

不同浓度Ti:Bi₂Te₃的调Q光纤激光器

潘伟 陈华龙 王铁斌 张宏伟 金亮 张贺 徐英添 邹永刚 石琳琳 马晓辉

Q-switched fiber laser with Ti: Bi₂Te₃ of different concentrations

Pan Wei, Chen Hualong, Wan Tiebin, Zhang Hongwei, Jin Liang, Zhang He, Xu Yingtian, Zou Yonggang, Shi Linlin, Ma Xiaohui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20190542>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

调Q和调Q锁模脉冲共存双波长光纤激光器

Coexistence of Q-switched and Q-switched mode-locking pulse dual-wavelength fiber laser

红外与激光工程. 2019, 48(8): 805009–0805009(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0805009>

LD泵浦的kHz,Er³⁺,Yb³⁺:glass被动调Q微片激光器

LD pumped kHz Er³⁺, Yb³⁺: glass passively Q-switched microchip lasers

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1005002–1005002(5) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1005002>

基于金纳米笼和MoS₂的1 123 nm被动调Q Nd: YAG激光器

1 123 nm Q-switched Nd: YAG laser based on gold nanocages and MoS₂ saturable absorbers

红外与激光工程. 2020, (): <https://doi.org/10.3788/IRLA20200084>

正交增益型被动调Q激光器的设计与实现

Design and implementation of orthogonal gain type passively Q-switched laser

红外与激光工程. 2018, 47(6): 606003–0606003(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0606003>

光纤饱和吸收体掺镱全光纤化激光器

Yb-doped all-fiber laser based on fiber saturable absorber

红外与激光工程. 2020, (): <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.20190382>

不同浓度 Ti:Bi₂Te₃ 的调 Q 光纤激光器

潘 伟, 陈华龙, 王铁斌, 张宏伟, 金 亮, 张 贺, 徐英添, 邹永刚, 石琳琳, 马晓辉*

(长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘 要: 基于二维材料的非线性光开关是调 Q 光纤激光器的核心器件, 二维材料光开关的浓度会直接影响其非线性光学吸收特性, 从而改变脉冲的时域特性。因此, 针对二维材料浓度对调 Q 光脉冲的影响进行了研究, 并通过实验制作了基于不同浓度 Ti: Bi₂Te₃ 可饱和吸收光开关, 分析了 Ti: Bi₂Te₃ 浓度对非线性光学吸收特性的影响, 获得了调 Q 光脉冲的调制深度、脉冲宽度、重复频率和单脉冲能量随不同浓度 Bi₂Te₃ 的变化关系。最终, 针对谐振腔参数对 Ti:Bi₂Te₃ 浓度进行优化, 在泵浦功率为 71 mW 时, 获得了中心波长为 1 560 nm、脉冲宽度为 8 μs, 重复频率为 14.2 kHz、平均输出功率 2.15 mW、对应单脉冲能量为 151.4 nJ 的脉冲输出。

关键词: 光纤激光器; 被动调 Q; 水热合成; Bi₂Te₃ 可饱和吸收体

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190542

Q-switched fiber laser with Ti: Bi₂Te₃ of different concentrations

Pan Wei, Chen Hualong, Wan Tiebin, Zhang Hongwei, Jin Liang, Zhang He, Xu Yingtian,
Zou Yonggang, Shi Linlin, Ma Xiaohui*

(National Key Laboratory on High Power Semiconductor
Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Nonlinear optical switch based on two-dimensional material is the core device of Q-switched fiber laser. The concentration of two-dimensional material optical switch will directly affect its nonlinear optical absorption characteristics, thus change the time-domain characteristics of the pulse. Therefore, the influence of two-dimensional material concentration on Q-switched optical pulse was studied, and a saturable absorption optical switch based on Ti: Bi₂Te₃ with different concentrations was made through experiments. The influence of Ti: Bi₂Te₃ concentration on nonlinear optical absorption characteristics was analyzed, and the relationship among the modulation depth, pulse width, repetition frequency and single pulse energy of Q-switched optical pulse with different concentrations Bi₂Te₃ was obtained. Finally, the Ti:Bi₂Te₃ concentration was optimized for the resonator parameters. When the pump power is 71 mW, the central wavelength is 1 560 nm, the pulse width is 8 μs, the repetition frequency is 14.2 kHz, the average output power is 2.15 mW, and the corresponding single pulse energy is 151.4 nJ.

Key words: fiber laser; passively Q-switched; hydrothermal synthesis; Bi₂Te₃ saturable absorber

收稿日期:2019-11-03; 修订日期:2019-12-15

基金项目:吉林省教育厅创新基金(JJKH20181112K); 长春理工大学创新基金(XJLG-2017-08)

作者简介:潘伟(1994-),男,硕士生,主要从事超短脉冲光纤激光器方面的研究。Email:570017741@qq.com

通讯作者:马晓辉(1965-),男,研究员,主要从事非线性光纤光学方面的研究。Email:mxh@cust.edu.cn

0 引言

光纤激光器由于其光束质量高、能量高、成本低等优点,被广泛应用在光纤传感、生物诊断、国防等领域^[1-4]。被动调 Q 是光纤激光器实现调 Q 的主要方法,将可饱和吸收体 (SA) 加入到激光腔内,腔内形成周期性损耗获得激光脉冲序列。目前,市场上应用最为广泛的可饱和吸收体是半导体可饱和吸收镜 (SESAM),其优点在于调制深度、饱和通量等参数精确可控,环境稳定性较高^[5-6]。但 SESAM 吸收带宽窄、制作工艺复杂、价格昂贵,而且需要昂贵的设备和复杂的制作这极大地限制了 SESAM 的应用。近年来,人们对二维材料非线性光学特性研究的深入,碳基材料(碳纳米管、石墨烯)、黑磷、拓扑绝缘体等已经被广泛的应用于被动调 Q 光纤激光器中^[7-8]。碳纳米管制备简单方便,灵活多样,成本低廉。但受到直径的限制,碳纳米管只能在特定波长有可饱和吸收作用。石墨烯是一种零带隙全波段吸收材料,但由于组成元素为碳元素,被激光直射时损伤阈值较低,容易被氧化。黑磷具有高迁移率的层状半导体结构,直接带隙能量由层数决定,由 0.3 eV(体结构)到 2 eV(单层),黑磷的宽光谱非线性响应特性有希望被应用到近红外和中红外的光电子器件中,但由于黑磷长时间的稳定性很差,限制了其大规模的应用。拓扑绝缘体 (topological insulator, TI) 因其具有低饱和强度、宽波段非线性吸收、高损伤阈值等优点而被广泛关注。TI 的价带间隔为 0.2~0.3 eV,当波长小于 4.1 μm 时, TI 的内部和外部共同吸收光波,当波长大于 4.1 μm 时, TI 表面吸收光波。因此,拓扑绝缘体对全波段均有吸收作用,是一种超宽带吸收的材料。碲化铋 (Bi₂Te₃) 作为拓扑绝缘体之一,目前已在 1、1.5、2、3 μm 等波段均实现光纤激光器调 Q 脉冲输出^[9-12],但针对不同浓度 TI:Bi₂Te₃ 可饱和吸收体对调 Q 光脉冲的影响却鲜有报道。

因此,文中针对 TI:Bi₂Te₃ 浓度对调 Q 光脉冲的影响开展研究。采用水热法制备了 Bi₂Te₃ 纳米薄片^[13]。将不同质量的 Bi₂Te₃ 纳米薄片均匀分散到成膜剂羧甲基纤维素钠 (NaCMC) 中制成具有不同浓度 Bi₂Te₃ 的可饱和吸收光开关,并分别加入激光器谐振腔中,研究不同浓度条件下可饱和吸收光开关与脉冲宽度、重复频率和输出功率的关系。最终,针对谐振腔参数对 TI 浓度进行优化,实现了脉冲宽度为 8 μs、重复频率为 14.2 kHz 的被动调 Q 光脉冲输出,脉冲能量为

151.4 nJ,平均功率为 2.15 mW。

1 Bi₂Te₃ 可饱和吸收材料制备与测试

实验采用水热法合成 Bi₂Te₃,所有试剂纯度均为分析纯,采用的主要试剂如表 1 所示。

表 1 水热合成所用试剂

Tab.1 Chemicals of hydro-thermal synthesis

Name of reagent	Chemical formula	Dosage	Effect
Sodium Tellurite	Na ₂ TeO ₃	1.5 mmol	Reactant
Bismuth chloride	BiCl ₃	1 mmol	Reactant
Polyvinyl pyrrolidone	PVP	100 mg	Surfactant, reducing agent

将 100 mg PVP 加入 40 ml 乙二醇中搅拌溶解,依次将亚碲酸钠和氯化铋加入溶液中,充分搅拌,将溶液转移到反应釜中,然后放入烘箱,180 °C 反应 20 h。将获得溶液用乙醇离心洗涤 3 次,去除杂质和乙二醇。最终将获得溶液 60 °C 烘干得到 Bi₂Te₃ 粉末。图 1(a) 是用 AFM 测试了 Bi₂Te₃ 的厚度,从图中可以看出:所测试的厚度为 11 nm 左右,由这个结果可知该样品的层数较少。图 1(b) 为样品 XRD (X-Ray diffractometer)[JCPDS NO.15-0863] 的测试结果,在 015 和 0015 有两个特征峰,显示制备的 Bi₂Te₃ 纳米颗粒处于晶体状态。称取 2.5 mg 的 Bi₂Te₃ 粉末加入 8 mL 的 NaCMC 溶液中,搅拌超声使溶液混合均匀。用滴管将溶液滴在盖玻片上,60 °C 烘干得到 Bi₂Te₃ 可饱和吸收体的薄膜。利用分光光度计 (Spectrop-hotometer) 对制备好的 TI:Bi₂Te₃ 光开关进行光吸收测试,为了避免 NaCMC 和玻璃基片对吸收特性的影响,实验分别对掺有 Bi₂Te₃ 的 NaCMC 薄膜和非掺 Bi₂Te₃ 的 NaCMC 薄膜进行透过率测试,进行了测量,结果如图 1(c) 所示,红线为纯 NaCMC 薄膜透射曲线,黑线为添加 Bi₂Te₃ 的 NaCMC 薄膜透射曲线。实验表明:Bi₂Te₃ 对波段在 400~2 000 nm 范围内的激光均有吸收。利用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 观察制备样品的表面形貌如图 1(d) 所示,所制备的 Bi₂Te₃ 纳米材料大部分呈六边形形状,宽度在 400~500 nm 左右且可以清晰地观察到纳米颗粒边界,颗粒与颗粒之间没有粘连在一起,表明所制备的材料具有很好的结晶性和分散性。图 1(e) 所示为 Bi₂Te₃ 光开关薄膜放置到 FC 光纤端面。

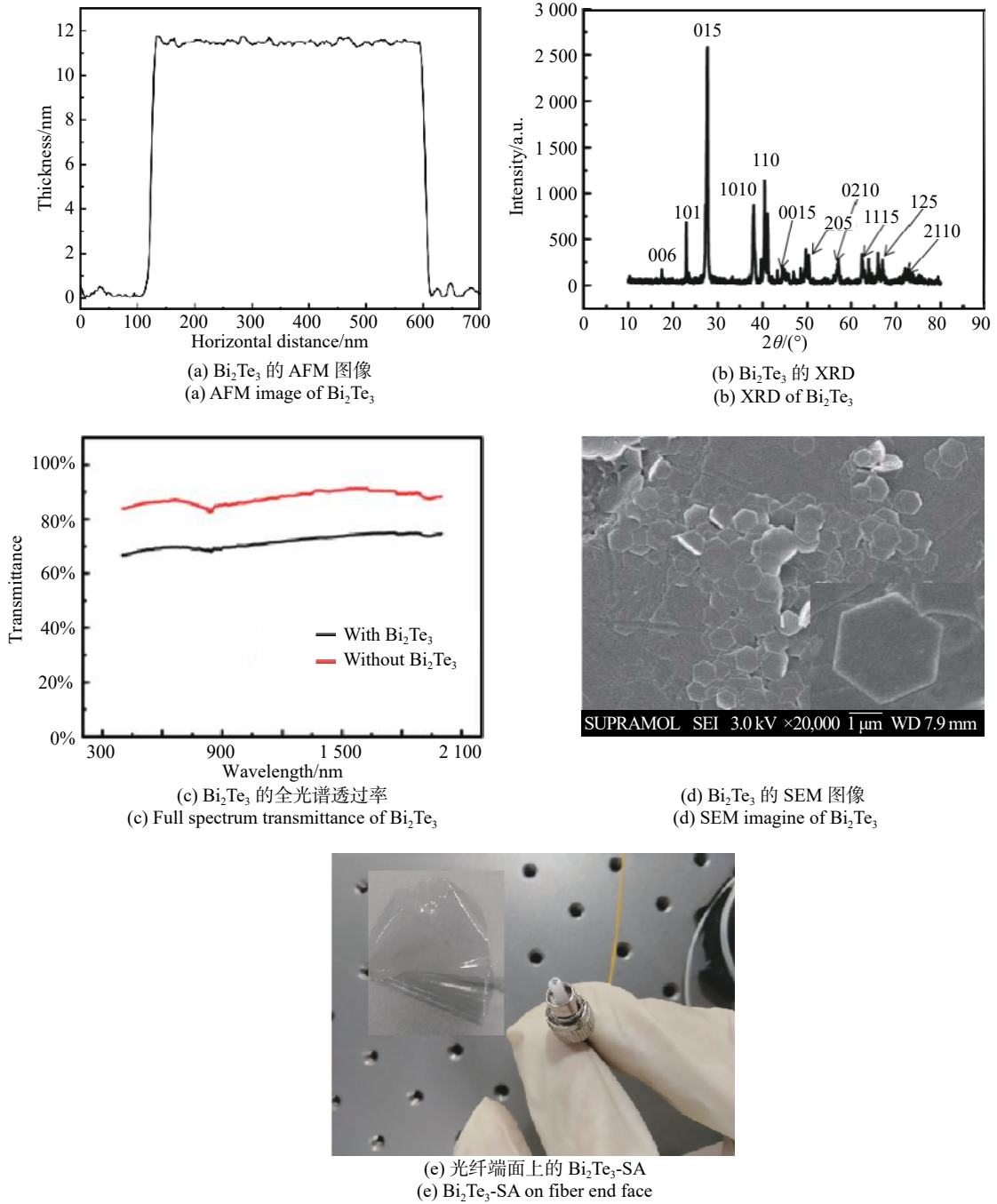


图 1 Bi_2Te_3 材料特性表征

Fig.1 Characterization of Bi_2Te_3 material

实验配制了不同浓度 Bi_2Te_3 作为光开关, 探索其浓度对调 Q 光脉冲的影响, 分别称取了 2.5、5、7.5、10 mg 的 Bi_2Te_3 粉末并分别加入 8 mL 的 NaCMC 溶液中, 搅拌超声使溶液混合均匀。用滴管将溶液滴在盖玻片上, 烘干后截取面积 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 薄膜, 用法兰固定在激光器的光路中。为了表征 Bi_2Te_3 粉末浓度对调制深度的影响关系, 实验使用 I 扫描测试装

置对不同浓度的 Bi_2Te_3 光开关的非线性透射曲线进行测量, 实验装置如图 2(a) 所示^[14]。I 扫描的测试光源为由自制的被动锁模光纤激光器(重复频率为 31.4 MHz, 中心波长为 1 558.5 nm, 脉冲宽度为 500 fs), 测试光脉冲经过光衰减器, 被 3 dB 光分束器均匀地分成两个强度几乎相同的激光。笔者让一束激光通过样品, 然后由功率计 A 测量, 而另一束激光作为参

考光由另一个功率计 B 直接测量。同步测量输入和输出脉冲强度,可以有效地降低检测误差。通过不断调整功率,就可以得到一系列输出功率与输入功率之比。测得的不同浓度 Bi_2Te_3 薄膜的透射率曲线如图 2(b) 所示,在 2.5 mg/8 mL~10 mg/8 mL 的浓度范围内,随着光开关浓度的增加,非饱和损耗由 10.9% 增加至 29%,调制深度由 4.4% 增加至 6.2%。这是因为拓扑材料中表面态和体态对光的吸收和弛豫分为四个过程,第一个过程中,材料中的载流子被入射光激发到表面态和体态的上能级中;第二个过程,上能级的载流子同时向体态和表面态弛豫;第三个过程,体态载流子耦合到表面态;第四个过程,表面态中载流子通过带间散射回到基态完成平衡。而拓扑材料浓度的变化,使得上能级表面态的载流会影响体态与表面态之间的载流子耦合效率,当体态越多时,耦合速度越慢,电子无法及时过度到表面态以弛豫回基态,而造成载流子的积累^[15]。结果显示,随着拓扑材料浓度的增加,拓扑样品的比表面积下降,样品中体态到表面态的耦合速度变慢,这使得样品更容易饱和,因此饱和强度下降。浓度较大的 Bi_2Te_3 光开关其覆盖率也较高,非饱和损耗就比较大。 Bi_2Te_3 光开关可以实现不同浓度状态下电子的直接跃迁,在光激发下可吸收更多的光子而获得更大的调制深度。

2 实验结果及讨论

实验搭建的光纤激光器结构如图 3 所示,泵浦源采用的 976 nm 单模半导体激光器 (LC9XU400-74P, II-IV),最大输出功率为 400 mW,通过 980/1550 nm 波分复用器 (WDM) 将泵浦光耦合进腔内。增益光纤为高掺杂的掺铒光纤 (Er 80-8/125, Liekki),长度为 40 cm,色散值为 32 000 fs²/m。偏振无关隔离器 (PI-ISO) 保证光束的单向输。将 Bi_2Te_3 光开关放置在光纤 FC 接头上,通过法兰将 Bi_2Te_3 光开关固定在光路中,使 SA 薄膜固定在光纤激光器环形腔中,激光通过耦合比为 90/10 的耦合器输出,光路中的偏振态可通过偏振控制器进行调节,腔总长度为 7.6 m。分别采用示波器 (KESIGHT, DSOV084A) 和光谱仪 (YOKOGAWA, AQ 6370D) 对光脉冲的时域和频域进行分析。

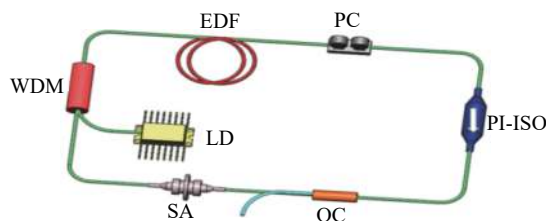


图 3 实验系统结构图

Fig.3 Experimental system structure

为了对比 NaCMC 薄膜对非线性光吸收特性的影响,实验首先将未掺杂 Bi_2Te_3 的 NaCMC 薄膜引入环形腔,缓慢增加泵浦功率,并调节偏振控制器,始终未能出现调 Q 激光脉冲输出。而将 4 组不同浓度 Bi_2Te_3 制作的 SA 薄膜加入腔内时,均出现了稳定的调 Q 光脉冲输出,证实了调 Q 脉冲输出是由 Bi_2Te_3 的非线性光学吸收特性实现的。图 4 为在 4 组不同浓度 Bi_2Te_3 条件下,输出调 Q 脉冲特性随泵浦功率的变化关系。

基于不同浓度 Ti: Bi_2Te_3 光开关调 Q 实验中脉冲宽度随泵浦功率的变化关系如图 4(a) 所示,调 Q 阈值随着 Bi_2Te_3 浓度的提高而降低,调 Q 光脉冲宽度随着泵浦功率的增加而减小。这是由于可饱和吸收体表面质量高,所以随着浓度的变大,加强光与物质的相互作用,光开关能力增强也就降低了阈值;在单位时间内,随着泵浦功率的增加,增益光纤中能够存储

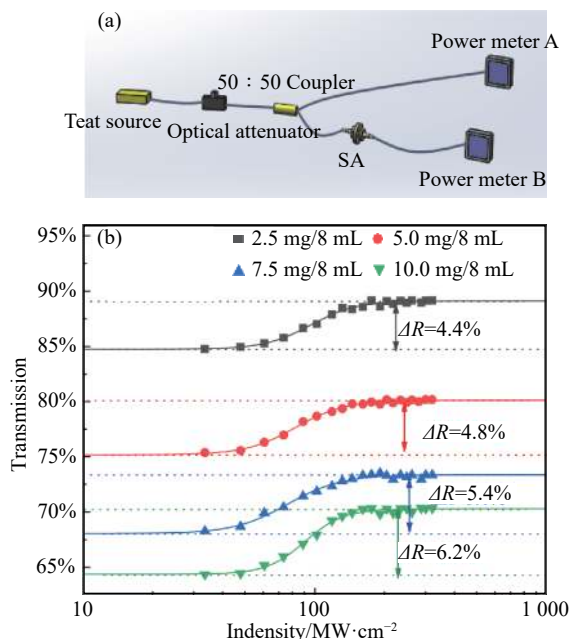


图 2 (a) I 扫描示意图; (b) 不同浓度所对应的调制深度

Fig.2 (a) I-scan schematic; (b) Modulation depth of different concentrations

更多反转粒子数,使得“漂白”的时间变的更短,然后更多的粒子在更短的时间内释放,因此,使输出脉冲宽度会变的更窄。图 4(b) 为不同 Bi_2Te_3 浓度的重复频率随泵浦功率的变化关系。根据实验结果可知,4 组不同浓度的重复频率都随泵浦功率增大而增大,这满足了被动调 Q 光纤激光器的典型特性。泵浦功率的增大提高了泵浦光的抽运速率,能级间反转粒子数积累的速度变快,缩短了达到阈值反转粒子数的时间,脉冲的形成时间也相应的缩短,单位时间内能够输出的脉冲数量增加,因此,导致输出的重复频率随着泵浦功率的增加而增大。图 4(c) 为不同浓度 Ti: Bi_2Te_3 光开关的平均功率随泵浦功率的变化关系。根据实验结果可知:在相同的 71 mW 泵浦功率下,各自达到的输出平均分别为 0.36、1.23、1.37 和 2.15 mW。可以看出:基于不同浓度 Ti: Bi_2Te_3 光开关的实验中,输出平均功率随泵浦功率几乎是线性增加。这是由于在同一泵浦条件下,浓度大的可饱和吸收体,其调制深度也变大,开关能力增强,可以调制的功率增加,激光器的转换效率变高,可以获得更大平均功率。图 4(d) 为不同浓度之间输出的单脉冲能量随泵浦功率的变化关系。根据实验结果可知,输出的单脉冲能量随泵浦功率的增大而增大,在相同泵浦功率下,浓度较大的 Bi_2Te_3 光开关可以获得更大的单脉

冲能量。实现调 Q 脉冲输出的阈值泵浦功率随 Ti: Bi_2Te_3 光开关的浓度增大而减小。这是由于随着浓度的增加,光和物质的相互作用变强,所以,能够提高平均输出功率和单脉冲能量,减小实现调 Q 脉冲输出的阈值泵浦功率。图 4(e) 为调 Q 阈值与浓度之间的关系。由实验结果可知:调 Q 脉冲输出的阈值功率随 Ti: Bi_2Te_3 光开关的浓度增大而减小。但随着泵浦功率与光开关浓度的变化趋势可知,若在 10 mg/8mL 浓度上继续增大 Bi_2Te_3 溶液的浓度,会出现调 Q 不稳定现象,甚至出现不了调 Q 脉冲输出。这是由于拓扑绝缘体可饱和吸收体具有很低的饱和强度。而过低的饱和强度使得激光器工作在高功率时,调 Q 脉冲变得不稳定甚至消失。最终,根据实验对不同浓度 Bi_2Te_3 光开关进行的实验结果可知,在 Bi_2Te_3 浓度为 10 mg/8 mL 时得到的光脉冲宽度最小,单脉冲能量最大。在泵浦功率为 28 mW 时出现稳定的调 Q 脉冲,继续增大泵浦功率至 71 mW,调 Q 脉冲依然能稳定输出。最终的实验结果如图 5 所示,输出光脉冲宽度 8 μs 、重复频率 14.2 kHz、光脉冲中心波长 1 560 nm、3 dB 带宽 1.4 nm、平均功率为 2.15 mW,对应的单脉冲能量为 151.4 nJ。

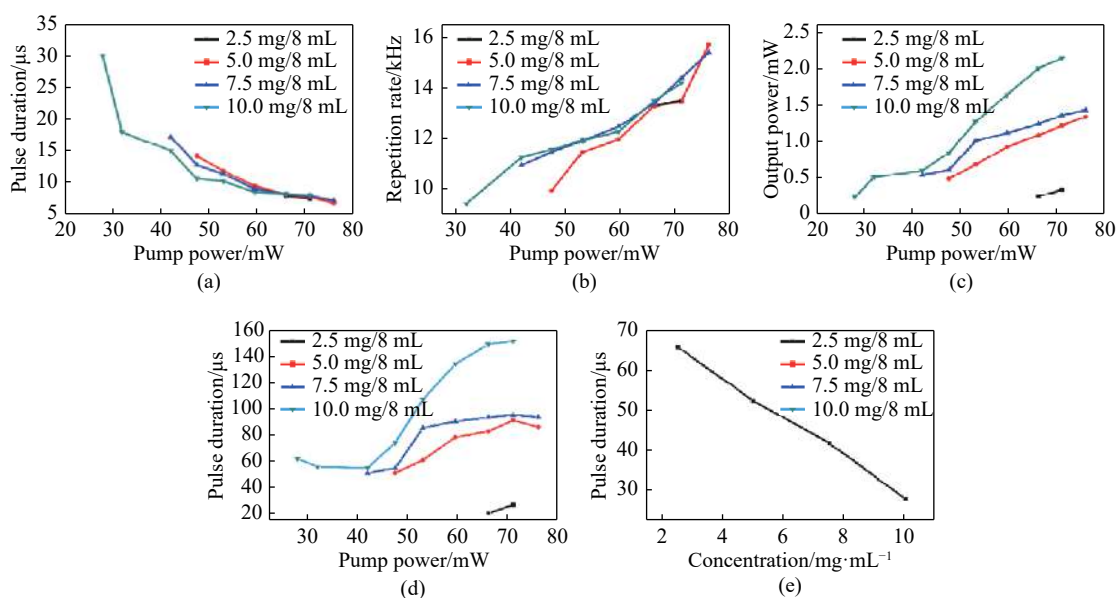


图 4 激光输出特性随泵浦功率变化

Fig.4 Characterization of laser output changing with pump power

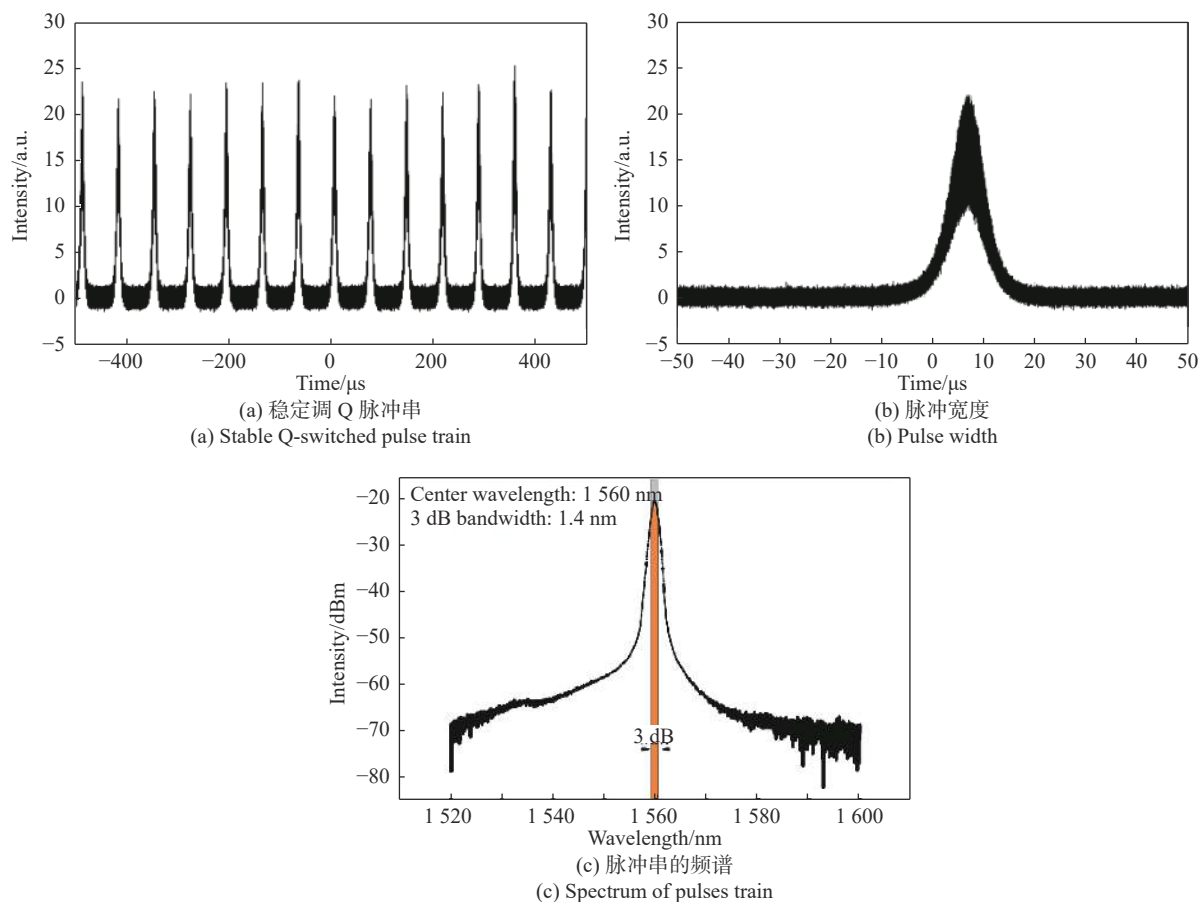


图 5 被动调 Q 激光脉冲输出特性

Fig.5 Output pulse characterization of passively Q-switched laser

3 结 论

文中利用了水热合成的方法制作了高质量的六边形 Bi_2Te_3 纳米薄片材料。制作了不同浓度的 Bi_2Te_3 光开关,探索了 Bi_2Te_3 浓度对调 Q 光脉冲的影响。从实验上验证了浓度在 2.5 mg/8 mL~10 mg/8 mL 范围内,随着 Bi_2Te_3 可饱和吸收光开关的浓度的增高,不仅可以获得更大的调制深度,更小的饱和通量的可饱和吸收光开关,还可以减小调 Q 的阈值,可以提高输出的平均功率和单脉冲能量。结果表明:在 10 mg Bi_2Te_3 粉末/8 mL NaCMC 配比下,泵浦功率为 71 mW 时,获得脉冲宽度 8 μs ,重复频率 14.2 kHz,平均输出功率 2.15 mW,对应的单脉冲能量为 151.4 nJ,中心波长 1 560 nm 的调 Q 激光。

参考文献:

[1] Li Runmin, Song Youjian, Shi Haosen, et al. All-polarization-maintaining erbium-doped mode-locking fiber laser based on

nonlinear polarization loop mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0803006. (in Chinese)

李润敏, 宋有建, 师浩森, 等. 全保偏非线性偏振环镜锁模掺铒光纤激光器[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0803006.

[2] Lian Peiru, Ning Qiuyi, Chen Weicheng, et al. Q-switched mode-locking noise-like rectangular pulses erbium-doped fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0803009. (in Chinese)

梁佩茹, 宁秋奕, 陈伟成, 等. 调Q锁模类噪声方波脉冲掺铒光纤激光器[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0803009.

[3] Wang Yunzhi, Xie Fang, Chen Longhui, et al. Research on optical fiber multi-wavelength laser for measuring displacement precisely [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(9): 2037-2042. (in Chinese)

王韵致, 谢芳, 陈龙辉, 等. 用于高精度测量位移等参量的光纤多波长激光器[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(9): 2037-2042.

[4] Gu Hongcan, Huang Junbin, Cheng Ling, et al. 20-1250 Hz fiber laser acceleration sensing system [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 470-475. (in Chinese)

- 顾宏灿, 黄俊斌, 程玲, 等. 20 ~ 1250 Hz 光纤激光加速度传感系统设计[J]. *中国光学*, 2017, 10(4): 470-475.
- [5] Zheng Zhijian, Ouyang Deqin, Zhao Junqing, et al. Dual-operation regime thulium-doped fiber laser and its applications in cascaded Raman light and supercontinuum generation [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-9.
- [6] Luo Zhichao, Luo Aiping, et al. Tunable and switchable multiwavelength passively mode-locked fiber laser based on SESAM and inline birefringence comb filter [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(1): 64-70.
- [7] Wang Xihu, Hu Jinyu, Xu Jinlong, et al. Bi₂Te₃ as the saturable absorber for the 2.0 μm passively Q-switched solid state pulsed laser [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(50): 29312-29316.
- [8] Feng Dejun, Hung Wenyu, Ji Pengyu, et al. Erbium-doped fiber ring cavity pulsed laser based on graphene saturable absorber [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1098-1101. (in Chinese)
冯德军, 黄文育, 纪鹏宇, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的掺铒光纤环形腔脉冲激光器[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1098-1101.
- [9] Wang Junli, Li Sha, Xing Yupeng, et al. A high-energy passively Q-switched Yb-doped fiber laser based on WS₂ and Bi₂Te₃ saturable absorbers [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(7): 1-8.
- [10] Jung Minwan, Lee Junsu, Koo Jaehyun, et al. A femtosecond pulse fiber laser at 1935 nm using a bulk-structured Bi₂Te₃ topological insulator [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7865-7874.
- [11] Li Jianfeng, Luo Hongyu, Wang Lele, et al. 3-μm Mid-infrared pulse generation using topological insulator as the saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3659-3662.
- [12] Salim M A M, haharuddin R A, Ismail M A, et al. Bi₂Te₃ based passively Q-switched at 1042.76 and 1047 nm wavelength [J]. *Laser Physics*, 2017, 27(12): 1-7.
- [13] Zhao Chujun, Zhang Han, Qi Xiang, et al. Ultra-short pulse generation by a topological insulator based saturable absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(21): 211106.
- [14] Chen Yun, Zhao Chujun, Huang Huihui, et al. Self-assembled topological insulator: Bi Se membrane as a passive q-switcher in an Erbium-doped fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(17): 2857-2863.
- [15] Sobota J A, Yang S, Analytis J G, et al. Ultrafast optical excitation of a persistent surface-state population in the topological insulator Bi₂Se₃ [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(11): 117403.