

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-08

基于 Sb_2O_3 可饱和吸收体的 $2.8\ \mu\text{m}$ 被动调Q激光器

张雅馨^{1,2}, 陈邱笛^{1,2}, 卢思亮^{1,2}, 陈言^{1,2}, 张沛雄^{1,2*}, 李真^{1,2},
陈振强^{1,2}

(1. 暨南大学物理与光电工程学院, 广州 510632;
2. 广东省晶体与激光技术工程研究中心, 广州 510632)

摘要: 本文提出了一种采用978 nm侧泵的基于氧化锑可饱和吸收体掺铒被动调Q激光器。采用垂直微间距升华法(chemical reaction assisted vertical micro sublimation method, CVMS)成功将 Sb_2O_3 转移到 Al_2O_3 衬底上, 并对其进行了形貌、结构等性能表征。采用978 nm侧泵实现了基于 Sb_2O_3 -SA掺铒晶体材料的被动调Q, 最大单脉冲能量和最大峰值功率分别为6.84 μJ 和1.12 W。随着泵浦功率的增加, 脉冲宽度从19.64 μs 减小到6.09 μs , 重复频率从19.10 kHz增大到62.13 kHz。输出激光的中心波长位于2793 nm, 且波长在2793 nm处对应的FWHM为9.10 nm。实验结果表明, 基于氧化锑可饱和吸收体的掺铒晶体材料被动调Q激光器为利用新型可饱和吸收体实现更低成本、稳定性更强且谐振腔设计简单的 $\sim 3\ \mu\text{m}$ 中红外激光器提供了新依据。

关键词: Er^{3+} ; $\sim 3\ \mu\text{m}$ 激光; 被动调Q; 氧化锑可饱和吸收体

中图分类号: O482.31 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240286 CSTR: 32170.14.CJL.20240286

Passively Q-switched $2.8\ \mu\text{m}$ laser based on Sb_2O_3 saturable absorber

ZHANG Yaxin^{1,2}, CHEN Qiudi^{1,2}, LU Siliang^{1,2}, CHEN Yan^{1,2}, ZHANG Peixiong^{1,2*}, LI Zhen^{1,2},
CHEN Zhenqiang^{1,2}

(1. College of Physics & Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China;
2. Guangdong Provincial Engineering Research Center of Crystal and Laser Technology, Guangzhou, Guangdong 510632, China)

* Corresponding Author, E-mail: pxzhang@jnu.edu.cn

Abstract: In this paper, a passive Q-switched laser based on Sb_2O_3 saturable absorber Er^{3+} -doped laser using a 978 nm pump was proposed. The Sb_2O_3 was successfully transferred onto an Al_2O_3 substrate by the chemical reaction assisted vertical micro sublimation method (CVMS), and its properties, such as morphology and structure were characterized. The Er^{3+} -doped passive Q-switched laser based on Sb_2O_3 -SA was achieved by using a 978 nm pump, with the maximum single-pulse energy and the maximum peak power of 6.84 μJ and 1.12 W, respectively. With the increase of the pump power, the pulse width decreased from 19.64 μs to 6.09 μs , and the repetition frequency increased from 19.10 kHz to 62.13 kHz. The center of the output laser wavelength is located at 2793 nm and the FWHM corresponding to the wavelength at 2793 nm is 9.10 nm. The experimental results showed that Er^{3+} -doped passive Q-switched lasers based on Sb_2O_3 saturable absorber provide a new reference to realize lower-cost, more stable $\sim 3\ \mu\text{m}$ mid-infrared lasers with simpler resonant cavity using a novel saturable absorber.

Key words: Er^{3+} ; $\sim 3\ \mu\text{m}$ laser; Passively Q-switched; Sb_2O_3 saturable absorber

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(61935010, 62175091, 51972149, 51872307, 51702124, 51702124); 广东省重点领域研究发展计划(2020B0090922006); 广州市科技计划(2024A03J0240).

Supported by National Natural Science Foundation of China (61935010, 62175091, 51972149, 51872307, 51702124, 51702124); Key Technologies R&D Program of Guangdong Province (2020B0090922006); Funding by Science and Technology Projects in Guangzhou (2024A03J0240).

1 引 言

~3 μm 中红外激光器因其在遥感、医疗、气体监测、精密光谱测量、材料加工与红外对抗^[1-2]等领域的潜在应用前景,近年来引起了人们的广泛关注。~3 μm 中红外(MIR)固态激光技术中光纤激光器^[3-5]、半导体激光二极管(LD)^[6]、量子级联激光器(QCL)^[7]等几类激光器设计较为复杂、转换效率较低、制作成本较高的劣势明显阻碍了其中红外激光技术方面的进一步发展。与上述这些激光器相比,稀土离子掺杂的晶体激光器效率高、制备工艺成熟,更适合实现大能量、高峰值功率的超短脉冲激光^[8]。已知的 Er^{3+} ($^4\text{I}_{1/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$)、 Ho^{3+} ($^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$) 和 Dy^{3+} ($^6\text{H}_{13/2} \rightarrow ^2\text{H}_{15/2}$) 等都可以实现 2.7-3 μm 波长附近的直接激光发射^[9]。目前,关于 Ho^{3+} 和 Dy^{3+} 掺杂材料的激光器研究远不及 Er^{3+} , 这主要是因为 Ho^{3+} 和 Dy^{3+} 掺杂晶体材料的泵浦波长并不是商用 LD 的发射波长。同时, Ho^{3+} 存在的自终止效应和缺乏 Dy^{3+} 掺杂的高质量晶体也在一定程度上阻碍了 Ho^{3+} 、 Dy^{3+} 掺杂激光器的研究。掺铒材料作为一种获得近 3 μm 中红外激光器的重要方法受到了广泛的关注。迄今为止, Er^{3+} 掺杂的不同晶体材料, 氧化物(如 YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)、GGG ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$)、GSGG ($\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$)、YSGG ($\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$)、YAP (YAlO_3)^[10-14]等)和氟化物(如 PbF_2 、 CaF_2 、 SrF_2 、 LiYF_4 、 LiLuF_4 ^[15-17]等), 以及型如 A_2B_3 的三氧化物(如 Sc_2O_3 、 Lu_2O_3 、 Y_2O_3 ^[18-20]等)已经成为用以获得~3 μm 中红外(MIR)固体激光器时使用最广泛的增益材料。

迄今为止,随着晶体生长方式以及中红外激光技术的革新,掺铒激光晶体在连续和脉冲模式下的高效运转已经得到了验证。1992年, B. J. Dinerman 等人首次报道了基于单片 Er:YAG、Er:GGG 和 Er:YSGG 激光器在波长 3 μm 附近的连续运转,实现了阈值低至 5 mW, 功率输出高达 90 mW 的激光输出^[21]。T. Sanamyan 报道了二极管泵浦 $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷激光器,其连续输出功率为 14 W, 波长为 2.7 μm , 斜率效率约为 26%^[22]。B. J. Shen 等人采用 970 nm 激光二极管双侧面泵浦 Er:YSGG, 在 2.79 μm 处获得了最大连续波输出 1.84 W, 该输出功率是目前报道的 2.79 μm 连续波输出的激光二极管泵浦 Er:YSGG 激光器的最高输出功率^[13]。为获得 2.7-3 μm 的脉冲掺铒激光输出,越来越多的报道致力于主动和被动 Q 开关技

术。基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)和 Fe:ZnSe 等传统可饱和吸收体的被动调 Q 技术已逐步应用到掺铒晶体激光谐振腔中,以产生 2.7-3 μm 的纳秒脉冲激光。2006年, AA Voronov 等人利用 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 单晶对 2.9364 μm Er:YAG 激光器进行被动调 Q 获得了 6 mJ、50 ns 巨脉冲激光^[23]。2018年, Z. P. Qin 等人实现了基于 SESAM 的 Er:Y₂O₃ 陶瓷激光器被动调 Q, 在 2709.3 nm 处产生了 223 mW 的最大平均输出功率, 脉冲能量为 1.7 μJ , 脉冲宽度为 350 ns 的激光输出^[24]。然而,目前有关掺铒晶体激光器的主被动调 Q 技术存在调制器件制备复杂、成本较高、谐振腔设计复杂等诸多问题,严重影响其在实际生产中的应用。所以,仍需进一步探寻谐振腔设计简单的掺铒晶体激光器或寻找一种成本较低、制备简单的调制器件。

相较于传统的调 Q 技术,新型二维可饱和吸收体由于吸收效率高、响应波长宽、尺寸小、成本低等优点,而被广泛应用于 3 μm 中红外激光器的调 Q 技术中。黑磷(BP)、石墨烯、过渡金属硫化物、金纳米棒等都是实现中红外波段被动调 Q 激光器的优秀新型可饱和吸收体材料^[25-28]。2016年, J. J. Liu 等人以黑磷为可饱和吸收体(BP-SA),实现了工作波长为 2.79 μm , 最大平均输出功率为 180 mW, 脉冲持续时间为 702 ns, 重复频率为 77.03 kHz 的二极管端泵浦被动调 Q 双波长激光器^[29]。X. F. Guan 等人在 2018年首次演示了以化学气相沉积(CVD)石墨烯作为可饱和吸收体的激光器。使用单层 CVD 石墨烯,实现的最短脉冲宽度约为 408 ns, 而使用三层 CVD 石墨烯,最短脉冲宽度减小到约 296 ns, 脉冲能量为 2.59 μJ , 峰值功率为 8.77 W^[30]。2024年, Y. Chen 等人采用氙灯侧泵方式,利用石墨烯可饱和吸收体进行被动调 Q, 获得了单脉冲能量为 7 mJ, 输出激光单脉冲宽度为 510 ns, 最大峰值功率为 13.7 kW 的 2.94 μm 波段 Er:YAG 激光器^[31]。作为过渡金属二硫化物(TMDs)的典型材料, TiSe_2 也被应用于中红外被动调 Q 激光器, B. Z. Yan 报道了在 2.8 μm 波长下,最短脉冲宽度为 160 ns, 最高重复频率为 78 kHz 的基于 1T- TiSe_2 材料全固态激光器^[32]。2023年, C. J. Shi 等人以金纳米棒为可饱和吸收体,成功实现了 LD 泵浦 2.9 μm Er:YAP 激光器的被动 Q 开关运转,在 2919 nm 处获得了最大平均输出功率为 415 mW, 最小脉冲宽度和脉冲

重复频率分别为 313.2 ns 和 196.8 kHz^[33]。基于黑磷、石墨烯等可饱和吸收体的研究已经在 2.7-3 μm 波段获得了高脉冲能量、窄脉冲宽度的激光输出,但其制备工艺复杂且在空气中不稳定,仍需寻找一种更易制备、更低成本且更稳定的新型二维可饱和吸收体材料。近年来,过渡金属氧化物由于制备工艺简单、制作成本较低且在空气中较为稳定的优势而受到越来越多的关注。H. Hong 等人首次采用垂直微间距升华法成功制备了二维 In_2O_3 材料,并将其作为可饱和吸收体在发射波长为 1080.2 nm 的 Nd/Gd:YAlO₃ 固体激光器上实现被动调 Q,最短脉冲宽度为 598 ns^[34]。而后, Q. D Chen 等人同样采用垂直微间距升华法制备 Bi_2O_3 并在新型 Nd:GYAP 无序晶体上实现了被动调 Q 运转,用短腔激光器实现了最大输出功率为 0.203 W,脉宽为 357.72 ns 的激光输出^[35]。基于 CVMS 法制备的新型二维可饱和吸收体已经在 ~1 μm 波段实现了更短脉宽、更高重频和平均功率的脉冲激光,但其在 2.7-3 μm 波段中红外激光器被动调 Q 技术方面的研究仍然十分有限。因此,采用 CVMS 法制备的新型二维氧化物可饱和吸收体在中红外波段掺铒晶体激光器研究中有巨大的探索空间。

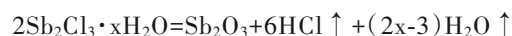
本工作采用垂直微间距升华法 (chemical reaction assisted vertical micro sublimation method, CVMS) 将 Sb_2O_3 转移到 Al_2O_3 衬底上,并对氧化铟可饱和吸收体的形貌和结构进行表征。采用 978 nm 侧泵实现了基于 Sb_2O_3 可饱和吸收体被动调 Q 掺铒激光器,最大单脉冲能量和最大峰值功率分别为 6.84 μJ 和 1.12 W。输出激光的中心波长位于 2793 nm,且波长在 2793 nm 处对应的半峰全宽 (FWHM) 为 9.10 nm。

2 实验

2.1 Sb_2O_3 可饱和吸收体的制备方法

在室温下向商用 SbCl_3 (99%, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司) 粉末中缓慢滴入适量去离子水并研磨。为了适当降低反应的速率,使其能够均匀沉积在衬底上,还需加入 InCl_3 作为反应的钝化剂,研磨时加入 SbCl_3 和 InCl_3 原料的比例为 20:1。研磨时 SbCl_3 粉末会充分潮解并得到的亲水性 $\text{Sb}_2\text{Cl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, 将 $\text{Sb}_2\text{Cl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 前驱体置于玻片上,使用 Al_2O_3 晶片作为衬底,衬底与玻片的距离大约为 5 cm。当加热台温度升高到 320 $^\circ\text{C}$ 时,

将装置置于加热台中心并继续加热至 400 $^\circ\text{C}$,保持 400 $^\circ\text{C}$ 恒温 1 小时。随后关闭加热台直至装置冷却至室温,将制备得到的 Sb_2O_3 -SA 取出。使用 CVMS 制备 Sb_2O_3 -SA 化学反应的方程式如下:



在反应中作为钝化剂的 InCl_3 需要在约 800 $^\circ\text{C}$ 条件下才能生成稳定存在的 In_2O_3 , 因此在实际反应过程中不会有 In_2O_3 杂质的引入。在实际反应过程中 $\text{Sb}_2\text{Cl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 潮解会生成中间产物 SbOCl , 在持续高温加热条件下进一步反应生成最终产物 Sb_2O_3 。反应所得 HCl 与 H_2O 均在加热过程中挥发。

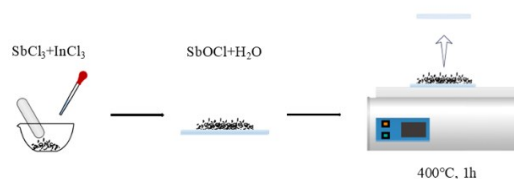


图 1 氧化铟可饱和吸收体的制备过程

Fig. 1 Preparation process of the Sb_2O_3 saturable absorber.

2.2 性能测试及表征

使用 UV/VIS/NIR 分光光度计 (Shimadzu, UV-3150) 测定 Sb_2O_3 可饱和吸收体和空白 Al_2O_3 衬底在 2000-3000 nm 波长范围内的线性透射率。使用拉曼光谱仪 (Horiba, HR Evolution) 的拉曼光谱仪获取 Sb_2O_3 可饱和吸收体的拉曼光谱以分析其化学结构。使用 X 射线光电子能谱仪 (Thermo Frisher, Nexsa) 获得样品的 XPS 光谱进行元素组成分析。此外,通过场发射扫描电子显微镜 (SEM) 表征了 Sb_2O_3 可饱和吸收体的表面形貌。使用光谱分析仪 (Zolix, Omni- λ 750 i) 测量输出激光在 2700-3000 nm 范围内的激光光谱。最后,使用连接在安捷伦数字示波器 (DSO90604A, 6GHz) 上的 InGaAs 光电探测器 (Thorlabs, PDA07P2) 对输出激光进行探测。

2.3 激光实验装置

基于 Sb_2O_3 可饱和吸收体的 Er:YGG 晶体被动调 Q 激光实验示意图如图所示。工作物质是长度为 66 mm、直径为 3 mm 的晶体棒。同时,晶体棒的两个端面经过抛光处理并涂有在 2.8 μm 附近的高透过率膜,以降低谐振腔的损耗。为了实现晶体棒的散热并减小因泵浦功率增大而产生的热透镜效应,将 Er^{3+} 掺杂浓度为 30 at. % 的晶体棒和

978 nm LD 紧密耦合在陶瓷腔中,采用循环去离子水装置对模块进行降温并将模块温度控制在 18°C。谐振腔由掺铒激光晶体棒、两个平面镜 M1 和 M2 组成,谐振腔腔长为 130 mm。为防止光从输入镜逸出而无法在激光腔内来回振荡,采用在 2.8 μm 附近的反射率超过 99% 的平面镜 M1 作为输入镜。平面镜 M2 作为输出镜在 2.8 μm 附近处有部分透射,其透射率为 10%。未插入 Sb_2O_3 可饱和吸收体的激光器处于连续模式。采用 Sb_2O_3 -SA 进行被动调 Q 实验时,将其置于晶体和输出镜 M2 之间。

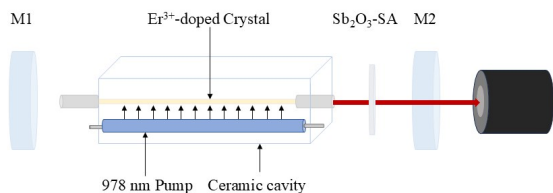


图 2 基于氧化锑可饱和吸收体的被动调 Q 激光实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of passively Q-switched laser experimental setup based on Sb_2O_3 saturable absorber

3 结果与讨论

3.1 Sb_2O_3 可饱和吸收体的表征结果

图 3(a)是在低倍扫描电子显微镜(SEM)下观察到的 Sb_2O_3 -SA 样品图像,可以观察到 Sb_2O_3 二维分子均匀分布在 Al_2O_3 衬底上。为了进一步了解 Sb_2O_3 -SA 样品的组分和形态,使用 X 射线光电子能谱仪(XPS)对样品进行测试,图 3(b)是制备得到 Sb_2O_3 可饱和吸收体的光电子能谱图。反应钝化剂 InCl_3 中的铟元素和氯元素有少量存在,与 XPS 全谱中结合能位于 455.32 eV 的 In_{3d} 轨道和 199.12 eV Cl_{2p} 轨道相对应。530.9 eV 处的峰值为 Sb_{3d} 轨道和 O_{1s} 轨道。如图 3(c)所示,XPS 精细图谱中 530.48 eV 对应于 $\text{Sb}_{3d5/2}$ 及 O_{1s} 轨道,而位于 540.17 eV 处的峰则与 $\text{Sb}_{3d3/2}$ 轨道相对应,因此可以确定检测样品中的锑元素以 Sb_2O_3 的形式存在。 Sb_2O_3 -SA 的成功制备通过 XPS 图谱得到了进一步验证。如图 3(d)所示为 Sb_2O_3 -SA 在 2700-3000 nm 波段内的线性透射光谱。空白 Al_2O_3 衬底在波长为 2793 nm 处的透射率 84.63%, Sb_2O_3 -SA 在波长为 2793 nm 处的透射率为 81.32%,则二维 Sb_2O_3 分子晶体在波长为 2793 nm 处的线性吸收率为 3.31%。测试结果也表明 Sb_2O_3 -SA 在

波长为 2793 nm 附近有线性光学响应。另外,为进一步分析样品的分子结构,采用功率为 12.1 μJ ,光束直径为 4 μm ,激发波长位于 532 nm 的拉曼光谱仪测量了制备的含 Sb_2O_3 的 Al_2O_3 衬底以及商用 Sb_2O_3 粉末的拉曼光谱。商用 Sb_2O_3 粉末和 Sb_2O_3 -SA 的拉曼光谱如图 3(e)所示。在图 3(e)上图所示的商用 Sb_2O_3 粉末的拉曼光谱中,可以观察到 ${}^4\text{F}_{2g}$ 、 ${}^1\text{Ag}$ 、 ${}^2\text{F}_{2g}$ 和 ${}^2\text{Ag}$ 模式,分别对应于位于 192、257、376 和 454 cm^{-1} 的拉曼光谱峰。图 3(e)下图图中可以观察到位于 195.4 cm^{-1} 的 ${}^2\text{F}_{2g}$ 模式和位于 273、311 cm^{-1} 的 ${}^1\text{Ag}$ 等包含较高波数区域拉曼峰振动模式。419 cm^{-1} 处的振动模式受到 Al_2O_3 衬底的影响,位于 456 cm^{-1} 出的模式受 Al_2O_3 衬底和 Sb_2O_3 分子的共同影响。由于多层氧化锑分子能带结构由于层间相互作用而发生变化,制备过程中 Al_2O_3 衬底应力对 Sb_2O_3 结构产生影响以及双共振散射过程,使得 ${}^1\text{Ag}$ 拉伸模式发生分裂形成了两个拉曼峰。同时, Sb_2O_3 -SA 样品拉曼光谱中的 ${}^2\text{F}_{2g}$ 和 ${}^1\text{Ag}$ 模式的强度差异明显低于商用 Sb_2O_3 粉末,这归因于二维 Sb_2O_3 分子晶体层数和厚度带来的影响。通过对比商用 Sb_2O_3 粉末和 Sb_2O_3 -SA 的拉曼光谱中拉曼峰的峰位,不难发现我们制备 Sb_2O_3 -SA 样品的两个特征拉曼峰与商用 Sb_2O_3 粉末能够相互对应,但仍发生了一定程度的红移,这是由于二维材料层数较少且尺寸较小导致的声子限制效应与表面弛豫现象,使得声子频率降低,从而引起拉曼峰的红移现象^[36]。含 Sb_2O_3 -SA 以及商用 Sb_2O_3 粉末的拉曼光谱进一步验证我们通过 CVMS 法制备得到了纯净的氧化锑可饱和吸收体。

3.2 被动调 Q 激光特性

如图 4(a)(b)所示是掺铒激光器在未插入可饱和吸收体连续运行模式下和 Sb_2O_3 作为可饱和吸收体插入后被动调 Q 模式下激光的输出功率随泵浦功率的变化,在最大泵浦功率下分别获得了 0.481 W 和 0.427 W 的最大输出功率,被动调 Q 模式下输出功率的降低可能是氧化锑可饱和吸收体的插入损耗所导致的。连续模式与被动调 Q 模式下的激光光谱如图 4(c)(d)所示,两种模式下分别在 2792 nm 和 2793.4 nm 处存在峰值。这表明在基于 Sb_2O_3 可饱和吸收体的被动调 Q 过程中, Sb_2O_3 -SA 对激光输出的光谱几乎没有影响。在调 Q 模式下的 FWHM 更窄为 9.10 nm,而在连续模

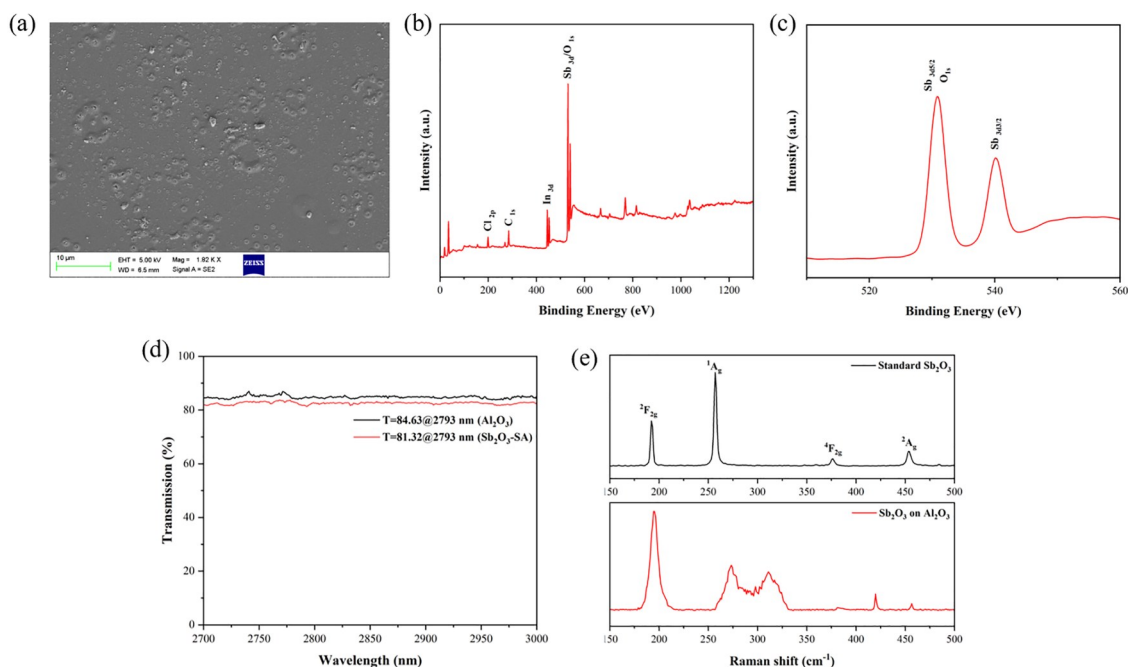


图 3 氧化锑可饱和吸收体的表征。(a)氧化锑可饱和吸收体的 SEM 图像;(b)氧化锑可饱和吸收体的 XPS 全谱;(c)氧化锑可饱和吸收体的 XPS 精细谱;(d)氧化锑可饱和吸收体和空白 Al_2O_3 衬底的透射光谱;(e)含氧化锑的 Al_2O_3 衬底和氧化锑粉末标准样品的拉曼光谱

Fig. 3 Characterization of graphene saturable absorbers. (a) SEM images of the Sb_2O_3 saturable absorber; (b) XPS fine spectra of the Sb_2O_3 saturable absorber; (c) XPS fine spectra of the Sb_2O_3 saturable absorber; (d) Transmission spectra of the Sb_2O_3 saturable absorber and blank Al_2O_3 substrate; (e) Raman spectra of Sb_2O_3 with Al_2O_3 substrates and Sb_2O_3 powder standard samples.

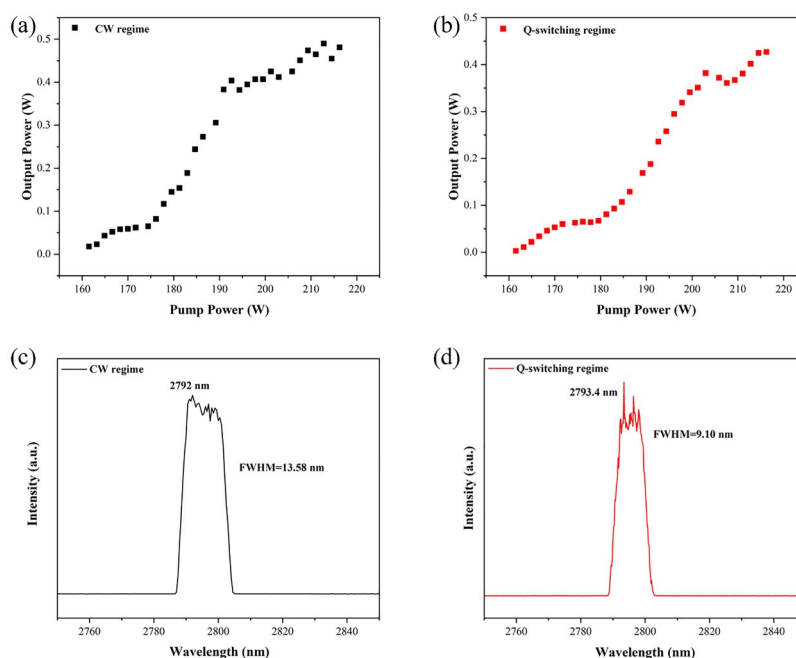


图 4 (a)连续运行输出功率随泵浦功率的变化;(b)基于 Sb_2O_3 -SA 被动调 Q 激光输出功率随泵浦功率的变化;(c)连续运行模式下的激光光谱;(d)基于 Sb_2O_3 -SA 的被动调 Q 激光光谱。

Fig. 4 (a) Variation of the free-running mode output power with pump power; (b) the variation of the passive Q-switched laser output power with the pump power based on Sb_2O_3 -SA; (c) laser emission spectrum in free-running mode; (d) laser emission spectra of passive Q-switched mode based on Sb_2O_3 -SA.

式下则为 13.58 nm。这种变化主要是由于插入 Sb_2O_3 -SA 引起的线性损耗增加,在一定程度上阻止了低增益激光模式的有效振荡。

脉冲宽度、重复频率、单脉冲能量和峰值功率随泵浦功率的变化如图 5 所示。脉冲宽度随着泵浦功率的增大而减小,重复频率则呈现增大的趋势。随着泵浦功率的增加,脉冲宽度从 19.64 μs 减小到 6.09 μs ,重复频率从 19.10 kHz 增大到 62.13 kHz。此外,根据输出功率、脉冲宽度和重复频率计算出单脉冲能量和峰值功率的大小,可以看出单脉冲能量和峰值功率随着泵浦电流的提升呈现出上升趋势。当泵浦功率大小达到 216.25 W 时,获得的最大单脉冲能量和最大峰值功率分别为 6.84 μJ 和 1.12 W。图 6 为基于 Sb_2O_3 -SA 的被动调 Q 激光器在最大泵浦功率下的时间脉冲序列和单脉冲轮廓。采用连接在安捷伦数字示波器上的 InGaAs 光电探测器对输出激光进行探测,在泵浦功率 216.25 W 获得的最短脉冲宽度为 6.09 μs 的单脉冲激光。

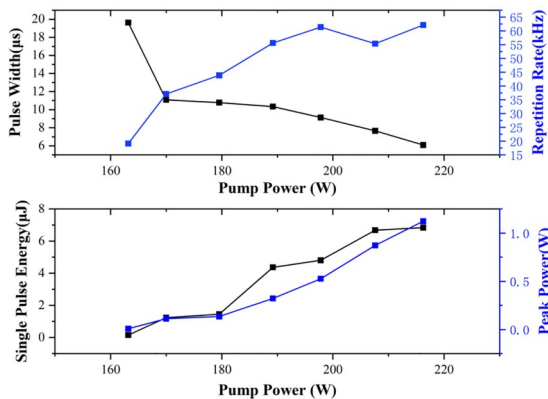


图 5 脉冲宽度、重复频率、单脉冲能量和峰值功率与泵浦功率关系。

Fig. 5 Dependence of pulse width, repetition rate, single pulse energy, and peak power on the pump power.

参 考 文 献:

- [1] TAFOYA J, PIERCE J W, JAIN R K, *et al.* Efficient and compact high-power mid-IR ($\sim 3 \mu\text{m}$) lasers for surgical applications [C]. *Biomedical optics 2004, San Jose, CA, United States*, 2004, 5312: 218-222.
- [2] LINDEN K J, PFEFFER C P, SOUSA J G, *et al.* 3- μm CW lasers for myringotomy and microsurgery [C]. *Proceedings of the Photonic Therapeutics and Diagnostics IX, F, 2013, San Francisco, California*, 2013, 8565: 347-358.
- [3] ZHU X, JAIN R. 10-W-level diode-pumped compact 2.78 μm ZBLAN fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 32(1): 26-8.
- [4] FORTIN V, BERNIER M, BAH S T, *et al.* 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(12): 2882-5.
- [5] WOODWARD R, MAJEWSKI M, BHARATHAN G, *et al.* Watt-level dysprosium fiber laser at 3.15 μm with 73% slope

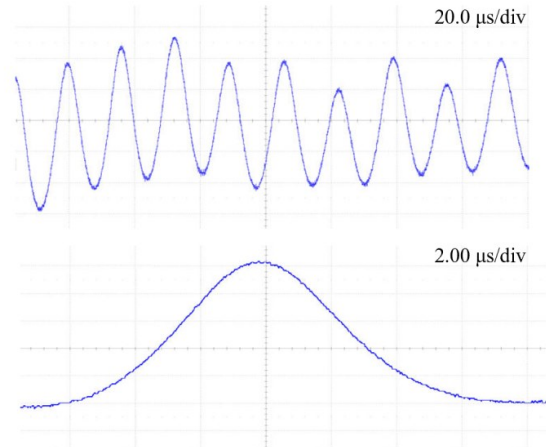


图 6 基于 Sb_2O_3 -SA 被动调 Q 掺铒激光器的时间脉冲序列和单脉冲波形。

Fig. 6 Temporal pulse train and single pulse profile based on Sb_2O_3 -SA passively Q-switched Er^{3+} -doped laser.

4 结 论

综上所述,本工作采用垂直微间距升华法成功制备了氧化铈可饱和吸收体,并且实现了 978 nm 侧泵的基于氧化铈可饱和吸收体被动调 Q 激光器。表征结果表明使用 CVMS 法制备的氧化铈可饱和吸收体是一种空气中稳定且成本较低的高质量二维调 Q 材料。当在谐振腔内插入氧化铈可饱和吸收体作为调制元件时,获得了最大单脉冲能量和最大峰值功率分别为 6.84 μJ 和 1.12 W 的激光输出。中心波长在 2793 nm 处的 FWHM 为 9.10 nm。实验结果表明,基于氧化铈可饱和吸收体的被动调 Q 掺铒晶体激光器是一种能实现更低成本、稳定性更强、谐振腔设计简单且紧凑的脉冲激光器。

- efficiency [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(7): 1471-4.
- [6] JOULLIÉ A, CHRISTOL P, BARANOV A N, *et al.* Mid-Infrared 2-5 μm Heterojunction Laser Diodes [J]. *Solid-State Mid-Infrared Laser Sources*, 2003: 1-61.
- [7] SIRTORI C, NAGLE J. Quantum Cascade Lasers: the quantum technology for semiconductor lasers in the mid-far-infrared [J]. *C R Phys*, 2003, 4(6): 639-48.
- [8] 廖家裕, 陈鸿玲, 牛晓晨, 等. 新型中红外激光晶体Er³⁺/Ho³⁺/Eu³⁺:PbF₂的生长和性能 [J]. *发光学报*, 2021, 42(12): 1852-62.
- Liao J Y, Chen H L, Niu X C, *et al.* Growth and Properties of Novel Mid-infrared Laser Crystal Er³⁺/Ho³⁺/Eu³⁺:PbF₂ [J]. *Chinese J. Lumin*, 2021, 42(12): 1852-62. (in Chinese)
- [9] NIE H, WANG F, LIU J, *et al.* Rare-earth ions-doped mid-infrared (2.7-3 μm) bulk lasers: a review [J]. *Chinese Opt. Lett.*, 2021, 19(9): 091407.
- [10] CHEN D-W, FINCHER C L, ROSE T S, *et al.* Diode-pumped 1-W continuous-wave Er: YAG 3-μm laser [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(6): 385-7.
- [11] DINERMAN B J, MOULTON P F. 3-μm cw laser operations in erbium-doped YSGG, GGG, and YAG [J]. *Opt. Lett.*, 1994, 19(15): 1143-5.
- [12] WU Z, SUN D, WANG S, *et al.* Performance of a 967 nm CW diode end-pumped Er: GSGG laser at 2.79 μm [J]. *Laser Phys*, 2013, 23(5): 055801.
- [13] SHEN B, KANG H, CHEN P, *et al.* Performance of continuous-wave laser-diode side-pumped Er: YSGG slab lasers at 2.79 μm [J]. *Appl. Phys. B*, 2015, 121: 511-5.
- [14] YAO W, UEHARA H, KAWASE H, *et al.* Highly efficient Er: YAP laser with 6.9 W of output power at 2920 nm [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(13): 19000-7.
- [15] LIU J, FENG X, FAN X, *et al.* Efficient continuous-wave and passive Q-switched mode-locked Er³⁺: CaF₂ - SrF₂ lasers in the mid-infrared region [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(10): 2418-21.
- [16] MA W, QIAN X, WANG J, *et al.* Highly efficient dual-wavelength mid-infrared CW Laser in diode end-pumped Er: SrF₂ single crystals [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6(1): 36635.
- [17] INOCHKIN M, KHLOPONIN L, KHRAMOV V, *et al.* High-efficiency diode-pumped Er: YLF laser with multi-wavelength generation [C]. *Proceedings of the Solid State Lasers XXI: Technology and Devices, F, 2012, San Francisco, California*, 2012, 8235: 13-24.
- [18] WANG L, HUANG H, SHEN D, *et al.* Room temperature continuous-wave laser performance of LD pumped Er: Lu₂O₃ and Er: Y₂O₃ ceramic at 2.7 μm [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(16): 19495-503.
- [19] FLEISCHMAN Z D, SANAMYAN T. Spectroscopic analysis of Er³⁺:Y₂O₃ relevant to 2.7 μm mid-IR laser [J]. *Opt. Mater. Express*, 2016, 6(10): 3109-18.
- [20] SANAMYAN T, SIMMONS J, DUBINSKII M. Er³⁺-doped Y₂O₃ ceramic laser at ~2.7 μm with direct diode pumping of the upper laser level [J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(3): 206.
- [21] DINERMAN B J, MOULTON P. CW laser operation from Er: YAG, Er: GGG and Er: YSGG [C]. *Proceedings of the Advanced Solid State Lasers, F, 1992, Boston, MA*, 1992: 310-311.
- [22] SANAMYAN T, DUBINSKII M. Er³⁺-Doped Diode-Pumped Ceramic Laser Delivers 14 W CW at 2.7-μm [C]. *Science and Innovations 2011, Baltimore, Maryland*.
- [23] VORONOV A A E, KOZLOVSKII V I, KOROSTELIN Y V, *et al.* Passive Fe²⁺: ZnSe single-crystal Q switch for 3-μm lasers [J]. *Quantum Electron*, 2006, 36(1): 1.
- [24] QIN Z, XIE G, ZHANG J, *et al.* Continuous-Wave and Passively Q-Switched Er: Y₂O₃ Ceramic Laser at 2.7 μm [J]. *Int J Opt*, 2018, 2018(1): 3153614.
- [25] NIE H, ZHANG P, ZHANG B, *et al.* Watt-level continuous-wave and black phosphorus passive Q-switching operation of Ho³⁺, Pr³⁺: LiLuF₄ bulk laser at 2.95 μm [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, 2017, 24(5): 1-5.
- [26] KAWASE H, UEHARA H, CHEN H, *et al.* Passively Q-switched 2.9 μm Er: YAP single crystal laser using graphene saturable absorber [J]. *Appl. Phys. Express*, 2019, 12(10): 102006.
- [27] 洪弘, 周貌, 陈鸿玲, 等. 基于锑烯纳米片的被动调Q激光器 [J]. *人工晶体学报*, 2022, 51(2).
- HONG H, ZHOU M, CHEN H L, *et al.* Passively Q-Switched Laser Based on Antimonene Nanosheets [J]. *J. Synth.*

- Cryst*, 2022, 51: 216-221. (in Chinese)
- [28] 刘永岩, 杨雪莹, 田颖, 等. 基于石墨烯/WS₂可饱和吸收体的中红外 Er³⁺:ZBLAN 锁模激光器及其波长可调谐性能 [J]. *发光学报*, 2024, 45(08): 1354-63.
LIU Y Y, YANG X Y, TIAN Y, *et al.* Mid Infrared Er³⁺:ZBLAN Mode-locked Laser and Wavelength Tunable Performance Based on Graphene/WS₂ Saturated Absorber [J]. *Chinese J. Lumin*, 2021, 42(12): 1852-62. (in Chinese)
- [29] LIU J, LIU J, GUO Z, *et al.* Dual-wavelength Q-switched Er: SrF₂ laser with a black phosphorus absorber in the mid-infrared region [J]. *Opt. Lett*, 2016, 24(26): 30289-95.
- [30] GUAN X, ZHAN L, ZHU Z, *et al.* Continuous-wave and chemical vapor deposition graphene-based passively Q-switched Er: Y₂O₃ ceramic lasers at 2.7 μm [J]. *Appl. Opt*, 2018, 57(3): 371-6.
- [31] 陈言, 张沛雄, 权聪, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的 Er:YAG 被动调 Q 激光器 [J]. *人工晶体学报*, 2024, 53(7).
CHEN Y, ZHANG P X, QUAN C, *et al.* Passively Q-switched Er: YAG laser based on graphene saturable absorber. [J]. *J Synth Cryst*, 2024, 53(7). (in Chinese)
- [32] YAN B, ZHANG B, NIE H, *et al.* Broadband 1T-titanium selenide-based saturable absorbers for solid-state bulk lasers [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(43): 20171-7.
- [33] SHI C, HUANG H, LI M, *et al.* Passively Q-switched 3 μm erbium-doped solid state lasers using gold nanorods as broadband saturable absorber [J]. *Opt Laser Technol*, 2023, 160: 109095.
- [34] Hong H, Chen Q, Wang Y, *et al.* An effective 2D saturable absorber In₂O₃ to realize passively Q-switched laser output [J]. *Opt Laser Technol*, 2022, 155: 108375.
- [35] CHEN Q, LU S, ZHANG Y, *et al.* The passive Q-switched and Q-switched mode-locked Nd: GYAP laser based on a novel Bi₂O₃ saturable absorber [J]. *Opt Laser Technol*, 2024, 174: 110620.
- [36] YANG C, LI S. Size-dependent Raman red shifts of semiconductor nanocrystals [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2008, 112(45): 14193-7.



张雅馨(2001—),女,湖北荆门人,硕士研究生,暨南大学物理与光电工程学院光电工程系电子信息在读,主要研究激光晶体材料与技术。

E-mail: zhangyaxin0106@163.com



张沛雄(1987—),男,广东潮州人,博士研究生,教授,2016年毕业于中国科学院上海光学精密机械研究所,主要从事光电功能晶体和晶体激光技术的研究。

E-mail: pxzhang@jnu.edu.cn