

基于拓扑绝缘体的 Yb:KGW 调 Q 激光器

刘京徽 田金荣 胡梦婷 窦志远 宋晏蓉

北京工业大学应用数理学院, 北京 100124

摘要 Yb:KGW 激光晶体可用半导体抽运获得瓦级输出,这是由于其本身具备宽的增益带宽(24 nm),大的激光发射截面($2.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$),以及良好的热导性能($3.3 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)。Yb:KGW 调 Q 激光器通过透射式新型可饱和吸收材料拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 实现,获得窄脉宽为 1.5 μs ,中心波长 1042 nm,对应脉冲能量为 4.7 μJ ,峰值功率为 3.13 W。

关键词 激光器;被动调 Q;拓扑绝缘体;半导体抽运;Yb:KGW

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0802004

Q-Switched Yb:KGW Laser Based on Topological Insulators

Liu Jinghui Tian Jinrong Hu Mengting Dou Zhiyuan Song Yanrong

College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Yb:KGW laser material is well suited to build diode-pumped pulse lasers in watt region because of its broad gain bandwidth of 24 nm, large emission cross section of $2.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ and good thermal conductivity of $3.3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. A passively Q-switched Yb:KGW laser is obtained using a transmission-type topological insulator Bi_2Se_3 as a saturable absorber. The achieved maximum pulse energy is 4.7 μJ and the peak power is 3.13 W for a pulse duration of 1.5 μs .

Key words lasers; passively Q-switch; topological insulator; laser diode-pumped; Yb:KGW

OCIS codes 140.3540; 160.4236; 140.3480; 140.3615

1 引 言

脉冲激光器在实际应用中使用广泛,如科学研究,材料加工和生物医学等方面。在调 Q 技术中,基于可饱和吸收体的调 Q 是一种应用简便、没有电干扰、造价低、易于调节和实现激光器小型化的被动 Q 开关。在过去的研究工作中,大量的可饱和吸收体调 Q 脉冲激光器的研究工作主要围绕半导体可饱和吸收镜 (SESAM)^[1-3]、碳类可饱和吸收体(石墨烯^[4-6],碳纳米管^[7,8],氧化石墨烯^[9])等进行。近年来,拓扑绝缘体作为新型可饱和吸收体,以低饱和强度^[10],宽波段近红外吸收光谱的特点逐渐在可饱和吸收材料中脱颖而出。

拓扑绝缘体是最近几年发现的一种全新的物质形态,具有独特的能带结构^[11],这类材料体内的能带结构是典型的绝缘体类型,在费米能处存在着能隙,然而在该类材料的表面则总是存在着穿越能隙的狄拉克型的电子态,因而导致其表面总是金属性的。拓扑绝缘体不仅避免了 SESAM 受限于窄波长范围内的操作^[10],而且相比于碳纳米管,具有低的饱和强度和高的三阶非线性系数^[12]。目前,已有很多应用拓扑绝缘体产生锁模和调 Q 脉冲的实验^[13-19]报道。

本文报道使用透射式拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 作为可饱和吸收体,对半导体激光(LD)端面抽运 Yb:KGW 固体激光器进行被动调 Q 实验,得到了窄脉宽、高重复频率、高峰值功率的脉冲输出。

2 拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 薄膜的制备及实验装置

使用多醇法制备 Bi_2Se_3 拓扑绝缘体溶液。首先将 0.6 g 硝酸铋,0.3 g 亚硒酸钠,1.32 g 聚乙烯吡咯烷酮和

收稿日期: 2015-01-20; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61177047)、北京市自然科学基金(1102005)、北京工业大学基础研究基金(X3006111201501)

作者简介: 刘京徽(1991—),女,硕士研究生,主要从事固体锁模激光器方面的研究。E-mail: liujinghui@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 田金荣(1975—),男,博士,副教授,主要从事飞秒激光技术方面的研究。E-mail: jrtian@bjut.edu.cn(通信联系人)

60 mL的乙二醇加入到含有 250 mL 聚四氟乙烯的双颈烧瓶中。该烧瓶配有回流冷凝器和磁力搅拌装置,并放置在一个加热系统中。将溶液的温度在恒定搅拌下升高到 190 °C,反应时间为 180 min。待产物冷却后,用异丙醇(IPA)进行离心分离。取上层液体并进行稀释。用移液器取适量已稀释的拓扑绝缘体溶液滴至滤纸上进行过滤操作。将涂有拓扑绝缘体薄膜的滤纸放在干燥箱中干燥。随后将拓扑绝缘体滤纸膜用去离子水吸附在载玻片上,载玻片厚度为 0.13~0.17 mm。经干燥后用丙醇取出滤纸,最后获得透射式拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 薄膜。图 1 为在 180 min 反应后, Bi_2Se_3 拓扑绝缘体薄膜的扫描电子显微镜(SEM)图。

实验装置如图 2 所示,抽运源为 LD 激光器,输出波长为 980 nm,经芯径 105 μm ,数值孔径 0.22 的多模光纤耦合输出。再经过双透镜耦合系统准直聚焦在抽运晶体 Yb:KGW 上。其中,晶体 Yb:KGW 的尺寸为 3 mm×3 mm×3 mm,通光方向上镀有对 970~1050 nm 波段增透膜, Yb³⁺ 的掺杂原子数分数为 5%,晶体水冷温度控制在 14 °C。输入平面镜 M1 是镀有 980 nm 增透膜和 1030 nm 高反膜的双色镜;折叠镜 M2 的曲率半径为 50 mm,镀有 1030 nm 高反膜并带有输出,其输出透射率为 3%;平面镜 M3 为 1030 nm 高反镜。采用透射方式,将镀有拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 薄膜(TISA)的玻璃基片垂直插入光路中并放置在 M3 高反镜前。且该镀有拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 薄膜的玻璃基片可在 15 mm 范围内移动。经测试,实验所制备的拓扑绝缘体调制深度为 5%。

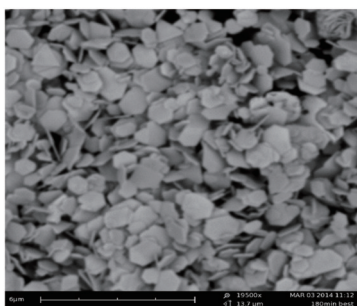


图 1 180 min 反应时间下, Bi_2Se_3 拓扑绝缘体薄膜的 SEM 图
Fig.1 SEM image of Bi_2Se_3 topological insulator film at reaction time of 180 min

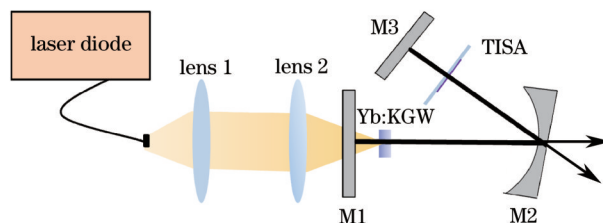


图 2 Yb:KGW 激光器 V 型腔结构
Fig.2 Structure of V-cavity Yb:KGW laser

3 实验结果与讨论

通过优化调节激光器及拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 的位置。实验中测得,调 Q 脉冲激光抽运阈值为 3.9 W。在抽运功率为 13.5 W 时,最高输出功率为 820 mW,同时获得最窄调 Q 脉冲宽度 1.5 μs 。输出功率随抽运功率线性增加,斜效率约为 9%,如图 3 所示。其中,斜效率较低主要是因为拓扑绝缘体薄膜本身的损耗以及玻璃基片的插入损耗引起的。

将部分输出激光注入光电探测器中,从示波器中发现,随着抽运功率从 6 W 增大到 13.5 W,调 Q 脉冲的脉宽由 5 μs 减小到 1.5 μs ,重复频率由 73 kHz 上升到 174 kHz,如图 4 所示。脉冲宽度及重复频率随抽运功率的变化完全符合调 Q 激光脉冲的特征。图 5 为用示波器探测的调 Q 脉冲信号。其中,图 5(a)为在功率 13.5 W

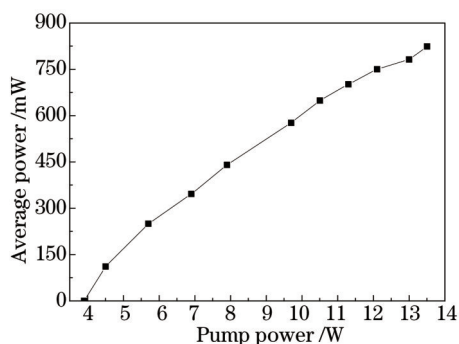


图 3 调 Q 激光输出功率随抽运功率的变化
Fig.3 Output power versus pump power for Q-switching operation

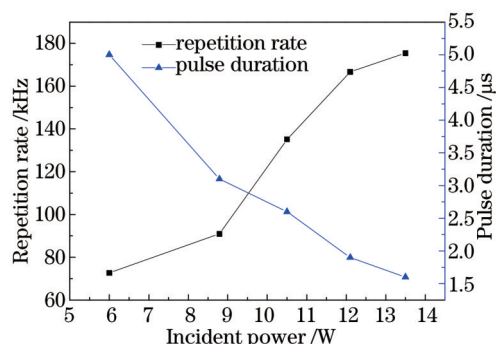


图 4 调 Q 脉冲重复频率及脉冲宽度随抽运功率的变化
Fig.4 Pulse widths and repetition rates as a function of pump power for Q-switching

抽运时,获得最短脉冲宽度 $1.5 \mu\text{s}$;图 5(b)为调 Q 激光脉冲的长程序列,其扫描时间为 2 ms ,波动幅度小于 3.3% ,表明所获得的调 Q 激光脉冲很稳定。

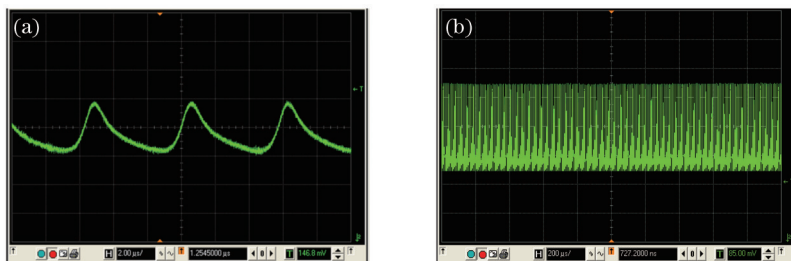


图 5 (a) 13.5 W 抽运功率下, $1.5 \mu\text{s}$ 调 Q 脉冲序列; (b) 调 Q 激光脉冲长程序列

Fig.5 (a) $1.5 \mu\text{s}$ Q -switched pulse trains with pump power of 13.5 W ; (b) long-range pulse trains of Q -switched pulses

4 结 论

通过搭建 V 型腔结构 Yb:KGW 激光器,将镀有拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 薄膜的玻璃基片垂直插入光路中,获得了调 Q 脉冲输出。在不同抽运功率下,其脉冲宽度可从 $5 \mu\text{s}$ 调谐到 $1.5 \mu\text{s}$,对应重复频率从 73 kHz 调谐至 174 kHz 。其中,获得的最窄脉冲宽度为 $1.5 \mu\text{s}$,对应脉冲能量、重复频率和峰值功率分别为 $4.7 \mu\text{J}$ 、 174 kHz 、 3.13 W 。尽管基于拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 薄膜的调 Q 激光器,输出功率比 SESAM 或者其他可饱和吸收体 Q 开关低一个数量级,但拓扑绝缘体以其低成本、易制备、良好的光学性质、宽波段近红外吸收光谱以及低的饱和强度等优点,使其成为固体激光器中非常有前途的调制器。

参 考 文 献

- 1 U Keller, K J Weingarten, F X Kärtner, *et al.*. Semiconductorsaturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1996, 2(3): 435-453.
- 2 Y X Fan, J L He, Y G Wang, *et al.*. 2 ps passively mode-locked Nd:YVO₄ laser using an output-coupling-type semiconductor saturable absorber mirror[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(10): 101103.
- 3 Ban Wenzheng, Wang Li, Fan Feng, *et al.*. Research on mode locking characteristics of all-solid-state mode-locked laser with semiconductor saturable absorber mirror[J]. ActaOpticaSinica, 2010, 30(4): 1046-1050.
班文正, 王 丽, 范 峰, 等. 全固态 SESAM 锁模激光器的锁模特性研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1046-1050.
- 4 Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, *et al.*. Graphene photonics and optoelectronics[J]. Nat Photonics, 2010, 4(9): 611-622.
- 5 Y Cui, X Liu. Graphene and nanotube mode-locked fiber laser emitting dissipative and conventional solitons[J]. Opt Express, 2013, 21(16): 18969-18974.
- 6 He Jingliang, Hao Xiaopeng, Xu Jinlong, *et al.*. Ultrafast mode-locked solid state lasers with graphenesaturable absorber[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900138.
何京良, 郝霄鹏, 徐金龙, 等. 基于石墨烯可饱和吸收被动锁模超快全固体激光器的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900138.
- 7 Popa D, Sun Z, Hasan T, *et al.*. 74-fs nanotube mode-locked fiber laser[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(15): 153107.
- 8 Yu Zhenhua, Wang Yonggang, Dong Xinzheng, *et al.*. 66 fs carbon nanotubes mode-locked fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0802005.
于振华, 王勇刚, 董信征, 等. 66 fs 碳纳米管锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0802005.
- 9 J M Yang, Q Yang, J Liu, *et al.*. Reflective graphene oxide absorber for passively mode-locked laser operating at nearly $1 \mu\text{m}$ [J]. Chinese Phys B, 2013, 22(9): 94210.
- 10 Z H Yu, Y R Song, J R Tian, *et al.*. High-repetition-rate Q -switched fiber laser with high quality topological insulator Bi_2Se_3 film[J]. Opt Express, 2014, 22(10): 11508-11515.
- 11 Lü Yanfeng, Chen Xi, Xue Qikun. Introduction topological insulators[J]. Physics and Engineering, 2012, 22(1): 7-18.
吕衍凤, 陈 曦, 薛其坤. 拓扑绝缘体简介[J]. 物理与工程, 2012, 22(1): 7-18.
- 12 Z Y Dou, Y R Song, J R Tian, *et al.*. Mode-locked ytterbium-doped fiber laser based on topological insulator: Bi_2Se_3 [J]. Opt Express, 2014, 22(20): 24055-24061.
- 13 C J Zhao, H Zhang, X Qi, *et al.*. Ultra-short pulse generation by a topological insulator based saturable absorber[J]. Appl Phys Lett,

- 2012, 101(21): 211106.
- 14 C J Zhao, Y Zou, Y Chen, *et al.*. Wavelength-tunable picosecond soliton fiber laser with topological insulator: Bi₂Se₃ as a mode locker[J]. Opt Express, 2012, 20(25): 27888–27895.
- 15 F Bernard, H Zhang, S P Gorza, *et al.*. Towards mode-locked fiber laser using topological insulators[C]. Advanced Photonics Congress Nonlinear Photonics, 2012: NTh1A.5.
- 16 P Tang, X Zhang, C J Zhao, *et al.*. Topological insulator: Bi₂Te₃ saturable absorber for the passive Q-switching operation of an in-band pumped 1645-nm Er:YAG ceramic laser[J]. IEEE Photonics J, 2013, 5(2): 1500707.
- 17 Z Q Luo, Y Z Huang, J Weng, *et al.*. 1.06 μm Q-switched ytterbium-doped fiber laser using few-layer topological insulator Bi₂Se₃ as a saturable absorber[J]. Opt Express, 2013, 21(24): 29516–29522.
- 18 H Liu, X W Zheng, M Liu, *et al.*. Femtosecond pulse generation from a topological insulator mode-locked fiber laser[J]. Opt Express, 2014, 22(6): 6868–6873.
- 19 J Lee, J Koo, Y M Jhon, *et al.*. A femtosecond pulse erbium fiber laser incorporating a saturable absorber based on bulk-structured Bi₂Te₃ topological insulator[J]. Opt Express, 2014, 22(5): 6165–6173.

栏目编辑：宋梅梅