

碲化铋倏逝场锁模器件的超快光纤激光器

张世达 耿乙迦

Ultrafast fiber laser based on bismuth telluride evanescent field mode-locked device

ZHANG Shi-da, GENG Yi-jia

引用本文:

张世达, 耿乙迦. 碲化铋倏逝场锁模器件的超快光纤激光器[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 433–442. doi: 10.37188/CO.2021–0216

ZHANG Shi-da, GENG Yi-jia. Ultrafast fiber laser based on bismuth telluride evanescent field mode-locked device[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 433–442. doi: 10.37188/CO.2021–0216

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0216>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[新型二维材料在固体激光器中的应用研究进展](#)

Advances in new two-dimensional materials and its application in solid-state lasers

中国光学. 2018, 11(1): 18 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0018>

[超快激光制备医用材料表面功能微结构的现状及研究进展](#)

Surface functional microstructure of biomedical materials prepared by ultrafast laser: a review

中国光学. 2019, 12(2): 199 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0199>

[结构紧凑的双波长连续波掺铒光纤激光器](#)

Compact dual-wavelength continuous-wave Er-doped fiber laser

中国光学. 2019, 12(4): 810 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0810>

[固体激光器与光纤激光器对光子晶体光纤棒耦合的分析与对比](#)

Analysis and comparison of solid-state lasers and fiber lasers on the coupling of rod-type photonic crystal fiber

中国光学. 2018, 11(6): 958 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0958>

[采用超连续谱激光的双光束光纤光阱实验](#)

Double-beam fiber optical trap experiments based on supercontinuum laser

中国光学. 2017, 10(3): 370 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0370>

[声光偏转快调谐脉冲CO₂激光器实验研究](#)

Experimental research on acousto-optic deflection rapid tuning pulsed CO₂ lasers

中国光学. 2019, 12(2): 355 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0355>

文章编号 2095-1531(2022)03-0433-10

碲化铋倏逝场锁模器件的超快光纤激光器

张世达^{1,2}, 耿乙迦^{1*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033;
2. 长春重明科技有限公司, 吉林长春 130119)

摘要:为使光纤激光器在被动谐波锁模状态下实现锁模脉冲高重复频率输出,本文通过激光沉积法制备了一种基于非线性拓扑绝缘体材料碲化铋与侧面抛磨光纤相结合的可饱和吸收体锁模器件,该器件调制深度、非饱和损耗、饱和强度分别为 23.96%、37.77%、31.5 MW/cm²。将其应用在掺铒光纤激光器中,通过对整个腔内色散参数的调整,以及利用材料自身良好的非线性可饱和吸收能力,成功实现了锁模自启动,其中心波长为 1555.67 nm,脉冲宽度为 487 fs,重复频率为 47.87 MHz,信噪比为 58 dB。当泵浦功率超过 150 mW 时出现锁模脉冲的谐波分裂,持续对泵浦功率进行微调,增加直至最高功率 250 mW 时,出现了 11 阶谐波锁模脉冲,重复频率最高达到 528 MHz,此时的信噪比为 41.5 dB。本文结果证明利用侧面抛磨光纤结构的倏逝场,能够辅助材料提升一定的激光抗损伤能力,便于其在基本锁模状态下进一步实现被动谐波锁模,满足锁模脉冲高重频的产生及探究,对材料在高重频超快光纤激光器中的应用具有重要意义。

关 键 词:二维材料;可饱和吸收体;倏逝场;超快光纤激光器

中图分类号:TP394.1;TH691.9 文献标志码:A doi:[10.37188/CO.2021-0216](https://doi.org/10.37188/CO.2021-0216)

Ultrafast fiber laser based on bismuth telluride evanescent field mode-locked device

ZHANG Shi-da^{1,2}, GENG Yi-jia^{1*}

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Changchun Chongming Technology Co., Ltd, Changchun 130119, China)
* Corresponding author, E-mail: gengyijia_jlu@163.com

Abstract: In order to realize the passively harmonic mode-locking with high repetition rate in the fiber laser. A saturable absorber (SA) based on two dimensional (2D) topological insulators material of Bismuth telluride (Bi_2Te_3), combining with a side-polished fiber, was fabricated by laser deposition technology in this study. This device has a modulation depth of 23.96%, nonsaturable loss of 37.77% and saturable intensity of 31.5 MW/cm². According to the adjustment of dispersion in the whole cavity and the excellent nonlinear saturable absorb character in topological insulator materials, a self-starting mode-locking is realized successfully when this SA device is applied in the Er-doped fiber laser, with a central wavelength of 1555.67 nm,

收稿日期:2021-12-13; 修订日期:2022-01-04

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20210201026GX, No. 20210204188YY)

Supported by Science and Technology Development Project of Jilin Province (No. 20210201026GX, No. 20210204188YY)

pulse duration of 487 fs, repetition rate of 47.87 MHz and signal-to-noise ratio of 58 dB. A harmonic mode-locking is achieved when the pump power is over 150 mW. When we adjust and increase slightly the pump power till 250 mW, the harmonic mode-locking of 11 orders is achieved with the repetition rate of 528 MHz and the signal-to-noise ratio of 41.5 dB. These results demonstrate that with the evanescent field produced by the side-polished fiber, the damage threshold of materials can be improved and the passively harmonic mode-locking with high repetition rate is realized, which has a great significance for the materials in the application of ultrafast fiber laser with high repetition rate.

Key words: tow dimensional material; saturable absorber; evanescent field; ultrafast fiber laser

1 引言

高重频超快光纤激光器在科学研究、工业加工、生物成像等领域具有重要意义。被动谐波锁模是一种造成脉冲分裂，实现锁模脉冲高重频输出较为便捷的方式，其产生条件在于整个腔内的色散与非线性。所以说，一个良好的具有可饱和吸收特性的被动锁模器件对于被动谐波锁模激光器来说具有重要意义。

自从石墨烯被发现^[1]可应用在光纤激光器中并成功实现锁模脉冲以来^[2-4]，各种各样的二维材料相继出现，如拓扑绝缘体^[5-6]、过渡金属硫化物^[7-11]、黑磷^[12-13]、MXenes^[14-15]等，由于这些材料皆具有宽带可饱和吸收的共同特性，皆可作为可饱和吸收体集成在腔内制作成超快光纤激光器。此外，相较于半导体可饱和吸收镜(SESAM)制备复杂、成本高昂且需要空间对准等不足，这些二维材料由于具有易于制备且容易集成到光纤激光腔内实现全光纤结构等优点，而成为 SESAM 的有力竞争者，因此具有重要的研究价值^[16-18]。

拓扑绝缘体，作为二维材料中的一种，通过自旋轨道耦合能够实现类似于石墨烯“狄拉克锥”结构的新奇量子物态，有效提高了载流子的输运能力^[19-20]。此外，正是这种独特的带隙结构，使其具有较高的调制深度，在可见光到中红外光谱中具有很强的宽带非线性响应，并且载流子寿命短于几皮秒。这些优良特性使得拓扑绝缘体材料成为用于制作超快光纤激光器的理想材料^[5,21-23]。

虽然基于材料的超快激光光源能够实现锁模自启动且不会引入过多的微扰，但是材料自身的抗损伤能力较差，这就影响了超快激光光源的耐

久性^[23-25]。这些问题同样也限制了基于材料的超快光纤激光器的进一步发展，所以设计一种独特的集成方式将材料应用于光纤激光器中，提高激光器的锁模稳定性与使用耐久性是极其必要的^[26]。

本文采用激光沉积方法^[27]，将拓扑绝缘体材料碲化铋沉积在侧面抛磨光纤的抛磨区，制备成倏逝场耦合式的可饱和吸收器件。该器件能够有效增加光与材料的接触面积，克服了传统方法利用透射式将有机薄膜与材料耦合在高功率下易损坏的弊端，增加其抗损伤能力^[28]，便于其在功率不断提高的情况下进一步产生被动谐波锁模，实现锁模脉冲的高重频输出。利用双臂平衡探测装置，对该可饱和吸收体进行非线性光学测试，得到其调制深度为 23.96%，非饱和损耗为 37.77%，饱和强度为 31.5 MW/cm^2 。最后将其应用于掺铒光纤激光器中，实现了锁模自启动。其锁模阈值为 75 mW，重复频率为 47.87 MHz，信噪比为 58 dB，中心波长为 1555.67 nm，并且能够稳定运行 30 h，当泵浦功率达到 250 mW 时，出现 11 阶谐波锁模运作，最大重复频率为 528 MHz。这对拓扑绝缘体材料在高重频超快光纤激光器的应用具有重要意义。

2 可饱和吸收体的制备过程

2.1 材料的制备与表征

拓扑绝缘体材料碲化铋采用水热法制备，Bi 元素与 Te 元素分别采用 2 mmol 与 3 mmol 的配比，依次将聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、氢氧化钠、乙二醇等混合均匀形成前驱液 50 ml，放入反应釜中置于高温烘箱在 200 °C 反应 12 小时，加热完

待自然冷却至室温后, 经过离心、超声洗涤后获得所需溶液。扫描电子显微镜(SEM)获得的图片如图1(a)所示, 发现制备的硒化铋纳米片为六边形结构, 横向尺寸大约为500 nm; 接着, 通过X射线衍射能谱(XRD)对所制备样品进行定性分析, 如图1(b)(彩图见期刊电子版)所示, 发现其在晶面指数(0, 1, 5)、(1, 0, 10)、(1, 1, 0)处具有明显的结晶峰。这些对称性较为均匀的峰表明了样品在制备过程中的生长方向, 并且通过与标准衍射卡片(PDF#15-0863)进行对比可见, 结晶峰的位置与PDF卡片基本吻合, 证明所制备材料确实为硒化铋材料; 另外, 通过拉曼光谱进行测试, 结

果, 如图1(c)所示, 观察到有3个主要的拉曼峰, 分别对应 59 cm^{-1} 处的 A_{1g}^1 振动模式峰、 116 cm^{-1} 处的 E_g^2 振动模式峰、 137 cm^{-1} 处的 A_{1g}^2 振动模式峰, A_{1g}^1 、 A_{1g}^2 峰属于平面外振动模式, E_g^2 属于平面内振动模式, 通过峰位位置与振动模式进行分析比较, 发现其属于典型的硒化铋晶体^[29-30]; 此外, 还通过原子力显微镜(AFM)对硒化铋纳米片的厚度进行测试, 发现其厚度大约为16 nm, 如图1(d)(彩图见期刊电子版)所示; 最后, 通过分光计对样品进行测试, 如图1(e)所示, 观察到该样品对1300~1800 nm光波段范围内的大致吸收趋势。

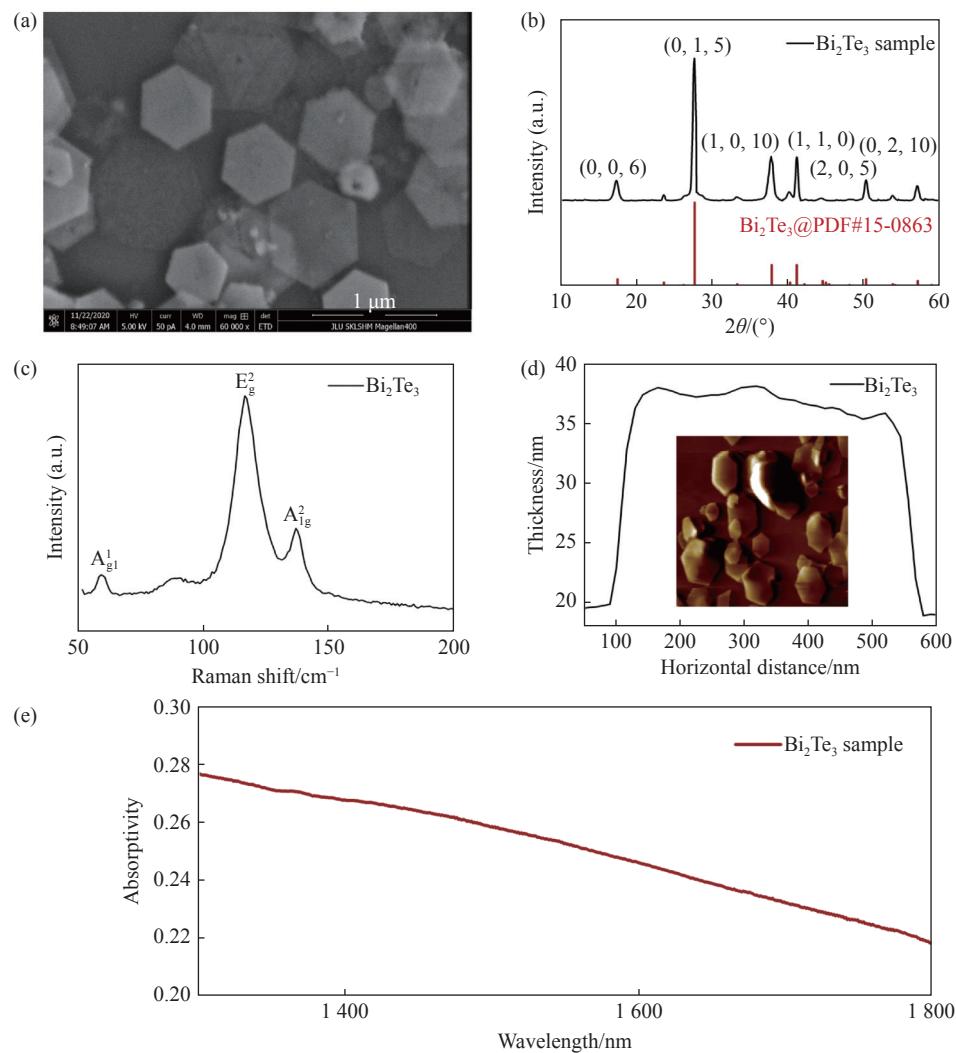


图1 (a) 硒化铋样品扫描电镜(SEM)图;(b) 硒化铋粉末X射线衍射图谱;(c) 硒化铋样品拉曼光谱;(d) 硒化铋样品原子力显微镜图;(e) 硒化铋样品光学线性吸收图

Fig. 1 (a) Scanning Electron Microscope (SEM) image of bismuth telluride sample; (b) X-ray diffraction pattern of bismuth telluride powder; (c) Raman spectrum of bismuth telluride sample; (d) atomic force microscope image of bismuth telluride sample; (e) optical linear absorption of bismuth telluride sample

2.2 可饱和吸收体的制备

侧面抛磨光纤(D型光纤)的抛磨长度为10 mm, 抛磨区域距离纤芯的距离为1 μm, 如图2(a)(彩图见期刊电子版)所示。可饱和吸收体(SA)的制备方式采用激光沉积法, 具体操作步骤如下:首先, 将980 nm半导体泵浦源、D型光纤、功率计依次连接, 如图2(b)(彩图见期刊电子版)所示;接着, 打开泵浦并将功率设定为40 mW, 将制备完成的碲化铋溶液稀释为0.2 mg/ml并滴附在D型光纤的抛磨区域, 待光通过纤芯时,会在纤芯与包层之间产生全反射,纤芯与抛磨区间过薄的距离会引发倏逝场,产生很强的光梯度力,对纳米片材料产生强吸附作用,使其沉积在抛磨区域内,具体原理图如2(c)(彩图见期刊电子版)所示;最后,功率计的作用是为了判断材料的沉积状况,沉积过程一般为5 min。沉积之

前,功率计的示数为33 mW,这是因为D型光纤自身具有一定的损耗。在沉积过程中,可以发现功率示数呈逐渐下降的趋势,当下降到泵浦功率的一半时,约为20 mW,关闭泵浦源,待溶液蒸发后,重新打开功率计,此时的功率示数为20.37 mW,表明材料已经沉积在抛磨区域内,并通过计算得出该器件的损耗为2.93 dB。图2(d)、(e)(彩图见期刊电子版)分别为通过金相显微镜对D型光纤抛磨区域沉积前后的观测图。为了更加清晰地观测到非线性可饱和吸收材料的微观尺寸,图2(f)(彩图见期刊电子版)通过电子显微镜(SEM)表征了D型光纤抛磨区域内沉积材料的形貌图,从中可以观测到材料的六边形纳米片外观形貌。其中六边形纳米片元素分布图如图2(g)所示,可以观测到,材料中含有Bi、Te元素,说明该沉积材料确实为拓扑绝缘体Bi₂Te₃。

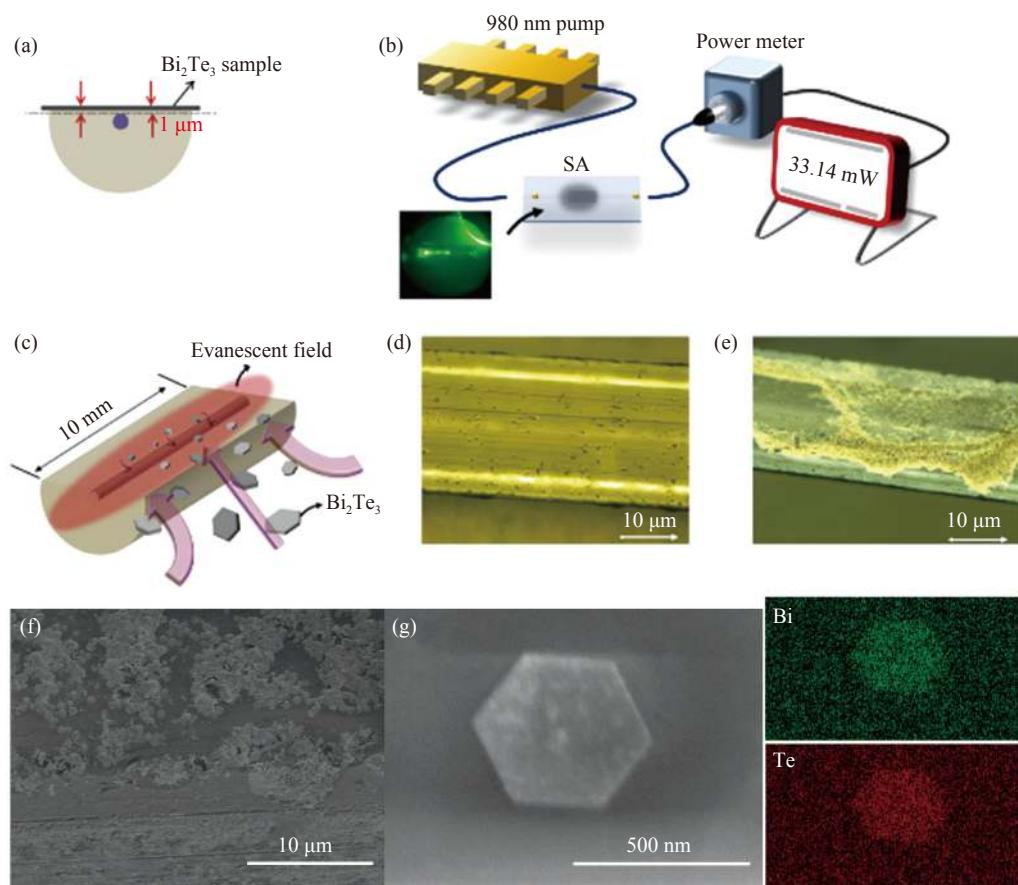


图2 (a) D型光纤结构图;(b) 激光沉积装置图;(c) 激光沉积原理图;(d) D型光纤沉积前金相显微照片;(e) D型光纤沉积后金相显微照片;(f) D型光纤电子显微镜表征图;(g) D型光纤抛磨区域内材料元素分布图

Fig. 2 (a) D-shaped optical fiber structure; schematic diagram of (b) laser deposition device and (c) laser deposition principal; metallographic microscope image of D-shaped optical fiber (d) before deposition and (e) after deposition; (f) SEM image of D-shaped fiber; (g) mapping image of elements distribution in polishing area of D-shaped fiber

3 可饱和吸收体的光学特性

图3(a)展示了一套双臂平衡探测装置,用来测试该可饱和吸收器件的非线性吸收特性。该装置的激光源为自制的被动锁模掺铒飞秒激光光源(中心波长为1565 nm,重复频率为22 MHz,脉冲宽度为680 fs),外接一个掺铒的半导体泵浦激光

器对功率进行放大调谐,一个50:50输出耦合器将光路分成两路,一路作为参考光束由功率计1进行记录,另一路通过可饱和吸收器件由功率计2进行记录。通过逐渐增加整个装置的入射功率,并对两个功率计的测量示数进行比较,可以计算出可饱和吸收器件的非线性透射率变化曲线。利用公式(1)可以拟合出该可饱和吸收体的非线性透射曲线。

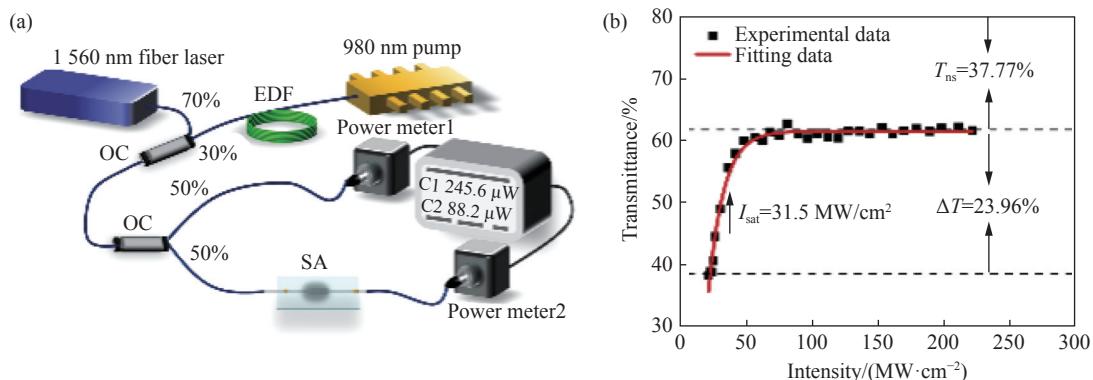


图3 (a) 双臂平衡探测装置示意图; (b) 调制深度曲线图

Fig. 3 (a) Schematic diagram of dual-arm balance detection device; (b) modulation depth curve

$$T = 1 - \Delta T \cdot e^{-\frac{I}{I_{\text{sat}}}} - T_{\text{ns}}, \quad (1)$$

式中, T 为透射率, ΔT 为调制深度, I 为入射强度, I_{sat} 为饱和强度, T_{ns} 为非饱和损耗。如图3(b)所示, SA 的饱和强度为 31.5 MW/cm^2 , 调制深度为 23.96% , 非饱和损耗为 37.77% 。

4 实验装置

基于硼化铋-D型光纤可饱和吸收体的被动锁模光纤激光器实验装置如图4所示。泵浦光源是中心波长为980 nm的半导体激光器。波分复用器(WDM)为980/1550 nm,将泵浦光耦合到光纤环形腔内。采用0.3 m高掺铒光纤(型号为nLIGHT-Er80-8-125)作为增益介质,群速度色散(GVD)参数为 $22 \text{ ps}^2 \text{ km}^{-1}$,单模光纤的GVD为 $-23 \text{ ps}^2 \text{ km}^{-1}$ 。采用偏振无关隔离器(PI-ISO)保证激光的单向传输。硼化铋基沉积的D型光纤作为整个腔内的可饱和吸收器件实现腔内的锁模运作。输出耦合器为90:10,其中90%用于腔内循环,10%连接光谱仪、示波器与自相关仪对脉冲输出进行监测。为了便于谐波锁模的产生,通过

将腔长减小到4 m以进一步降低腔内的色散值。通过计算,整个腔内的净色散值为 -0.0854 ps^2 。

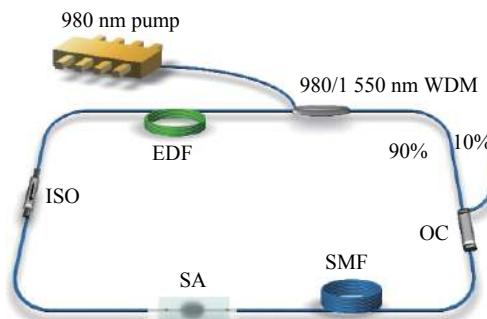


图4 被动谐波锁模光纤激光器实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup of passively harmonic mode-locking fiber laser

5 结果与讨论

为了测试该可饱和吸收体锁模器件的具体表现,将其熔接到掺铒光纤激光器环形腔内。当泵浦功率增加到75 mW时,光谱仪出现明显的具有凯利边带的传统孤子图像,表明该可饱和吸收器件利用倏逝场与材料的相互作用,可以实现稳

定的锁模自启动。锁模光谱如图 5(a) 所示, 其中中心波长为 1555.67 nm, 3 dB 谱宽为 5.44 nm。图 5(b) 为示波器上观测到的一系列排列均匀的脉冲时域图, 表明锁模脉冲运行非常稳定, 其中脉冲间隔为 20.9 ns, 对应腔长为 4.3 m。图 5(c) 为示波器通过傅立叶变换功能所测得的频谱图, 其中信噪比 (SNR) 为 58 dB, 图中的插图为 1 GHz 范围内的频谱图, 脉冲序列较为平整, 进一步说明输出脉冲非常稳定, 锁模质量很好。通过自相关器测量脉冲持续时间为 487 fs, 自相关曲线如图 5(d) 所示, 并采用 sech² 函数对该曲线进行拟合。通过计算得出时间带宽乘积 (TBP) 为 0.328, 表明锁模脉冲存在轻微的啁啾。随着泵浦功率的逐渐增加, 锁模脉冲仍能够稳定运行。当泵浦功

率超过 150 mW 时, 锁模脉冲出现抖动并有分裂的趋势, 这是因为过高的泵浦功率引起了非线性的增加, 导致非线性与色散的平衡被打破, 产生了锁模脉冲的谐波分裂^[31-33]。继续加大泵浦功率, 可以发现脉冲数量呈现整倍的增加, 同时重复频率也依次呈现出倍数增加。当泵浦功率增加到最高 250 mW 时, 观察到了 11 阶的谐波锁模现象, 重复频率为 528 MHz, 但是相应的信噪比有所降低, 为 41.5 dB, 表明锁模质量有所下降。相应的时域图、频域图分别如图 6(a)、6(b) 所示。该锁模脉冲激光器最终输出的平均功率为 4 mW, 通过对比泵浦功率与输出功率的大小, 最终得出该激光器的斜效率为 1.61%, 如图 6(c) 所示。

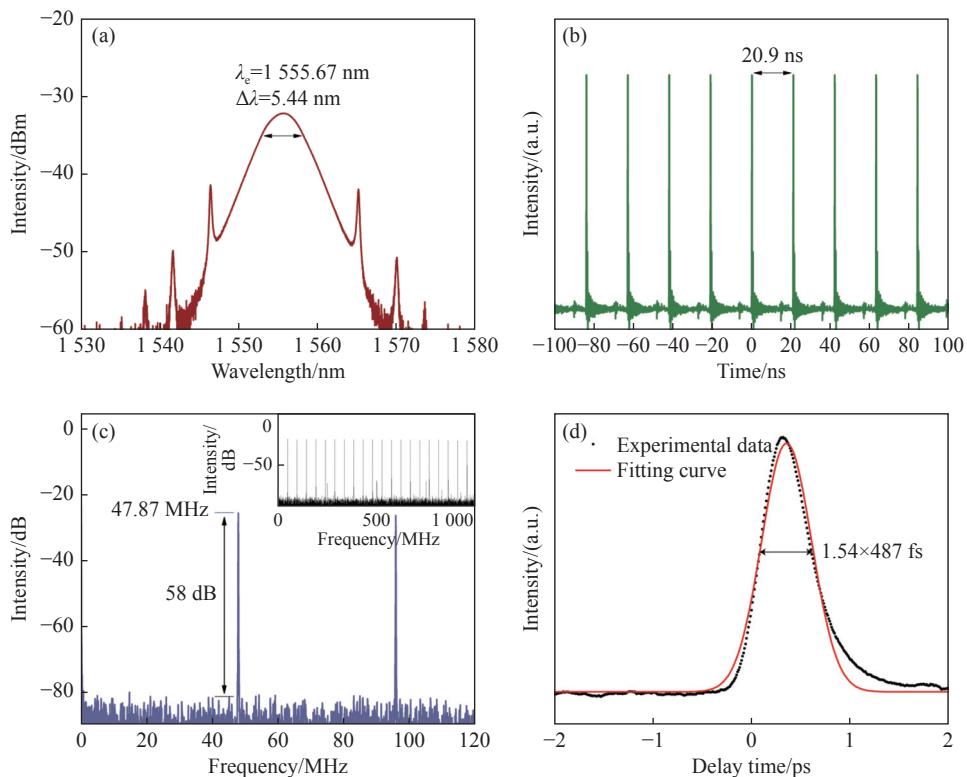


图 5 (a) 自启动锁模光谱图; (b) 锁模时域图; (c) 锁模频域图; (d) 锁模脉冲持续时间图

Fig. 5 (a) Spectrogram of self-starting mode-locking; (b) time-domain diagram of mode-locking; (c) frequency-domain diagram of mode-locking; (d) pulse duration diagram of mode-locking

通过上述实验可知, 当泵浦功率开到最大时, 该可饱和吸收器件仍能够进行锁模操作。由此可以得出基于 D 型光纤结构的材料锁模能够比有机薄膜形式具有更高的抗损伤能力。为了进一步测试该结构的锁模耐久性, 进行了长时间运行测试, 结果如图 6(d) 所示。该项测试在 100 mW 泵

浦功率下, 每隔 6 小时记录 1 次, 一共记录了 5 次, 可以发现其中心波长并无任何明显偏移, 证明其锁模耐久性较好。

为了检测该可饱和吸收体锁模器件在制备过程中的重复一致性, 使用相同的加工参数, 采用该方法制备了 3 个可饱和吸收体器件进行比较, 并

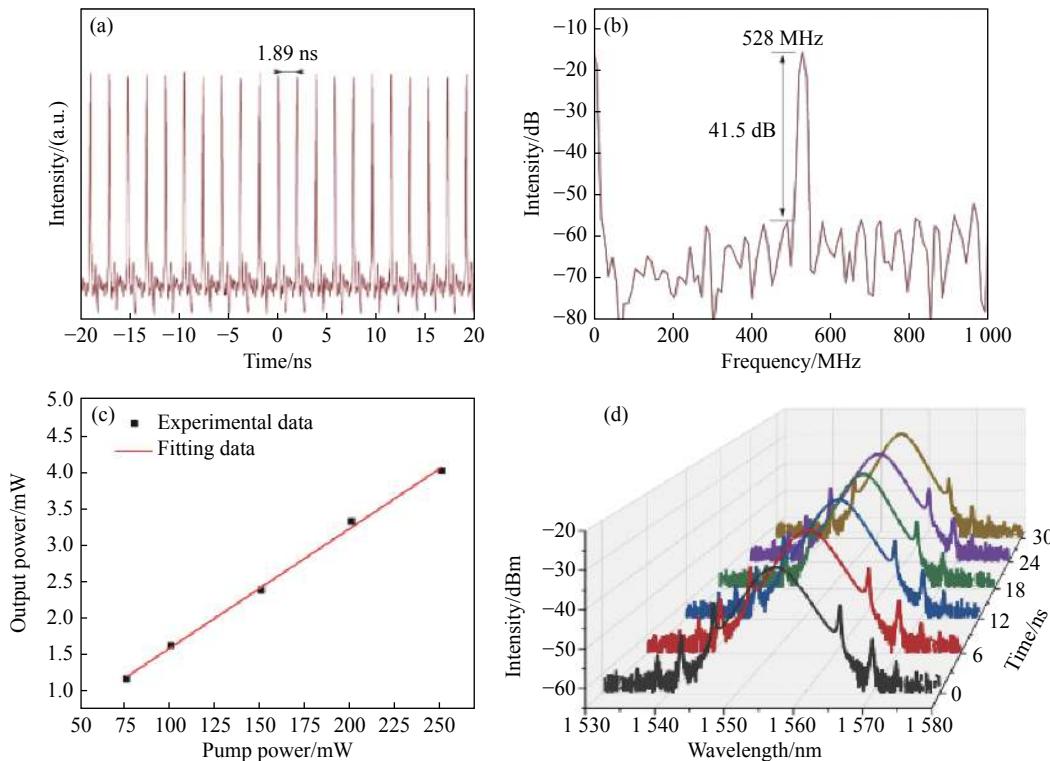


图 6 (a)11 阶谐波锁模运作下的时域图;(b)11 阶谐波锁模运作下的频域图;(c) 泵浦功率与平均输出功率关系图;(d)30 h 长时间锁模运作光谱图

Fig. 6 (a) Time domain diagram under 11th-order harmonic mode-locking operation; (b) frequency domain diagram under 11th-order harmonic mode-locking operation; (c) relationship between pump power and average output power; (d) spectrum of 30 h long-time mode-locking operation

通过对这三者的调制深度以及在掺铒光纤激光器环形腔内的性能表现,以验证制备过程中存在的非线性差异。器件调制深度与在激光器中输出脉冲所对应的参数分别如图 7(a)、7(b)(彩图见期刊电子版)所示。

根据对比发现,3 个器件的调制深度存在较

小的差异,分别为 23.96%、19.89%、22.82%,变化范围为 1.1%~4.1%。对比三者在激光器中的整体输出性能发现,这 3 个器件都能够实现稳定的锁模脉冲输出,并且发现其中两个能够分裂到相同的谐波阶数,达到相近的重复频率。但是 3 个器件的锁模阈值,即自启动功率具有一定的差异。

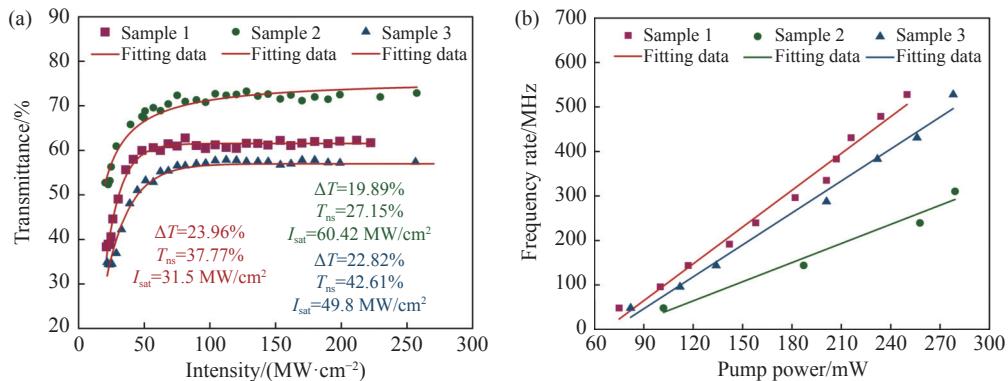


图 7 (a)同一制备参数下 3 个可饱和吸收器件的调制深度对比;(b) 同一制备参数下 3 个可饱和吸收器件在光纤激光器中高重频输出性能比较

Fig. 7 (a) Comparison of modulation depth for three saturated absorbers with same preparation parameters; (b) comparison of high repetition rate output performance of three saturated absorbers in the fiber laser with same preparation parameters

此外,三者的谐波分裂效率同样具有一定差异性。分析造成这些差异的原因是制备过程中材料沉积与分布具有一定的随机性,并不能够实现均匀一致的材料沉积薄膜。但是,该器件制备方式所带来的一致性问题对激光器的整体输出性能而言并无较大的影响,具有一定的现实操作意义。

表 1 总结了基于拓扑绝缘体材料与 D 型光纤、有机薄膜等集成方式制备的可饱和吸收器件自身所具有的非线性光学性能参数,以及应用在 1.5 μm 波段范围内光纤激光器的相关输出性能指

标。通过对比发现,本文相较于其它方式制备的可饱和吸收器件,具有较大的调制深度,具有更好的非线性光学性能,故能够在基本锁模状态下,通过泵浦功率的不断增强以提高腔内的非线性,进一步实现被动谐波锁模,使得锁模脉冲的重复频率不断得以提高。在该可饱和吸收器件的制备过程中,如果能够提高材料在 D 型光纤抛磨区域内沉积的一致均匀性以及减少材料堆积厚度,可以进一步减少材料堆叠过程中产生的热积累所引起的损伤,进一步提高可饱和吸收器件的抗损伤能力以及制备后性能的一致性。

表 1 几种基于拓扑绝缘体材料的可饱和吸收器件用于 1.5 μm 光纤激光器时的非线性及脉冲输出性能的对比
Tab. 1 The nonlinear characteristics and pulse output characteristics of different saturated absorbers based on the topological insulator material used in a 1.5 μm fiber laser

Material type	Integration method	Modulation depth	Saturable intensity/(MW·cm ⁻²)	Pulse energy/pJ	Pulse width/fS	Repetition rate/MHz	Ref
Sb ₂ Te ₃	D-shaped fiber	6.0%	31	29.0	270	34.50	[34]
Sb ₂ Te ₃	D-shaped fiber	3.9%	106	39.6	449	22.13	[35]
Sb ₂ Te ₃	D-shaped fiber	6.0%	31	—	128	22.32	[6]
CoSb ₃	D-shaped fiber	5.0%	16	6.9	833	14.48	[36]
Bi ₂ Te ₃	D-shaped fiber	15.7%	81	52.9	600	15.11	[37]
Bi ₂ Te ₃	polyvinyl alcohol(PVA) thin film	2.0%	180	46.3	1080	8.64	[23]
Bi ₂ Te ₃	D-shaped fiber	23.9%	32	7.6	487	528.00	This work

6 结 论

本文通过将拓扑绝缘体碲化铋材料与 D 型光纤相结合,通过激光沉积法制备了一个抗损伤能力好、耐久性高的可饱和吸收器件,并将其应用于掺铒光纤激光器中,实现了稳定的锁模自启动。随着泵浦功率的增加,过高的非线性

造成了锁模的谐波分裂,分裂阶数最高达到了 11 阶,重复频率高达 528 MHz。该结构也证明能够通过辅助材料在光纤激光器中进一步实现被动谐波锁模以实现更高的脉冲输出重复频率,对材料在高重频超快光纤激光器中的应用具有一定的现实意义。相信在接下来的工作中,可以探索研究出一种更为有效便捷的器件结构,进一步促进材料非线性性能的发挥。

参考文献:

- [1] BAO Q L, ZHANG H, WANG Y, et al.. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(19): 3077-3083.
- [2] MOUCHEL P, SEMAAN G, NIANG A, et al.. High power passively mode-locked fiber laser based on graphene nanocoated optical taper[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(3): 031106.
- [3] 公爽, 田金荣, 李克轩, 等. 新型二维材料在固体激光器中的应用研究进展[J]. *中国光学*, 2018, 11(1): 18-30.
- [4] GONG SH, TIAN J R, LI K X, et al.. Advances in new two-dimensional materials and its application in solid-state lasers[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 18-30. (in Chinese)
- [5] 丁蓉, 常建华, 孔春霞, 等. 基于石墨烯量子点的被动调 Q Nd: YVO₄ 激光器[J]. *发光学报*, 2020, 41(1): 63-70.
- [6] DING R, CHANG J H, KONG CH X, et al.. Passively Q-switched Nd: YVO₄ laser based on graphene quantum dots[J].

- Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(1): 63-70. (in Chinese)
- [5] ZHAO CH 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.
- [6] SOTOR J, SOBON G, ABRAMSKI K M. Sub-130 fs mode-locked Er-doped fiber laser based on topological insulator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13244-13249.
- [7] ZHANG H, LU S B, ZHENG J, et al.. Molybdenum disulfide (MoS_2) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7249-7260.
- [8] LUO ZH Q, LI Y Y, ZHONG M, et al.. Nonlinear optical absorption of few-layer molybdenum diselenide (MoSe_2) for passively mode-locked soliton fiber laser [Invited][J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): A79-A86.
- [9] 孙有生, 端木庆锋, 林鹏, 等. 1.6 μm 波段锁模光纤激光器[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1387-1394.
- SUN Y SH, DUANMU Q D, LIN P, et al.. 1.6 μm band mode-locked fiber laser[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1387-1394. (in Chinese)
- [10] 孙俊杰, 陈飞, 何洋, 等. 新型过渡金属硫化物在超快激光中的应用[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 647-659.
- SUN J J, CHEN F, HE Y, et al.. Application of emerging transition metal dichalcogenides in ultrafast lasers[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 647-659. (in Chinese)
- [11] 付鑫鹏, 付喜宏, 姚聪, 等. 基于超薄层 MoS_2 可饱和吸收体的被动调Q固体Nd: YAG激光器[J]. *发光学报*, 2021, 42(5): 668-673.
- FU X P, FU X H, YAO C, et al.. Passive Q-switched solid-state Nd:YAG laser based on ultrathin MoS_2 saturable absorber[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(5): 668-673. (in Chinese)
- [12] CHEN Y, JIANG G B, CHEN SH Q, et al.. Mechanically exfoliated black phosphorus as a new saturable absorber for both Q-switching and mode-locking laser operation[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 12823-12833.
- [13] JIN X X, HU G H, ZHANG M, et al.. 102 fs pulse generation from a long-term stable, inkjet-printed black phosphorus-mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12506-12513.
- [14] JHON Y I, KOO J, ANASORI B, et al.. Metallic MXene saturable absorber for femtosecond mode-locked lasers[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(40): 1702496.
- [15] JIANG X T, LIU SH X, LIANG W Y, et al.. Broadband nonlinear photonics in few-layer MXene $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ($T = \text{F}, \text{O}$, or OH)[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(2): 1700229.
- [16] ZHANG M Y, CHEN H, YIN J D, et al.. Recent development of saturable absorbers for ultrafast lasers [Invited][J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(8): 081405.
- [17] MA CH Y, WANG C, GAO B, et al.. Recent progress in ultrafast lasers based on 2D materials as a saturable absorber[J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(4): 041304.
- [18] 张明霞, 袁振, 杜晓娟, 等. 被动调Q锁模运转Tm: LuScO₃陶瓷激光器特性[J]. *发光学报*, 2021, 42(7): 1049-1056.
- ZHANG M X, YUAN ZH, DU X J, et al.. Characteristics of passively Q-switched mode locked Tm: LuScO₃ ceramic laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(7): 1049-1056. (in Chinese)
- [19] MOORE J E. The birth of topological insulators[J]. *Nature*, 2010, 464(7286): 194-198.
- [20] ZHANG H J, LIU CH 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.
- [21] DOU ZH Y, SONG Y R, TIAN J R, et al.. Mode-locked ytterbium-doped fiber laser based on topological insulator: Bi_2Se_3 [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24055-24061.
- [22] JUNG M, LEE J, KOO J, et al.. A femtosecond pulse fiber laser at 1935 nm using a bulk-structured Bi_2Te_3 topological insulator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7865-7874.
- [23] MAO D, JIANG B Q, GAN X T, et al.. Soliton fiber laser mode locked with two types of film-based Bi_2Te_3 saturable absorbers[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(2): A43-A46.
- [24] WEI Q, HAN X L, ZHANG H N, et al.. CVD- Bi_2Te_3 as a saturable absorber for various solitons in a mode-locked Er-doped fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(26): 7792-7800.
- [25] YAN P G, LIN R Y, RUAN SH CH, et al.. A practical topological insulator saturable absorber for mode-locked fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8690.
- [26] JIANG T, YIN K, WANG C, et al.. Ultrafast fiber lasers mode-locked by two-dimensional materials: review and prospect[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(1): 78-90.

- [27] WANG F, ZHOU H, LI N, et al.. Mesoporous carbon nanospheres deposited onto D-shaped fibers for femtosecond pulse generation[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(21): 11621-11626.
- [28] LIU M, WEI ZH W, LUO A P, et al.. Recent progress on applications of 2D material-decorated microfiber photonic devices in pulse shaping and all-optical signal processing[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2641-2671.
- [29] CHI C, LEE J, KOO J, et al.. All-normal-dispersion dissipative-soliton fiber laser at 1.06 μm using a bulk-structured Bi_2Te_3 topological insulator-deposited side-polished fiber[J]. *Laser Physics*, 2014, 24(10): 105106.
- [30] YIN K, ZHANG B, LI L, et al.. Soliton mode-locked fiber laser based on topological insulator Bi_2Te_3 nanosheets at 2 μm [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): 72-76.
- [31] WANG Y ZH, LI J F, MO K D, et al.. 14.5 GHz passive harmonic mode-locking in a dispersion compensated Tm-doped fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7779.
- [32] BOGUSLAWSKI J, SOBOŃ G, ZYBAŁA R, et al.. Towards an optimum saturable absorber for the multi-gigahertz harmonic mode locking of fiber lasers[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 1094-1100.
- [33] TAO SH, XU L X, CHEN G L, et al.. Ultra-high repetition rate harmonic mode-locking generated in a dispersion and nonlinearity managed fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(9): 2354-2357.
- [34] SOTOR J, SOBON G, GRODECKI K, et al.. Mode-locked erbium-doped fiber laser based on evanescent field interaction with Sb_2Te_3 topological insulator[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251112.
- [35] BOGUSLAWSKI J, SOTOR J, SOBON G, et al.. Mode-locked Er-doped fiber laser based on liquid phase exfoliated Sb_2Te_3 topological insulator[J]. *Laser Physics*, 2014, 24(10): 105111.
- [36] LEE J, KIM Y, LEE K, et al.. Femtosecond mode-locking of a fiber laser using a CoSb_3 -skutterudite-based saturable absorber[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(10): C36-C43.
- [37] LEE J, KOO J, JHON Y M, et al.. A femtosecond pulse erbium fiber laser incorporating a saturable absorber based on bulk-structured Bi_2Te_3 topological insulator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 6165-6173.

作者简介：

张世达(1992—),男,吉林长春人,硕士,工程师,2018年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光电器件与光电仪器方面的研究。E-mail: zhangshida_jlu@163.com



耿乙迦(1991—),男,吉林长春人,博士,工程师,2020年于吉林大学获得博士学位,主要从事激光光谱技术及相关科学仪器研发工作。E-mail: gengyijia_jlu@163.com