

专题: 低维材料非线性光学与器件

基于铋纳米片可饱和吸收被动调 Q 中红外单晶光纤激光器*

郝倩倩¹⁾²⁾# 宗梦雨¹⁾²⁾# 张振³⁾ 黄浩⁴⁾ 张峰⁴⁾
刘杰¹⁾²⁾† 刘丹华¹⁾²⁾‡ 苏良碧³⁾ 张晗⁴⁾

1) (山东师范大学物理与电子科学学院, 山东省光场调控中心, 山东省光学与光子器件重点实验室, 济南 250358)

2) (山东师范大学, 光场调控与应用协同创新中心, 济南 250358)

3) (中国科学院上海硅酸盐研究所人工晶体研究中心, 中国科学院透明光功能无机材料重点实验室, 上海 201899)

4) (深圳大学物理与光电工程学院, 深圳 518060)

(2020年3月5日收到; 2020年3月14日收到修改稿)

铋纳米片作为一种新型二维材料, 具有合适的带隙、较高的载流子迁移率和较好的室温稳定性, 加上优异的电学和光学特性, 是实现中红外脉冲激光的有效调制器件. 中红外单晶光纤兼备晶体和光纤的优势, 是实现高功率激光的首选增益介质. 本文采用超声波法成功制备了铋纳米片可饱和吸收体, 并首次将其用于二极管抽运 Er:CaF₂ 单晶光纤中红外被动调 Q 脉冲激光器中. 在吸收抽运功率为 1.52 W 时, 获得平均输出功率为 190 mW 的脉冲激光, 最窄脉冲宽度为 607 ns, 重复频率为 58.51 kHz, 对应的单脉冲能量和峰值功率分别为 3.25 μ J 和 5.35 W. 结果表明, 使用铋纳米片作为可饱和吸收体, 是实现结构紧凑的小型中红外单晶光纤脉冲激光的有效技术途径.

关键词: 被动调 Q 激光, 中红外激光, 铋纳米片, Er:CaF₂ 单晶光纤

PACS: 42.55.-f, 42.55.Rz, 42.55.Xi, 42.60.Gd

DOI: 10.7498/aps.69.20200337

1 引言

中红外脉冲激光在生物医学、环境监测、空间探测和非线性光谱学等领域有着广泛应用, 是当前激光研究领域的热点^[1,2]. 在中红外波段, Tm³⁺, Ho³⁺和 Er³⁺是产生 2—5 μ m 波段激光的常见稀土离子^[3,4]. Er³⁺能级结构丰富, 在 ⁴I_{11/2} 和 ⁴I_{13/2} 态之间跃迁产生的辐射波长位于 2.7—3 μ m 范围内^[5]. 半导体激光器直接抽运的掺铒全固态激光器具有成本低、结构紧凑等优点^[6], 在中红外波段颇具竞

争力. 单晶光纤作为一种新型激光材料具有热导率高、非线性效应小、掺杂浓度高等优势, 加上体积小、重量轻、抽运导向好等优点而受到广泛关注^[7,8], 上述优点使得单晶光纤产生激光的性能优于对应的块状晶体. 另外, 单晶光纤是介于块状单晶和玻璃光纤之间的中间材料. 与玻璃光纤相比, 单晶光纤具有较低的受激布里渊散射截面和较高的热导率, 另外利用单晶光纤缩短激光谐振腔长度可以增大激光腔模, 这意味着单晶光纤激光器可以获得更高的功率^[9,10]. 基于这些优点, Er 掺杂单晶光纤是一种很有前途的中红外激光材料. 2019年, 使用温

* 国家自然科学基金(批准号: 11974220, 61635012, 61675135)资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: jieliu@sdu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: liudanhua@sdu.edu.cn

度梯度技术生长的 Er:SrF₂ 单晶光纤实现了连续激光运转, 输出激光最大功率为 860 mW, 对应的斜率效率为 34.9%^[11]. 据我们所知, 目前还没有基于 Er 掺杂单晶光纤的脉冲激光报道.

调 *Q* 技术是获得脉冲激光的重要技术手段. 与主动调 *Q* 相比, 被动调 *Q* 具有结构简单、结构紧凑、价格低廉、性能可靠等优点. 近年来, 石墨烯^[12–15]、过渡金属硫化物^[16–19]、黑磷^[20–23]、拓扑绝缘体^[24,25] 等二维材料以其恢复时间快、调制深度可控、制作方便、吸收带宽宽等特点, 在非线性光学领域引起了广泛关注^[26–28]. 随着二维材料生长制备技术的不断发展, 二维材料作为可饱和吸收体被越来越多地应用到被动调 *Q* 激光器中^[29–31]. 铋纳米片 (bismuth nanosheets: Bi-NSs) 作为一种新型的二维材料具有独特的光电特性, 加上合适的带隙、较高的载流子迁移率、较高的损伤阈值和良好的稳定性, 使 Bi-NSs 可作为性能优越的可饱和吸收体^[32]. 2018 年 Lu 等^[33] 在 1559 nm 光纤激光器中首次证明了 Bi-NSs 的饱和吸收特性. 近期本课题组又利用 Bi-NSs 作为可饱和吸收体, 在固体激光器中实现了被动调 *Q* 脉冲激光运转^[32,34,35]. 但据我们所知, 目前 Bi-NSs 在中红外单晶光纤激光器中的应用还未见报道.

本文首次将 Bi-NSs 作为可饱和吸收体用于单晶光纤激光器中, 成功实现了二极管抽运 Er:CaF₂ 单晶光纤的中红外脉冲激光输出. 在 2.8 μm 波长附近, 获得了稳定的被动调 *Q* 脉冲激光运转, 最窄脉冲宽度为 607 ns, 最高重复频率为 58.51 kHz, 对应的单脉冲能量和峰值功率分别为 3.25 μJ 和 5.35 W.

2 实验设计与装置

如图 1 所示, 设计了结构紧凑的凹平直线谐振腔, 开展了 Bi-NSs 作为可饱和吸收体的 Er:CaF₂ 单晶光纤被动调 *Q* 脉冲激光特性研究. 抽运源是光纤耦合的半导体激光器, 光纤芯径 105 μm, 数值孔径为 0.22, 其中心发射波长为 976 nm. 抽运光通过一个耦合比为 1:2 的耦合准直系统后聚焦到增益介质前端. 增益介质是采用温度梯度法^[36] 生长的 4 at.% Er:CaF₂ 单晶光纤, 其两端抛光但未镀膜, 直径为 1.9 mm, 长度为 10 mm. 为减少热效应, 单晶光纤用铝箔紧密包裹后安装在恒温设定 12 °C 的铜块上. 输入镜为曲率 100 mm 的平凹透镜, 镀有 974 nm 抗反膜和 2.9 μm 高反膜. 输出镜

为不同透过率的平镜, 对 2.7–2.95 μm 波段激光的透过率分别为 1%, 3% 和 5%. 腔长 26 mm. 可饱和吸收体 Bi-NSs 的制备方法和形貌特征在我们之前的工作中做了详细的介绍^[34]. 以实验室自主搭建的 2.8 μm 纳秒激光 (50 kHz, 50 ns) 为光源, 采用开孔 Z 扫描方法研究了 Bi-NSs 可饱和吸收体的非线性光学特性. 测得 Bi-NSs 在 2.8 μm 附近的调制深度和饱和通量分别为 1.82% 和 3.59 kW/cm²^[34].

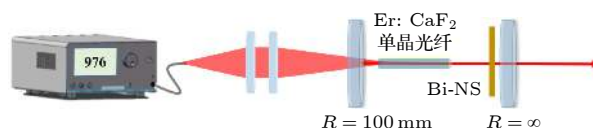


图 1 Er:CaF₂ 单晶光纤连续激光和 Bi-NSs 被动调 *Q* 激光装置图

Fig. 1. Schematic of Er:CaF₂ single-crystal fiber continuous laser and Bi-NSs passively *Q*-switched laser.

3 实验结果与讨论

3.1 中红外单晶光纤的连续激光特性

首先研究了 Er:CaF₂ 单晶光纤的连续激光特性. Er:CaF₂ 单晶光纤对 976 nm 抽运光的吸收率为 77.3%. 激光输出功率随吸收抽运功率的变化如图 2 所示. 输出镜的透过率分别选用 $T = 1%$, $T = 3%$ 和 $T = 5%$ 时, 对应的吸收抽运阈值功率分别为 0.12 W, 0.18 W 和 0.34 W. 当选用 $T = 3%$ 的输出镜, 吸收抽运功率约为 3.1 W 时, 获得 Er:CaF₂ 单晶光纤的最大输出激光功率为 0.94 W, 激光斜率效率为 32.0%. 连续激光的光谱如图 3 所示, 使用 1%, 3% 和 5% 透过率的输出镜, 获得的激光波长分别为 2797.38 nm, 2751.65 nm 和 2758.90 nm.

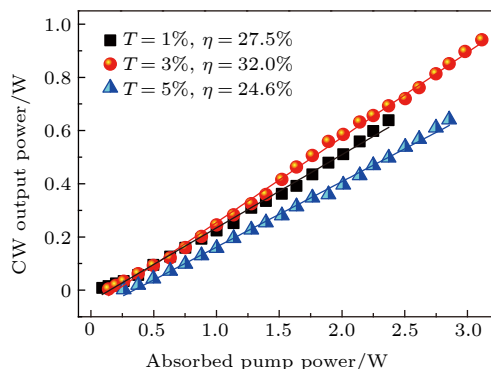


图 2 连续激光输出功率随吸收抽运功率的变化

Fig. 2. Continuous-wave (CW) output power versus the absorbed pump power.

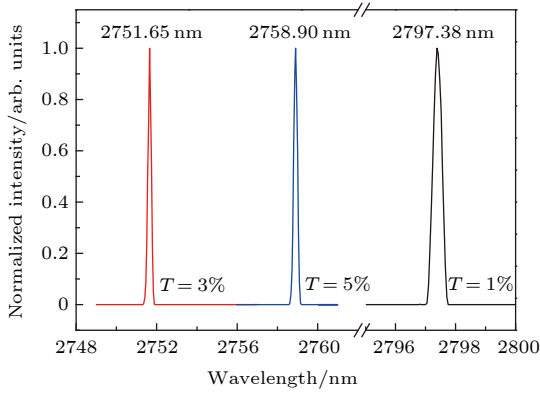


图 3 Er:CaF₂ 单晶光纤连续激光光谱

Fig. 3. Spectra of Er:CaF₂ single-crystal fiber continuous laser.

3.2 Bi-NSs 可饱和吸收被动调 Q 中红外激光特性

将 Bi-NSs 作为可饱和吸收体插入谐振腔中, 距离输出耦合镜约 2 mm 处, 仔细微调吸收体的位置和角度获得被动调 Q 中红外脉冲激光输出. 当吸收抽运功率达到约 0.5 W 时, 调 Q 激光的脉冲重复频率稳定、脉冲序列均匀. 在采用不同透过率的输出镜下, 平均输出功率随吸收抽运功率的变化如图 4 所示. 使用 3% 透过率的输出镜, 在吸收抽

运功率 1.52 W 时获得调 Q 激光最大平均输出功率为 190 mW, 对应的斜效率为 14.8%. 通过优化制冷系统和镜面镀膜工艺, 有望获得更高的输出功率和激光斜效率.

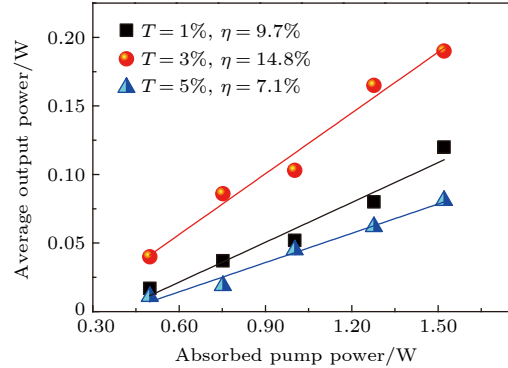


图 4 调 Q 激光平均输出功率随吸收抽运功率的变化

Fig. 4. Q-switched output power versus the absorbed pump power.

图 5(a)–(d) 详细描述了在不同透过率的输出镜下, 调 Q 脉冲激光的脉冲宽度、重复频率、单脉冲能量、峰值功率随吸收抽运功率的变化. 脉冲宽度随着抽运功率的增大逐渐减小, 重复频率、单脉冲能量和峰值功率随着抽运功率的增大不断增

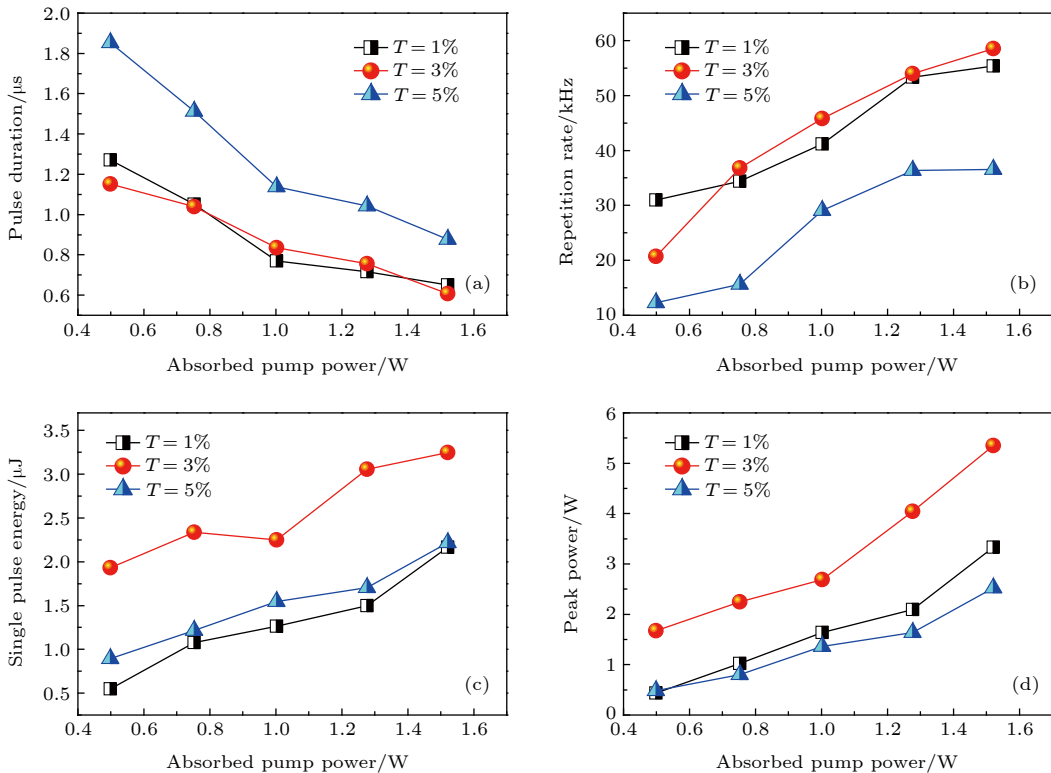


图 5 Er:CaF₂ 单晶光纤 Bi-NSs 被动调 Q 激光 (a) 脉冲宽度、(b) 重复频率、(c) 单脉冲能量、(d) 峰值功率随吸收抽运光的变化

Fig. 5. (a) Pulse duration, (b) repetition rate, (c) single pulse energy, and (d) peak power versus the absorbed pump power.

大. 在三种输出镜透过率下, 吸收抽运功率 1.52 W 时获得的最大输出功率、最窄脉冲宽度、最高重复频率、最大单脉冲能量以及最高峰值功率如表 1 所列. 根据所得实验数据可知, 在相同的实验条件下, 输出镜的最佳透过率为 3%.

表 1 吸收抽运功率 1.52 W 时, 不同透过率下的调 Q 激光特性

Table 1. Q-switched laser characteristics at the absorption pump power of 1.52 W.

透过率	最大输出功率/mW	脉冲宽度/ns	重复频率/kHz	单脉冲能量/ μ J	峰值功率/W
1%	120	650	55.36	2.16	3.33
3%	190	607	58.51	3.25	5.35
5%	81	878	36.54	2.22	2.53

使用透过率为 3% 的输出镜, 在平均输出功率最大时用示波器 (Tektronix DPO4104, 1 GHz 带宽) 记录的不同时间尺度下的调 Q 脉冲序列如图 6 所示. 吸收抽运功率为 1.52 W 时, 在 1 ms/div 刻度下记录重复率为 58.51 kHz, 脉冲宽度为 607 ns, 与 2 μ s/div 刻度下记录的单脉冲时间分布图相吻合.

表 2 总结了 Er 掺杂氟化物晶体作为增益介质的调 Q 脉冲激光与本文工作的比较. 可以看出,

表 2 掺钕氟化物中红外被动调 Q 激光特性比较

Table 2. Comparison of Er-doped mid-infrared passively Q-switched laser.

增益介质	吸收体	脉冲宽度/ns	最大输出功率/mW	重复频率/kHz	文献
Er:CaF ₂ 晶体	Graphene	1324	172	62.7	[37]
Er:CaF ₂ 晶体	Black phosphorus	954.8	178	41.93	[22]
Er:CaF ₂ -SrF ₂ 晶体	Ti ₃ C ₂ T _x	814	286	45.3	[29]
Er:SrF ₂ 晶体	Bi-NSs	980	226	56.20	[34]
Er:CaF ₂ 单晶光纤	Bi-NSs	607	190	58.51	本文工作

4 结论

本文报道了 Bi-NSs 作为可饱和吸收体的二极管抽运 Er:CaF₂ 单晶光纤中红外被动调 Q 脉冲激光器. 采用温度梯度法生长的 Er:CaF₂ 单晶光纤作为增益介质, 实现近瓦级中红外连续激光输出. 将超声波法制备的 Bi-NSs 作为可饱和吸收体用于 Er:CaF₂ 单晶光纤中红外调 Q 脉冲激光器中. 在吸收抽运功率为 1.52 W 时, 获得平均输出功率为 190 mW 的被动调 Q 激光输出, 最窄脉冲宽度为 607 ns, 重复频率为 58.51 kHz, 对应的单脉冲能量

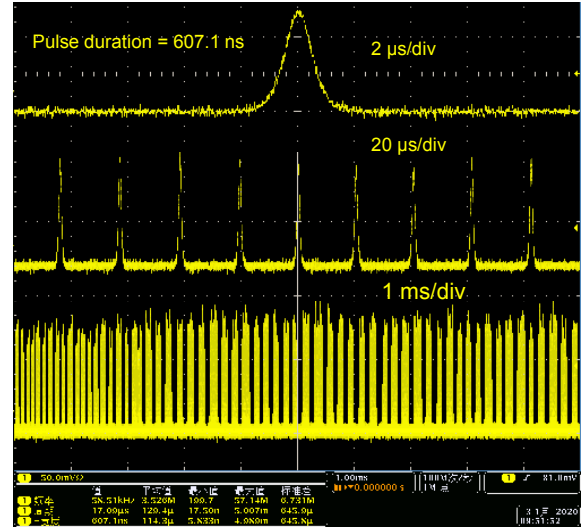


图 6 Er:CaF₂ 单晶光纤 Bi-NSs 被动调 Q 激光脉冲序列
Fig. 6. Bi-NSs Q-switched pulse trains of Er:CaF₂ single-crystal fiber laser.

Bi-NSs 作为可饱和吸收体与 Er:CaF₂ 单晶光纤作为增益介质相结合的调 Q 脉冲激光器, 可以获得更短的脉冲宽度、较高的输出功率和重复频率. 随着单晶光纤材料生长和 Bi-NSs 制备技术的发展, 相信进一步优化的中红外单晶光纤脉冲激光器将获得更加优异的性能参数.

和峰值功率分别为 3.25 μ J 和 5.35 W. 结果表明, Er:CaF₂ 单晶光纤具有优异的中红外激光性能, 同时 Bi-NSs 是一种很有前途的中红外脉冲激光调制材料, 在超快光子学领域有很大的应用潜力.

参考文献

- [1] Uehara H, Tokita S, Kawanaka J, Konishi D, Murakami M, Yasuhara R 2019 *App. Phys. Express* **12** 022002
- [2] Sun Y, Tu C, You Z, Liao J, Wang Y, Xu J 2018 *Opt. Mater. Express* **8** 165
- [3] Yang Y, Nie H, Zhang B, Yang K, Zhang P, Sun X, Yan B, Li G, Wang Y, Liu J, Shi B, Wang R, Hang Y, He J 2018 *App. Phys. Express* **11** 112704

- [4] Yan Z, Li T, Zhao S, Yang K, Li D, Li G, Zhang S, Gao Z 2018 *Opt. Laser Technol.* **100** 261
- [5] Guan X, Wang J, Zhang Y, Xu B, Luo Z, Xu H, Cai Z, Xu X, Zhang J, Xu J 2018 *Photonics Res.* **6** 830
- [6] Fan M, Li T, Zhao S, Li G, Ma H, Gao X, Kränkel C, Huber G 2016 *Opt. Lett.* **41** 540
- [7] Burrus C A, Stone J 1975 *Appl. Phys. Lett.* **26** 318
- [8] de Camargo A S S, Andreetta M R B, Hernandez A C, Nunes L A O 2006 *Opt. Mater.* **28** 551
- [9] Markovic V, Rohrbacher A, Hofmann P, Pallmann W, Pierrot S, Resan B 2015 *Opt. Express* **23** 25883
- [10] Li Y, Miller K, Johnson E G, Nie C D, Bera S, Harrington J A, Shori R 2016 *Opt. Express* **24** 9751
- [11] Wang S, Tang F, Liu J, Qian X, Wu Q, Wu A, Liu J, Mei B, Su L 2019 *Opt. Mater.* **95** 109255
- [12] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [13] Sun Z, Martinez A, Wang F 2016 *Nat. Photonics* **10** 227
- [14] Wang J, Mu X, Sun M, Mu T 2019 *Appl. Mater. Today* **16** 1
- [15] Sun R, Chen C, Ling W J, Zhang Y N, Kang C P, Xu Q 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 104207 (in Chinese) [孙锐, 陈晨, 令维军, 张亚妮, 康翠萍, 许强 2019 物理学报 **68** 104207]
- [16] Sun X, Zhang B, Li Y, Luo X, Li G, Chen Y, Zhang C, He J 2018 *ACS Nano* **12** 11376
- [17] Zhang Y, Yu H, Zhang R, Zhao G, Zhang H, Chen Y, Mei L, Tonelli M, Wang J 2017 *Opt. Lett.* **42** 547
- [18] Yan B, Zhang B, Nie H, Li G, Sun X, Wang Y, Liu J, Shi B, Liu S, He J 2018 *Nanoscale* **10** 20171
- [19] Hu Q, Zhang X, Liu Z, Li P, Li M, Cong Z, Qin Z, Chen X 2019 *Opt. Laser Technol.* **119** 105639
- [20] Zhang M, Wu Q, Zhang F, Chen L, Jin X, Hu Y, Zheng Z, Zhang H 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1800224
- [21] Xu Y, Shi Z, Shi X, Zhang K, Zhang H 2019 *Nanoscale* **11** 14491
- [22] Li C, Liu J, Guo Z, Zhang H, Ma W, Wang J, Xu X, Su L 2018 *Opt. Commun.* **406** 158
- [23] Liu J, Liu J, Guo Z, Zhang H, Ma W, Wang J, Su L 2016 *Opt. Express* **24** 30289
- [24] Liu X, Yang K, Zhao S, Li T, Qiao W, Zhang H, Zhang B, He J, Bian J, Zheng L, Su L, Xu J 2017 *Photonics Res.* **5** 461
- [25] Wang Y, Sung W, Su X, Zhao Y, Zhang B, Wu C, He G, Lin Y, Liu H, He J, Lee C 2018 *IEEE Photonics J.* **10** 1504110
- [26] Wang C, Liu J, Zhang H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 188101 (in Chinese) [王聪, 刘杰, 张晗 2019 物理学报 **68** 188101]
- [27] Li Z, Li R, Pang C, Dong N, Wang J, Yu H, Chen F 2019 *Opt. Express* **27** 8727
- [28] Liu W, Liu M, Chen X, Shen T, Lei M, Guo J, Deng H, Zhang W, Dai C, Zhang X, Wei Z 2020 *Commun. Phys.* **3** 15
- [29] Hao Q, Liu J, Zhang Z, Zhang B, Zhang F, Yang J, Liu J, Su L, Zhang H 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 085506
- [30] Nie H, Zhang P, Zhang B, Yang K, Zhang L, Li T, Zhang S, Xu J, Hang Y, He J 2017 *Opt. Lett.* **42** 699
- [31] Yang Q, Zhang F, Zhang N, Zhang H 2019 *Opt. Mater. Express* **9** 1795
- [32] Feng X, Lin Y, Yu X, Wu Q, Huang H, Zhang F, Ning T, Liu J, Su L, Zhang H 2019 *Appl. Opt.* **58** 6545
- [33] Lu L, Liang Z, Wu L, Chen Y, Song Y, Dhanabalan S C, Ponraj J S, Dong B, Xiang Y, Xing F, Fan D, Zhang H 2018 *Laser Photon. Rev.* **12** 1870012
- [34] Liu J, Huang H, Zhang F, Zhang Z, Liu J, Zhang H, Su L 2018 *Photonics Res.* **6** 762
- [35] Feng X, Hao Q, Lin Y, Yu X, Wu Q, Huang H, Zhang F, Liu J, Su L, Zhang H 2020 *Opt. Laser Technol.* **127** 106152
- [36] Wang Y, Wang S, Wang J, Zhang Z, Zhang Z, Liu R, Zu Y, Liu J, Su L 2020 *Opt. Express* **28** 6684
- [37] Li C, Liu J, Jiang S, Xu S, Ma W, Wang J, Xu X, Su L 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 1570

SPECIAL TOPIC—Nonlinear optics and devices of low-dimensional materials

Bismuth nanosheets based saturable-absorption passively Q -switching mid-infrared single-crystal fiber laser*Hao Qian-Qian^{1)2)#} Zong Meng-Yu^{1)2)#} Zhang Zhen³⁾ Huang Hao⁴⁾
Zhang Feng⁴⁾ Liu Jie^{1)2)†} Liu Dan-Hua^{1)‡} Su Liang-Bi³⁾ Zhang Han⁴⁾1) (*Shandong Provincial Engineering and Technical Center of Light Manipulations, Shandong Provincial Key Laboratory of Optics and Photonic Device, School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250358, China*)2) (*Collaborative Innovation Center of Light Manipulations and Applications, Shandong Normal University, Jinan 250358, China*)3) (*CAS Key Laboratory of Transparent and Opto-Functional Inorganic Materials, Synthetic Single Crystal Research Center, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China*)4) (*College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

(Received 5 March 2020; revised manuscript received 14 March 2020)

Abstract

As a new two-dimensional material, bismuth nanosheet is an effective modulator for realizing a mid-infrared pulsed laser, which benefits from its suitable band gap, higher carrier mobility and better room temperature stability, as well as its excellent electrical and optical properties. The mid-infrared single-crystal fiber is a preferable gain medium for high-power laser because of its advantages of both crystal and fiber. In this paper, a bismuth nanosheet saturable absorber is successfully prepared by the ultrasonic method and used for the first time in a diode-pumped Er:CaF₂ single-crystal fiber mid-infrared passively Q -switching pulsed laser. A compact concave planar linear resonator is designed to study the Q -switching Er:CaF₂ single-crystal fiber laser with bismuth nanosheets serving as saturable absorbers. The pump source is a fiber-coupled semiconductor laser with a core diameter of 105 μm , a numerical aperture of 0.22, and a central emission wavelength of 976 nm. The pump light is focused onto the front end of the gain medium through a coupled collimating system with a coupling ratio of 1:2. The gain medium is a 4 at.% Er³⁺:CaF₂ single-crystal fiber grown by the temperature gradient method, and this fiber has two polished but not coated ends, a diameter of 1.9 mm, and a length of 10 mm. To reduce the thermal effect, the single-crystal fiber is tightly wrapped with indium foil and mounted on a copper block with a constant temperature of 12 $^{\circ}\text{C}$. The input mirror has a high reflection coating at 2.7–2.95 μm and an antireflection coating at 974 nm, with a curvature radius of 100 mm. A group of partially transmitting plane mirrors are used as output couplers, respectively, with transmittances of 1%, 3%, and 5% at 2.7–2.95 μm . The total length of the resonant cavity is 26 mm. By inserting the bismuth nanosheet into the resonator and carefully adjusting its position and angle, a stable mid-infrared Q -switching laser is obtained. At the absorbed pump power of 1.52 W, a pulsed laser with an average output power of 190 mW is obtained for an output mirror with a transmittance of 3%. The shortest pulse width is 607 ns, the repetition frequency is 58.51 kHz, and the corresponding single pulse energy and peak power are 3.25 μJ and 5.35 W, respectively.

Keywords: passively Q -switching laser, mid-infrared laser, bismuth nanosheets, single-crystal fiber**PACS:** 42.55.-f, 42.55.Rz, 42.55.Xi, 42.60.Gd**DOI:** 10.7498/aps.69.20200337

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11974220, 61635012, 61675135).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: jieliu@sdu.edu.cn‡ Corresponding author. E-mail: liudanhua@sdu.edu.cn