过采用 VBG 配合 0.3 mm F-P 的方法实现了波长的精细控制,半峰值宽度约为 0.14 nm,随着输出功率的增加,波长只有 0.2 nm 的小幅度漂移,为获得高效率、高功率的 2 μm 激光提供了有效的途径。

参考文献

- [1] Barnes N P, Jani M G, Hutcheson R L. Diode-pumped, room-temperature Tm:LuAG laser[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(21): 4290-4294.
- [2] Mateos X, Liu J, Zhang H, et al. Continuous-wave and tunable laser operation of Tm:LuVO₄ near 1.9 μm under Ti:sapphire and diode laser pumping[J]. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials*, 2006, 203(4): R19-R21.
- [3] Koopmann P, Lamrini S, Scholle K, et al. Efficient diode-pumped laser operation of Tm:Lu₂O₃ around 2 μm[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 948-950.
- [4] Mateos X, Petrov V, Liu J, et al. Efficient 2-μm continuous-wave laser oscillation of Tm³⁺:KLu(WO₄)₂[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(10): 1008-1015.
- [5] Esser M J D, Preussler D, Bernhardt E H, et al. Diode-end-pumped Tm:GdVO₄ laser operating at 1818 and 1915 nm [J]. *Applied Physics B*, 2009, 97: 351-356.
- [6] Schellhorn M, Ngcobo S, Bollig C. High-power diode-pumped Tm:YLF slab laser[J]. *Applied Physics B*, 2009, 94: 195-198.
- [7] Cheng X, Xu J, Hang Y, et al. High-power diode-end-pumped Tm:YAP and Tm:YLF slab lasers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(9): 091406.
- [8] Li J, Yang S H, Meissner A, et al. A 200 W innoslab Tm:YLF laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10: 055002.
- [9] Lai K S, Xie W J, Wu R F, et al. A 150 W 2-micron diode-pumped Tm:YAG laser[C]// *Proc. of ASSL*, 2002: 535-539.
- [10] Wang C, Niu Y, Du S, et al. High-power diode-side-pumped rod Tm:YAG laser at 2.07 μm[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(31): 7494-7497.
- [11] Wang W, Gong M L. Segmented circular LD arrays side-pumped a Nd:YAG laser rod[J]. *Laser Physics*, 2010, 20(6): 1344-1349.
- [12] Wang W, Gong M L. Efficient high-output diode side-pumped electro-optical Q-switched Nd:YAG/KGW (WO₄)₂ Raman laser with conductive and air cooling[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(4): 294-297.
- [13] Wang W, Gong M L. Diode-pumped Q-switched Nd:YAG-KGW Raman laser operating in two-color modulation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2655-2661.

(上接第21页)

- [5] 刘京郊. 光电对抗技术与系统[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2004.
- [6] 李铸澎,孙芮,金光勇. LD端面抽运 1.3 μm 双波长激光器研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(4): 1-3.
- [7] 王超,金光勇,梁伟,等. Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 小型无水冷却激光器[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S1): 67-70.
- [8] 唐刚锋,沈兆国,尚旭川,等. 用液态金属传热的小型大功率全固态 Nd:YAG 板条激光器[J]. *应用光学*, 2013, 34(4): 680-685.
- [9] Wang W, Fu C. Segment side-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Applied Opt*, 2012, 51(11): 1765-1770.