

基于碲化铋纳米片的全光可控调 Q 光纤激光器

金 雨, 杜 林, 蒋国保, 赵楚军

湖南大学物理与微电子科学学院, 湖南 长沙 410082

摘要 通过光学自组装方法制备了碲化铋可饱和吸收器件, 并获得了该器件的非线性光学响应特性。将可饱和吸收体引入掺铒光纤激光器中, 在抽运功率为 170 mW 时, 获得中心波长为 1564.94 nm, 脉冲宽度为 2.91 μ s 的激光输出。通过外加连续光对非线性吸收器件进行调制, 实现了脉冲持续时间和重复频率可调控的调 Q 光纤激光输出。

关键词 激光器; 被动调 Q; 拓扑绝缘体; 碲化铋; 全光控制

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0703014

All-Optical Tunable Q-Switched Fiber Laser Based on Bismuth Telluride Nanosheets

Jin Yu, Du Lin, Jiang Guobao, Zhao Chujun

School of Physics and Electronics, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

Abstract The saturable absorber Bismuth Telluride nanosheets are synthesized via optical self-assembly method, and the nonlinear optical response characteristics are obtained. By introducing the saturable absorber into the Er-doped fiber laser, the Q-switched fiber laser can deliver the pulse laser with pulse duration of 2.91 μ s, wavelength of 1564.94 nm with the pump power of 170 mW. With the modulation of continuous wave laser on nonlinear absorption devices, the pulse duration and repetition frequency tunable Q-switched fiber laser is realized.

Key words lasers; passively Q-switched; topological insulators; bismuth telluride; all-optical modulation

OCIS codes 140.3500; 140.3510; 140.3540

1 引 言

被动调 Q 光纤激光器由于其光束质量高、能量高、系统简单等优点, 在光通信、光传感、生物诊断、工业加工、国防等领域应用广泛^[1-4]。

非线性光调制器件是被动调 Q 光纤激光器中的关键元件, 其对非线性材料的要求是具有大的工作带宽、低的损耗和可调的调制深度^[5-14]。目前, 半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 是应用最为广泛的可饱和吸收体 (SA), 其调制深度、饱和通量等参数可以精确控制, 但是其制作工艺复杂、价格昂贵, 而且工作波长范围较窄^[6]。随着新材料技术的发展, 碳纳米管独特的光电和非线性光学性质引起研究人员的广泛关注。碳纳米管调制深度较小、损伤阈值低、其带隙大小由其直径和手性决定, 通过精确地调控管径分布以获得所需波段的 SA^[7]。随着石墨烯的出现, 二维原子晶体材料因具有独特的电学、光学、机械特性和非线性光学特性, 已经作为一类崭新的材料在脉冲激光产生方面呈现出独特优势^[8-14]。

近年来, 另一种狄拉克材料——拓扑绝缘体 (TI), 作为 SA 逐渐进入人们的视线, 它具有低饱和强度、宽波段非线性吸收、高损伤阈值等优点^[15-20]。目前, 很多研究组相继开展了有关 TI 材料的非线性光学特性表

收稿日期: 2017-01-30; **收到修改稿日期:** 2017-03-07

基金项目: 国家自然科学基金 (61475102)

作者简介: 金 雨 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器件方面的研究。E-mail: jinyu005521@163.com

导师简介: 赵楚军 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事非线性光学与激光技术方面的研究。

E-mail: cjzhao@hnu.edu.cn (通信联系人)

征及应用的研究^[16-20]。但是,基于 TI 材料非线性吸收特性的全光调控相关研究,目前鲜有报道。

本文以碲化铋(Bi₂Te₃)二维纳米材料作为饱和吸收体,通过外加连续调制光调制,实现了 Bi₂Te₃ 非线性吸收特性的全光控制,进而获得了脉冲持续时间和重复频率可控的调 Q 光纤激光输出。

2 Bi₂Te₃ 的制备及其非线性光学特性

通常情况下, TI 纳米材料可以通过自上而下的逐层剥离或者自下而上的化学合成方法制备得到^[21]。本文采用自下而上的多元醇法合成 Bi₂Te₃ 纳米片^[22],然后把制备好的 Bi₂Te₃ 纳米片分散在异丙醇溶剂中,经过 6 h 超声处理,再将异丙醇中的 Bi₂Te₃ 分散液滴于标准圆形螺口固定型光纤连接器(FC/PC)光纤头端面上,在 80 °C 下干燥超过 1 h,获得自组装于光纤端面的 Bi₂Te₃ 膜层。最后,将其与另一个干燥、洁净的 FC/PC 光纤头相连,即完成了 SA 的制备,如图 1 所示。

为了表征碲化铋 SA(Bi₂Te₃-SA)的非线性光学特性的影响,通过平衡双探头方法对其光学响应进行测量。测试过程中,引入一束波长为 980 nm 的连续激光对 Bi₂Te₃-SA 的光学特性进行调制,具体实验装置如图 1 所示。测试光源为实验室自己搭建的掺钕锁模光纤激光器,具体参数为:重复频率为 20 MHz,中心波长为 1565.6 nm,脉冲宽度为 1.5 ps。通过调节输入功率以及调制光的功率,得到在不同调制光作用下 Bi₂Te₃-SA 的非线性透射率曲线,如图 2 所示。

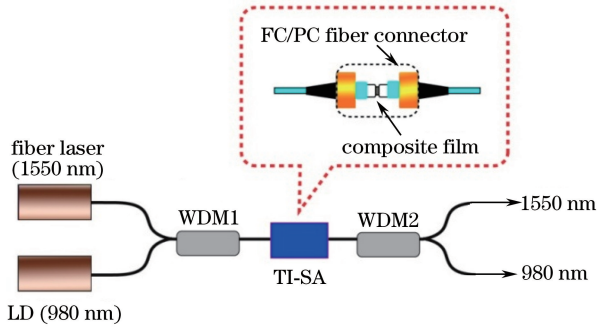


图 1 非线性测量系统示意图及 Bi₂Te₃-SA

Fig. 1 Schematic of the nonlinear measurements and Bi₂Te₃ SA

非线性透射率曲线表示为^[23-24]

$$\alpha(I) = \frac{\alpha_s}{1 + I/I_s} + \alpha_{ns}, \quad (1)$$

式中 $\alpha(I)$ 为非线性吸收系数, I 为输入光强, I_s 为光饱和强度, α_{ns} 为非饱和吸收损耗, α_s 为调制深度。引入调制光 I_2 , 即对(1)式进行变形,可以得到^[23-24]

$$\alpha(I_1, I_2) = \frac{\alpha_s(I_2)}{1 + I_1/I_{s1}} + \alpha_{ns}, \quad (2)$$

式中 $\alpha_s(I_2)$ 为引入调制光强度的调制深度, I_1 为输入光强度, I_{s1} 为输入光的饱和强度。将实验所得数据通过(2)式进行拟合,得到如图 2 所示的非线性透射率曲线。由图 2 可知,随着调制光(P_1)的引入,非线性透射率曲线逐渐上移,相应的吸收特性发生变化。当没有引入调制光时,SA 的调制深度为 9.4%。当调制光功率逐渐增大时,SA 的调制深度逐渐减小。当调制光功率达到 40 mW 时,调制深度 ΔT 减少 8.7%。这一交叉吸收调制结果与文献^[25]报道一致。

Bi₂Te₃ 表面态具有与石墨烯相同的狄拉克锥能带结构。当频率为 ω_1 的激光与 Bi₂Te₃ 材料相互作用时,价带上的电子吸收光子然后跃迁到导带上,从而在价带上形成空穴。电子和空穴满足费米-狄拉克分布,在导带和价带上重新分布。如果在此时另一频率为 ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$) 的激光入射到 Bi₂Te₃ 材料上,也会大量吸收 ω_2 的光子,同样会形成大量的空穴和电子,并且也满足费米-狄拉克分布,如图 3 所示。由于 ω_2 的光子的能量大于 ω_1 光子的能量,吸收 ω_2 光子产生的空穴和电子在满足费米-狄拉克分布后会占据狄拉克点附

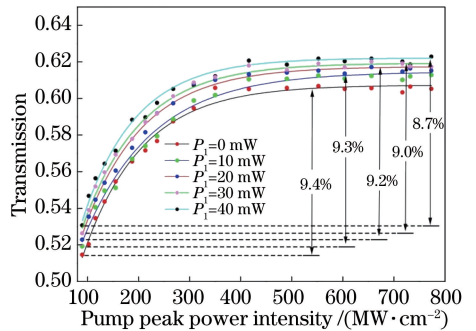


图 2 在不同的调制光功率下的非线性透射率曲线
Fig. 2 The measured nonlinear absorption curves of the TI-SA with or without the modulation laser

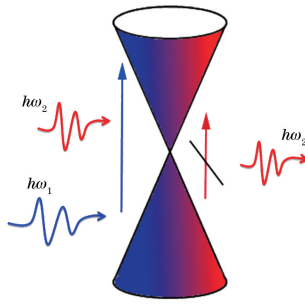


图 3 交叉吸收调制效应

Fig. 3 Cross-absorption modulation effect

近的能级,阻止能量 ω_1 光子的吸收,从而降低 ω_1 光子通过该非线性材料时的损耗。

3 调 Q 激光实验装置

将 $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-SA}$ 引入掺铒光纤激光器中,可以实现全光可控的脉冲激光输出,实验装置如图 4 所示。实验所用的光纤激光腔长为 15 m,其中包含了一段长为 0.8 m,群速度色散为 $15.8 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ 的铒(Er)高掺杂光纤(EDF, Er80-8/125, LIEKKI, 芬兰)和单模光纤(SMF)。实验中,使用波长为 980 nm 的激光二极管(LD)作为抽运,由一个 980/1550 的波分复用器(WDM)将其产生的光束耦合进入激光腔内,最终使用 20% 的光纤耦合器作为输出。光纤激光器中接入偏振控制器(PC)和偏振无关的隔离器(PI-ISO)来使其稳定单向工作。未将 $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-SA}$ 引入激光器中时,增大抽运功率或者调控偏振,均未观测到脉冲激光输出,从而可以排除自调 Q 和锁模的可能。之后,将 $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-SA}$ 用两个 980/1550 的 WDM 连接接入激光腔内,其中 WDM1 的一端同激光腔连接,另一端接一个用来产生调制光的 LD(波长为 980 nm),而 WDM2 则用来将引入的调制光引出激光腔。分别采用光谱分辨率为 0.015 nm 的光谱分析仪(AQ-6317B, Ando, 日本),500 MHz 的示波器(TDS 3054B, Tektronix, 美国)和一个 5 GHz 的光检测器(SIR5, Thorlabs, 美国)来检测激光光谱和脉冲输出特性。

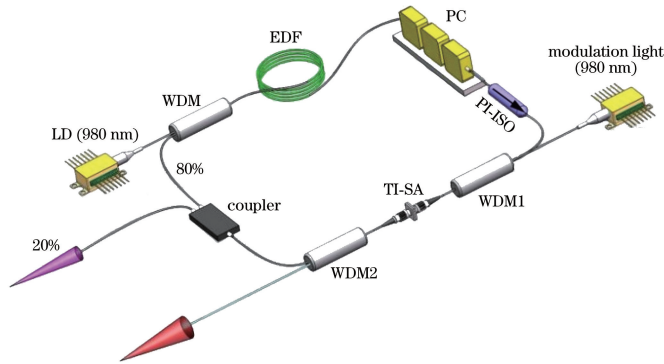


图 4 被动调 Q 掺铒光纤激光器的实验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup of the passively Q-switched Er-doped fiber laser

4 实验结果与讨论

将 $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-SA}$ 接入腔内,在调制光源关闭的条件下,仅仅调节抽运功率的大小和谐振腔偏振。图 5 为该调 Q 光纤激光器的重复频率、光谱及射频(RF)频谱特性。如图 5(a)所示,当抽运功率为 50 mW 时,可得到稳定的调 Q 输出;当抽运功率为 170 mW 时,脉冲宽度最小达到 $2.91 \mu\text{s}$,且调 Q 脉冲输出稳定。图 5(b)为其输出脉冲序列,重复频率为 19.6 kHz,无强度调制出现;图 5(c)为对应的光谱,3 dB 光谱带宽为 0.064 nm,中心波长为 1564.94 nm;图 5(d)为对应的 RF 频谱曲线,对应的信噪比为 49.3 dB,表明该调 Q 输出稳定。随着抽运功率增大,调 Q 脉冲的重复频率随着抽运功率的增大而增大,脉冲持续时间随抽运功率的增大而减小。

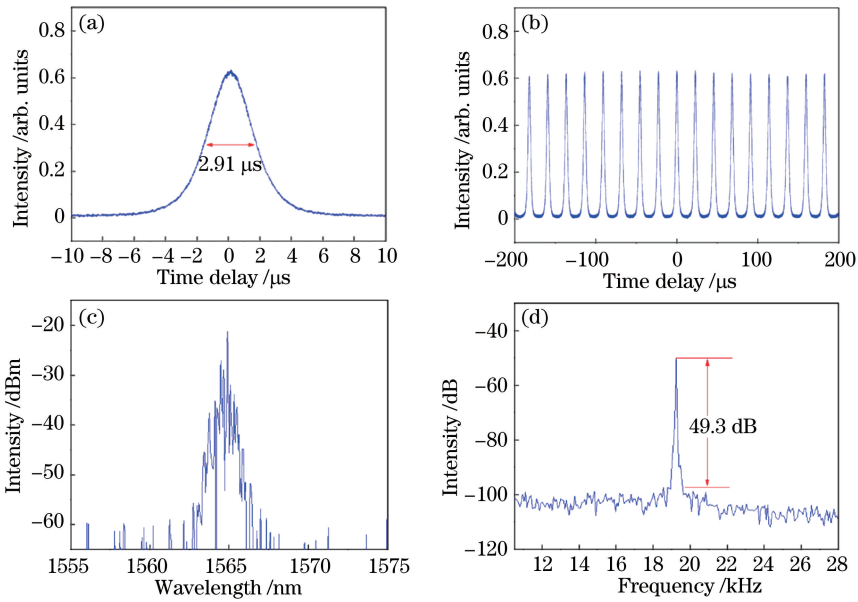


图 5 未引入调制光功率时对应调 Q 光纤激光器。(a) 脉冲宽度; (b) 脉冲重复频率; (c) 光谱; (d) RF 谱
 Fig. 5 Corresponding Q-switched fiber laser without a modulating power. (a) Pulse width; (b) pulse repetition frequency; (c) spectrum; (d) RF spectrum

当引入调制光后, 逐渐增大调制光功率时, 光纤激光器能够维持调 Q 工作状态, 如图 6 和图 7 所示。当调制光功率逐渐增大到 40 mW 时, Bi_2Te_3 调 Q 光纤激光器的重复频率变化如图 6 所示。伴随抽运功率的增大, 调 Q 光纤激光器的重复频率增大。同时, 伴随调制光功率增大, 相应的重复频率也相应增大。而且, 随着调制光功率的引入以及逐渐增大, 在同一抽运功率下调 Q 脉冲的重复频率是依次增大的。图 7 为不同调制光功率下, 调 Q 光纤激光器脉冲持续时间的变化曲线。随着抽运功率增大, 脉冲宽度递减; 当调制光功率从 0 mW 逐渐增大到 40 mW 时, 调 Q 脉冲的脉冲宽度也逐渐增大。在调 Q 激光中, 脉冲宽度与 SA 的调制深度等参数满足:

$$\tau = 3.52 \times \frac{T}{\Delta T}, \quad (3)$$

式中 τ 为脉宽, T 为腔循环一周所用的时间, ΔT 为 Bi_2Te_3 的调制深度。随着调制光功率的增大, 受交叉吸收调制特性的影响, Bi_2Te_3 -SA 的调制深度减小。在抽运功率稳定的条件下, 如 T 不变, ΔT 减小, 则脉宽会随着调制光功率的增大而增大。

这些结果表明, 调制光引入造成的交叉吸收调制效应直接影响了 Q 开关的调制性能, 从而造成调 Q 脉冲重复频率和脉冲宽度的变化。

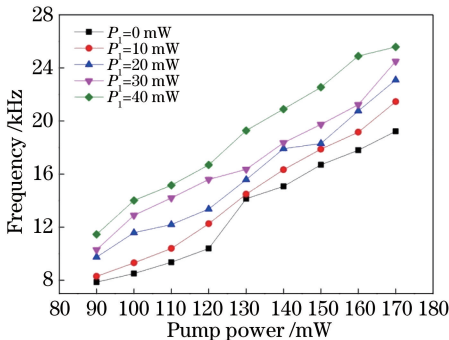


图 6 不同调制光功率下重复率与抽运功率的变化关系
 Fig. 6 Relationship between repetition frequency and pump power with the variable modulation light powers

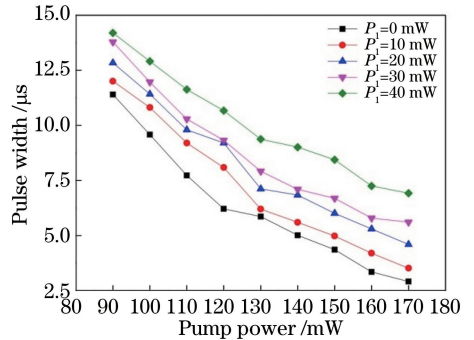


图 7 不同调制光功率下脉冲宽度与抽运功率的变化关系
 Fig. 7 Relationship between pulse duration and pump power with the variable modulation light powers

测量了 Bi_2Te_3 调 Q 光纤激光器的输出功率特性,结果如图 8 所示。随着抽运功率和调制光功率的增大,光纤激光器的输出功率未出现大的变化。在未引入调制光,抽运功率为 170 mW 时,获得最大输出功率为 838.3 μW 。随着调制光功率的逐渐增大,其值分别为 10, 20, 30, 40 mW 时,获得的最大输出功率分别为 831.1, 819.3, 810.6, 813.3 μW 。结果表明,调制光功率的增加并未对输出功率造成明显的影响。该调 Q 光纤激光器的效率较低,主要源于 Bi_2Te_3 纳米片引入的插入损耗、光纤谐振腔的熔接损耗等。后续工作中,将不断优化材料制备和谐振腔设计,提升效率。图 9 对比了接入和未接入 SA 情况下激光器的输出功率特性。在抽运功率为 170 mW,未接入 SA 时,输出功率为 1947 μW ;接入 SA 后,输出功率为 838.3 μW 。

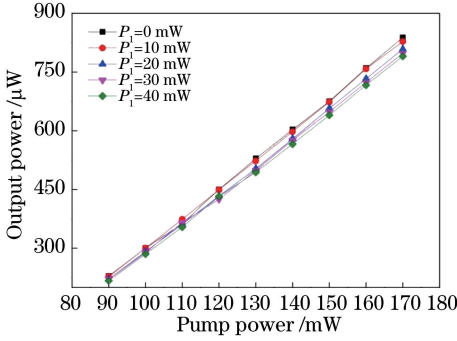


图 8 不同调制光功率下输出功率与抽运功率的变化关系
Fig. 8 Relationship between output power and pump power with the variable modulation light powers

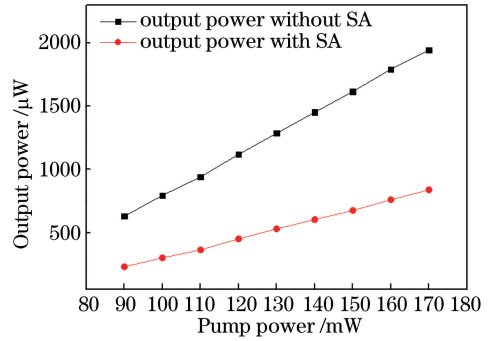


图 9 接入与未接入 SA 的激光器功率输出特性
Fig. 9 Power output characteristics of the fiber laser with SA or without SA

5 结 论

基于多元醇法合成的 Bi_2Te_3 纳米片,制备得到了光纤型 SA,并将其引入掺钕光纤激光器中,成功获得了调 Q 脉冲输出。通过引入外加调制光源,实现了调 Q 光纤激光器重复频率、脉冲持续时间的调制。在未引入调制光的情况下,当抽运功率为 170 mW 时,获得了光通信波段脉冲宽度为 2.91 μs ,重复频率为 19.2 kHz 的脉冲激光输出;当引入调制光后,通过控制调制光的功率可以实现脉冲光源重复频率和脉冲宽度的有效调控。该研究结果不仅拓展了低维材料的全光调制能力范围,而且为发展新型可调脉冲光纤激光光源提供了参考。

参 考 文 献

- [1] McClung F J, Hellwarth R W. Giant optical pulsations from ruby[J]. Applied Optics, 1962, 1(101): 103-105.
- [2] Paschotta R, Häring R, Gini E, et al. Passively Q-switched 0.1 mJ fiber laser system at 1.53 μm [J]. Optics Letters, 1999, 24(6): 388-390.
- [3] Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively Q-switched nanosecond-pulsed Thulium-doped fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1202006.
刘江, 王璞. 高功率被动调 Q 纳秒脉冲掺铥光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1202006.
- [4] Wu Quan, Fan Zhongwei, Yu Jin, et al. Research progress of nanosecond regime pulsed fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 060004.
吴权, 樊仲维, 余锦, 等. 纳秒量级脉冲光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 060004.
- [5] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, et al. Graphene photonics and optoelectronics[J]. Nature Photonics, 2010, 4(9): 611-622.
- [6] Huang J Y, Huang W C, Zhuang W Z, et al. High-pulse-energy, passively Q-switched Yb-doped fiber laser with AlGaInAs quantum wells as a saturable absorber[J]. Optics Letters, 2009, 34(15): 2360-2362.
- [7] Set S Y, Yaguchi H, Tanaka Y, et al. Laser mode locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 51-56.
- [8] Castro N A H, Guinea F, Peres N M R, et al. The electronic properties of graphene[J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(1): 109-162.
- [9] Popa D, Sun Z, Torrisi T, et al. Graphene Q-switched, tunable fiber laser[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(7):

- 073106.
- [10] Liu J, Wu S D, Yang Q H, *et al.* Stable nanosecond pulse generation from a graphene-based passively Q-switched Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 4008-4010.
- [11] Zhang H, Tang D. Y, Zhao L M, *et al.* Large energy mode locking of an erbium-doped fiber laser with atomic layer graphene[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17630-17635.
- [12] Bao Q L, Zhang H, Wang Y, *et al.* Atomic layer graphene as saturable absorber for ultrafast pulsed laser[J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(19): 3077-3083.
- [13] Luo Z Q, Zhou M, Weng J, *et al.* Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3709-3711.
- [14] He Jingliang, Hao Xiaopeng, Xu Jinlong, *et al.* Ultrafast mode-locked solid state lasers with graphene saturable 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.
- [15] Zhang H, Liu C X, Qi X L, *et al.* Topological insulators in Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 with a single Dirac cone on the surface[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(6): 438-442.
- [16] Chen Y L, Analytis J G, Chu J H, *et al.* Experimental realization of a three-dimensional topological insulator, Bi_2Te_3 [J]. *Science*, 2009, 325(5937): 178-181.
- [17] Bernard F, Zhang H, Gorza S P, *et al.* Towards mode-locked fiber laser using topological insulators[J]. *Nonlinear Photonics*, 2012: NTh1A.5.
- [18] Zhao C J, Zhang H, Qi X, *et al.* Ultra-short pulse generation by a topological insulator based saturable absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(21): 211106.
- [19] Luo Z Q, Huang Y Z, Weng J, *et al.* 1.06 μm Q-switched ytterbium-doped fiber laser using few-layer topological insulator Bi_2Se_3 as a saturable absorber[J]. *Optics Express*, 21(24): 29516-29522.
- [20] Liu Jinghui, Tian Jinrong, Hu Mengting, *et al.* Q-switched Yb:KGW laser based on topological insulators[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0802004.
刘京徽, 田金荣, 胡梦婷, 等. 基于拓扑绝缘体的 Yb:KGW 调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0802004.
- [21] Li Hui, Peng Hailin, Liu Zhongfan. Two-dimensional nanostructures of topological insulators and their devices[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2012, 28(10): 2423-2435.
李 辉, 彭海琳, 刘忠范. 拓扑绝缘体二维纳米结构与器件[J]. *物理化学学报*, 2012, 28(10): 2423-2435.
- [22] Wang Q K, Chen Y, Miao L L, *et al.* Wide spectral and wavelength-tunable dissipative soliton fiber laser with topological insulator nano-sheets self-assembly films sandwiched by PMMA polymer[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7681-7693.
- [23] Sheng Q W, Feng M, Xin W, *et al.* Tunable graphene saturable absorber with cross absorption modulation for mode-locking in fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(4): 041901.
- [24] Sheng Q W, Feng M, Xin W, *et al.* Actively manipulation of operation states in passively pulsed fiber lasers by using graphene saturable absorber on microfiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14859-14866.
- [25] Zayhowski J J, Kelley P L. Optimization of Q-switched lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, 27(9): 2220-2225.