

焦耳级大能量中红外固体 Fe:ZnSe 激光器

徐飞^{1,2}, 潘其坤^{1*}, 张玥汝^{1,2}, 陈毅¹, 于德洋¹, 张阔¹, 张冉冉¹, 孙俊杰¹, 陈飞¹¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家实验室, 吉林 长春 130033;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为实现焦耳级大能量中红外 4~5 μm 波段激光输出, 基于波长为 2.94 μm 的 Er:YAG 激光泵浦源和液氮恒温控制器, 搭建了固体 Fe:ZnSe 激光器实验装置, 研究了温度和晶体参数对 Fe:ZnSe 激光器输出时域波形及能量的影响。闪光灯泵浦的 Er:YAG 泵浦激光时域波形展现出固体激光典型的弛豫振荡现象, Fe:ZnSe 激光脉冲波形与泵浦激光波形保持强相关性, 且单个尖峰脉冲宽度随温度的升高而变小。在低温 79 K 条件下, 当 Er:YAG 泵浦能量为 2.75 J 时, 实现了 Fe:ZnSe 激光 1.04 J 大能量输出, 对应的斜率效率和光光转换效率分别为 36.4% 和 37.8%, 激光中心波长为 4.1 μm 。在热电致冷可达的 240 K 温度条件下, 当泵浦能量为 500 mJ 时, Fe:ZnSe 激光的能量输出为 50 mJ, 激光中心波长为 4.4 μm 。研究结果为焦耳级大能量中红外固体激光器的研制提供了参考。

关键词 激光器; 中红外固体激光器; Fe:ZnSe 激光器; 低温; 大能量; 时域波形

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221449

1 引言

中红外 4~5 μm 波段位于大气传输窗口, 在大气遥感、环境监测、空间通信、红外对抗等领域中有着广泛的应用前景。相比量子级联激光器、CO₂ 倍频激光器、铅盐半导体、化学激光器、非线性频率变换激光器等获取中红外激光的手段, 固体 Fe:ZnSe 激光器兼具体积紧凑和脉冲能量高的优点, 是实现大能量中红外激光输出的新途径^[1-2]。

自 1999 年 Adams 等^[3]首次实现 Fe:ZnSe 激光器输出以来, Fe:ZnSe 激光器迅速发展。2015 年 Mirov 等^[4]以四台 Er:YAG 激光器作为泵浦源, 当泵浦能量为 1.2 J、重复频率为 100 Hz 时, 获得了功率为 35 W 的 Fe:ZnSe 激光输出。同年, Velikanov 等^[5]在 85 K 温度下, 搭建了泵浦源为 Er:YAG 激光器的低温 Fe:ZnSe 激光器实验装置, 并获得了 4.9 J 的中红外大能量激光输出。2016 年, Velikanov 等^[6]又利用短脉宽 HF 化学激光器作为泵浦源, 在室温下实现了能量为 1.2 J 的 Fe:ZnSe 激光器输出。2016 年, Frolov 等^[7]利用 Er:YAG 激光器泵浦低温下的 Fe:ZnSe 晶体, 实现了单脉冲能量为 10.6 J 的 4.1 μm 激光输出。2019 年, Fedorov 等^[8]采用调 Q 的 Er:YAG 激光器泵浦 Fe:ZnSe 晶体, 实现了 10 ns 的短脉宽中红外激光输出。2020 年, Pushkin 等^[9]实现了脉宽为 732 fs 的被动锁模

Fe:ZnSe 超短脉冲激光输出。国内研究者在连续和脉冲 Fe:ZnSe 激光器方面开展了研究。在连续 Fe:ZnSe 激光器方面, 2023 年, 沈炎龙等^[10]利用 2.8 μm 的光纤激光器泵浦 Fe:ZnSe 晶体, 获得了 3.8 μm 连续激光输出。在脉冲 Fe:ZnSe 激光器方面, 2018 年, 本课题组在室温条件下利用 HF 激光器泵浦 Fe:ZnSe 晶体, 实现了能量为 136 mJ 的中红外激光脉冲输出^[11]。2019 年, Li 等^[12]利用 Cr:Er:YAG 共掺激光器作为泵浦源, 在 77 K 温度下获得了单脉冲能量为 197 mJ 的 Fe:ZnSe 激光输出。2020 年, 本课题组在室温条件下优化横向寄生振荡, 利用 HF 激光器泵浦 Fe:ZnSe 晶体, 获得了能量为 500 mJ 的中红外激光脉冲输出^[13]。2022 年, 本课题组报道了脉冲 Fe:ZnSe 激光器四能级模型, 研究了温度、晶体掺杂浓度及输出镜反射率等参数对 Fe:ZnSe 激光器性能的影响^[14], 为后续优化 Fe:ZnSe 激光器提供了理论依据。

本文面向大能量中红外 Fe:ZnSe 固体激光器的应用需求, 以 Er:YAG 激光器为泵浦源, 设计了晶体温度可控的 Fe:ZnSe 激光系统, 研究了 Fe:ZnSe 激光器在不同温度条件下的工作性能, 实现了最大能量为 1.04 J 的中红外激光输出, 光光转换效率可达 37.8%, 并获得了不同工作温度条件下的激光输出光谱, 展示了中红外固体 Fe:ZnSe 激光器大能量输出的能力。

收稿日期: 2022-11-24; 修回日期: 2022-12-09; 录用日期: 2022-12-21; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0203200)、吉林省自然科学基金(20220101207JC)、吉林省与中科院科技合作项目(2021SYHZ0028)、中国科学院青年创新促进会(2021216)

通信作者: *panqikun2005@163.com

2 实验设计及装置

为实现结构紧凑的 Fe:ZnSe 激光器,选用了小型化的 2.94 μm Er:YAG 固体激光器作为泵浦源,其工作模式为单脉冲,且单脉冲最大输出能量为 3 J,脉宽可调范围为 50~300 μs ,脉冲时域波形由多个百纳秒级尖峰脉冲

组成,如图 1(a)所示。由于 Fe:ZnSe 晶体在室温下的上能级寿命较短,仅为 360 ns^[15],该长脉宽 Er:YAG 激光器泵浦的室温 Fe:ZnSe 激光器的效率低,出光阈值高。Fe:ZnSe 晶体的上能级寿命随温度的下降而呈指数上升,在 79 K 时达到 60 μs ^[15]。本文利用液氮对激光晶体进行制冷处理,搭建了低温高效率 Fe:ZnSe 激光器实验系统。

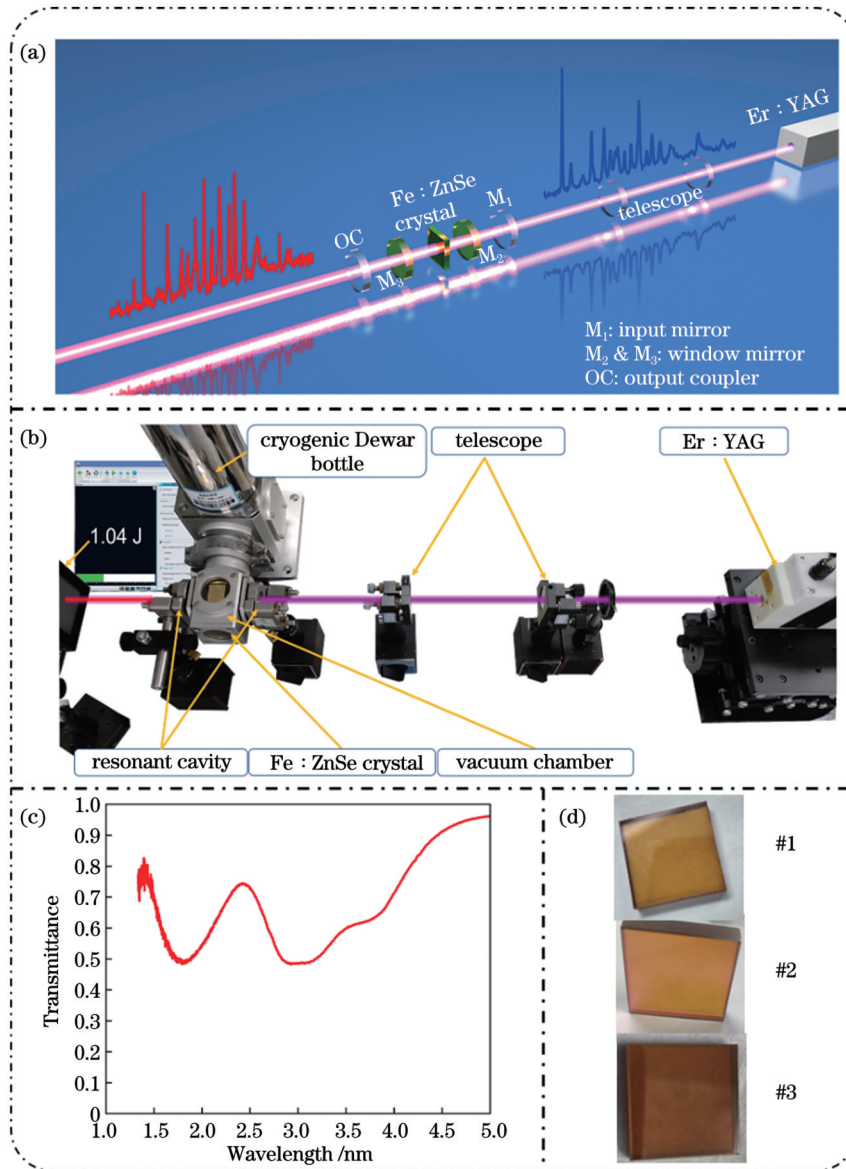


图 1 Fe:ZnSe 激光器实验装置和结果。(a) 实验光路示意图;(b) 实际光路图;(c) #2 晶体透过率曲线;(d) Fe:ZnSe 晶体
Fig. 1 Experimental apparatus and results of Fe:ZnSe laser. (a) Schematic of experimental light path; (b) schematic of actual optical path; (c) transmittance curve of #2 crystal; (d) Fe:ZnSe crystals

Fe:ZnSe 激光器的低温实验装置如图 1(b)所示,利用望远镜式扩束系统调控 Er:YAG 泵浦光的能量密度和光斑大小以抑制 Fe:ZnSe 激光的横向自激振荡,并防止晶体损伤。本实验采用了三块不同掺杂浓度的 Fe:ZnSe 晶体,如图 1(d)所示,其具体参数如表 1 所示。#1 晶体尺寸较另外两块较小,掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,#2 晶体与 #3 晶体尺寸相同,掺杂浓度分布为 $0.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 和 $4.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,#2 晶体的透过率曲线如图 1(c)所示。利用镶边工艺对三块晶体进行

处理,进一步抑制 Fe:ZnSe 激光器横向自激振荡的产生^[13]。低温 Fe:ZnSe 激光光路如图 1(a)所示。谐振腔腔型为平平腔;M1 为输入腔镜,2.94 μm 光的透过率 >98%,Fe:ZnSe 激光的反射率 >99.5%;OC 为输出腔镜,2.94 μm 光的反射率 >99.9%,Fe:ZnSe 激光的反射率为 70%。Fe:ZnSe 晶体被固定在真空低温腔中,真空腔窗口镜 M2 和 M3 对泵浦光和 Fe:ZnSe 激光高透。实验中使用能量计和光电探测器对 Fe:ZnSe 激光器的输出参数进行测量。

表 1 Fe:ZnSe 晶体参数
Table 1 Parameters of Fe:ZnSe crystals

| Crystal No. | Size / (mm×mm×mm) | Doped concentration / (10 ¹⁸ cm ⁻³) | Single absorptivity (A) / % (2.94 μm) | Reflectivity (R) / % (2.94 μm) | Total absorptivity (A ₀) / % (2.94 μm) |
|-------------|-------------------|--|---------------------------------------|--------------------------------|--|
| #1 | 20×20×4 | 5.0 | 73.32 | 17.23 | 80.25 |
| #2 | 28×28×7 | 0.9 | 44.79 | 1.39 | 68.89 |
| #3 | 28×28×7 | 4.5 | 78.29 | 17.56 | 81.54 |

3 结果与分析

首先测量了三块 Fe:ZnSe 晶体的单程吸收率 A, 测量得到的晶体单程吸收率与 Beer-Lambert 定律计算得出的吸收率相符, 未见饱和吸收现象。在实际光路中, 透过晶体的泵浦光会被谐振腔输出镜反射回晶体

发生二次吸收, 所以实际晶体对泵浦光的总吸收率 A₀ 应为 A₀ = A + (1 - R - A)A, 测量得出的 A 及计算得出的 A₀ 如表 1 所示。

按照图 1(b) 所示的光路搭建实验装置, 研究了 Fe:ZnSe 激光器的输出特性。79 K 时 Fe:ZnSe 激光的输出能量随泵浦光能量的变化如图 2(a) 所示,

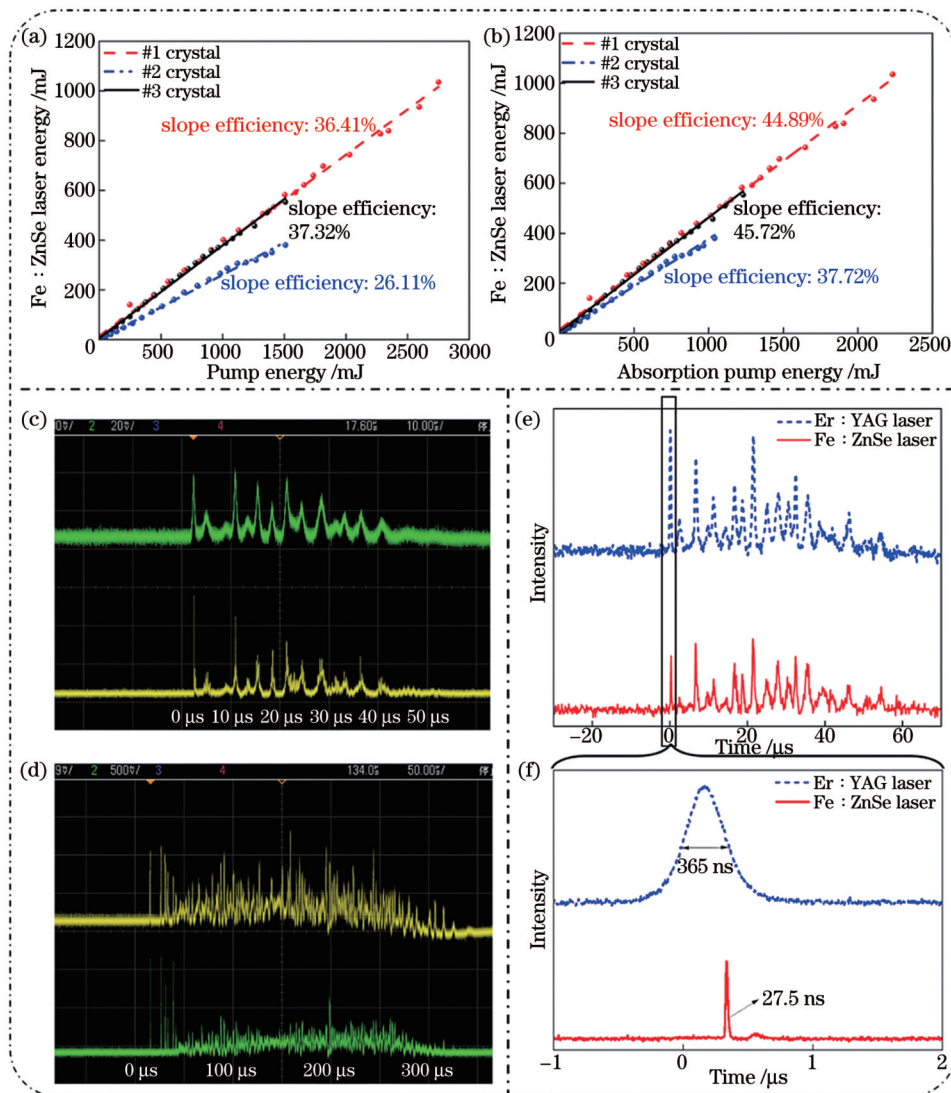


图 2 Fe:ZnSe 激光器在 79 K 时的输出特性。(a) Fe:ZnSe 激光输出能量随泵浦光能量的变化;(b) Fe:ZnSe 激光输出能量随吸收泵浦光能量的变化;泵浦光脉宽为(c) 50 μs 和(d) 300 μs 时的泵浦光(上)和 Fe:ZnSe 激光(下)时域特征;(e) 图 2(c) 的数据图;(f) 图 2(e) 中泵浦光和 Fe:ZnSe 激光首脉冲的时域特征

Fig. 2 Output characteristics of Fe:ZnSe laser at 79 K. (a) Fe:ZnSe laser output energy versus pump energy; (b) Fe:ZnSe laser output energy versus absorption pump energy; time domain characteristics of pump light (top) and Fe:ZnSe laser (bottom) when pulse widths are (c) 50 μs and (d) 300 μs; (e) data graph for Fig. 2(c); (f) time domain characteristics of first spike pulses of pump light and Fe:ZnSe laser in Fig. 2(e)

Fe:ZnSe 激光的输出能量随泵浦能量的增大而增大。三块晶体的掺杂浓度及增益长度不同,导致其对泵浦光的吸收率不同,三块晶体的出光斜率效率不同。其中,#1 晶体和#3 晶体对泵浦光的总吸收率相似,所以 Fe:ZnSe 激光器斜率效率也相近。#2 晶体的掺杂浓度较低,其对泵浦光的总吸收率仅有 69%,所以激光斜率效率比其他两块晶体低。为了避免 Fe:ZnSe 晶体损伤,对泵浦激光进行 2 倍扩束,泵浦光斑直径从 5 mm 扩束到 1 cm。由于扩束后的泵浦能量密度接近 Firsov 等^[16]报道的晶体损伤阈值 3 J/cm^2 ,本文只选择#1 晶体进行高泵浦能量实验,最终在 Er:YAG 激光泵浦能量为 2.75 J,泵浦能量密度为 3.5 J/cm^2 时,#1 晶体 Fe:ZnSe 激光器的输出能量最大值为 1.04 J,并且未观察到能量饱和以及晶体损伤现象,表明该 Fe:ZnSe 激光系统具有输出更大能量的潜力。

图 2(c)、(e)为 Er:YAG 泵浦光(上线)与 Fe:ZnSe 激光器(下线)在低温(79 K)下的时域波形。与泵浦光类似,Fe:ZnSe 激光器的整体脉宽约为 $50 \mu\text{s}$,由多个

尖峰脉冲组成,并且尖峰脉冲与泵浦光尖峰脉冲一一对应,该泵浦光与 Fe:ZnSe 激光的脉冲形状可以等效于高重复频率下 ns 脉宽脉冲的泵浦情况,显示出 Fe:ZnSe 激光器在低温条件下具备超高重复频率的工作能力。图 2(f)为泵浦光与 Fe:ZnSe 激光首尖峰脉冲的时域波形,泵浦光首脉冲的半峰全宽(FWHM)约为 365 ns,经历约 300 ns 的 Fe:ZnSe 激光增益积累,在较强的增益开关效应下,Fe:ZnSe 激光脉冲的 FWHM 被压缩至 27.5 ns。当泵浦光脉宽为较长的 $300 \mu\text{s}$ 时,Fe:ZnSe 激光脉宽也增加为 $300 \mu\text{s}$,如图 2(d)所示,Fe:ZnSe 激光脉宽和脉冲形状与泵浦光类似,展现出大能量固体激光典型的弛豫振荡效应。

Fe:ZnSe 晶体的上能级寿命随温度的升高而迅速减短,激光器效率与性能随之变化,尤其是当泵浦源为长脉宽的 Er:YAG 激光器时,更需要关注 Fe:ZnSe 晶体的温度。为明确不同温度时 Fe:ZnSe 激光器的性能,测量了泵浦能量为 430 mJ、泵浦脉冲宽度为 $300 \mu\text{s}$ 时不同温度下 Fe:ZnSe 激光器的输出变化。Fe:ZnSe 激光时域波形随温度有着明显变化,如图 3(a)、(b)所

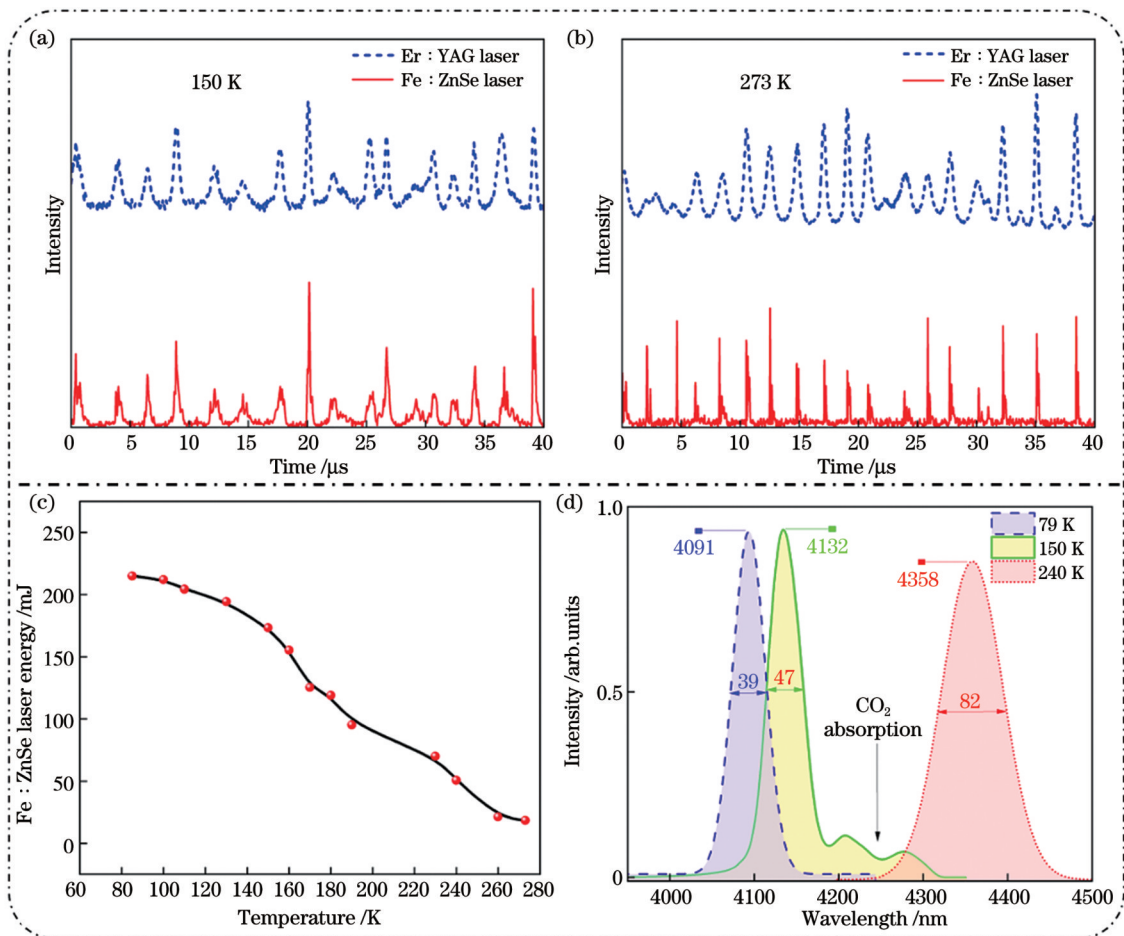


图 3 不同温度下激光器的输出图。(a) 150 K 时 Fe:ZnSe 激光的部分时域波形图;(b) 273 K 时 Fe:ZnSe 激光的部分时域波形图;(c) 泵浦能量为 430 mJ 时 Fe:ZnSe 激光的输出能量;(d) Fe:ZnSe 激光光谱图

Fig. 3 Output of laser under different temperatures. (a) Partial time domain waveform of Fe:ZnSe laser at 150 K; (b) partial time domain waveform of Fe:ZnSe laser at 273 K; (c) output energy of Fe:ZnSe laser when pump energy is 430 mJ; (d) Fe:ZnSe laser spectra

示,在相同泵浦条件下,273 K 时 Fe:ZnSe 激光尖峰脉冲的脉宽明显短于 150 K 时的脉宽。随着温度的升高,上能级寿命减短,上能级粒子的无辐射弛豫跃迁过程加快,晶体需要更大的泵浦能量才能达到反转粒子数密度,因此激光泵浦阈值提高。这使得 Fe:ZnSe 激光脉冲的延时增加,脉宽减小,激光效率降低,该实验结果与文献[14]中的仿真结果相符。如图 3(c)所示,Fe:ZnSe 激光器的输出能量随着温度的升高而下降,在相同泵浦条件下,输出能量从 79 K 时的 215 mJ 减小到 273 K 时的 19 mJ,效率降低到 4.4%。值得注意的是,Fe:ZnSe 激光器在温度为 240 K 时,效率约为 16%,输出脉冲能量约为 67 mJ,表明可以采用结构紧凑的热电致冷模块进一步压缩 Fe:ZnSe 激光器的体积。

温度影响 Fe:ZnSe 晶体的晶格振动,从而 Fe:ZnSe 激光能级位置随温度在能带内移动,导致 Fe:ZnSe 激光的发射光谱随温度变化。如图 3(d)所示,随温度的升高,Fe:ZnSe 激光光谱线宽变宽且存在红移现象,输出波长线宽从 79 K 下的 39 nm 增长到 240 K 时的 82 nm,中心波长从 4091 nm 移动到 4358 nm,该结果为后续 Fe:ZnSe 激光器的波长调谐优化提供了实验数据支撑。

4 结 论

利用自由运转的 Er:YAG 激光器作为泵浦源,展示了 Fe:ZnSe 晶体在低温下输出中红外激光的实验系统。该固体 Fe:ZnSe 激光器具有在中红外波段输出大能量的潜力,获得的激光最大单脉冲能量为 1.04 J,脉宽为 300 μ s,中心波长为 4.1 μ m,斜率效率约为 36.4%,光光转换效率约为 37.8%。研究了 Fe:ZnSe 激光器在不同温度下的输出性能,发现 Fe:ZnSe 激光单个尖峰脉宽随温度的增加而减短,输出波长随温度的升高而红移,可调谐范围变宽。Fe:ZnSe 激光器在 240 K 时仍有 13% 的光光转换效率,为进一步采用热电致冷实现百毫焦量级中红外激光输出提供了实验数据支撑。实现的固体大能量 Fe:ZnSe 激光器有望应用于环境监测和激光通信等诸多领域,并为下一步实现小型化和波长可调谐的 Fe:ZnSe 激光器提供了参考。

参 考 文 献

[1] 潘其坤. 中红外固体激光器研究进展[J]. 中国光学, 2015, 8(4):

- 557-566.
 Pan Q K. Progress of mid-infrared solid-state laser[J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 557-566.
 [2] 孙晓, 韩隆, 王克强. 直接抽运中红外固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050007.
 Sun X, Han L, Wang K Q. Progress in directly pumping of mid-infrared solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050007.
 [3] Adams J J, Bibeau C, Page R H, et al. 4.0-4.5 μ m lasing of Fe: ZnSe below 180 K, a new mid-infrared laser material[J]. Optics Letters, 1999, 24(23): 1720-1722.
 [4] Mirov S B, Fedorov V, Martyshkin D, et al. High average power Fe: ZnSe and Cr: ZnSe mid-IR solid state lasers[C]//Advanced Solid State Lasers 2015, October 4-9, 2015, Berlin, Germany. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2015: AW4A.1.
 [5] Velikanov S D, Zaretsky N A, Zotov E A, et al. Investigation of Fe: ZnSe laser in pulsed and repetitively pulsed regimes[J]. Quantum Electronics, 2015, 45(1): 1-7.
 [6] Velikanov S D, Zaretsky N A, Zotov E A, et al. Room-temperature 1.2-J Fe²⁺: ZnSe laser[J]. Quantum Electronics, 2016, 46(1): 11-12.
 [7] Frolov M P, Korostelin Y V, Kozlovsky V I, et al. Efficient 10-J pulsed Fe: ZnSe laser at 4100 nm[C]//2016 International Conference Laser Optics (LO), June 27-July 1, 2016, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2016: R1-10.
 [8] Fedorov V, Martyshkin D, Karki K, et al. Q-switched and gain-switched Fe: ZnSe lasers tunable over 3.60-5.15 μ m[J]. Optics Express, 2019, 27(10): 13934-13941.
 [9] Pushkin A V, Migal E A, Tokita S, et al. Femtosecond graphene mode-locked Fe: ZnSe laser at 4.4 μ m[J]. Optics Letters, 2020, 45(3): 738-741.
 [10] 沈炎龙, 万颖超, 汪由胜, 等. 瓦级高效率中红外全固态 3.8 μ m 连续波 Fe: ZnSe 激光器[J]. 中国激光, 2023, 50(14): 1401005.
 Shen Y L, Wan Y C, Wang Y S, et al. Watt-level high efficiency mid-infrared 3.8 μ m continuous-wave all solid-state Fe: ZnSe laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(14): 1401005.
 [11] 潘其坤, 谢冀江, 陈飞, 等. 中红外室温大能量 Fe²⁺: ZnSe 激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1101001.
 Pan Q K, Xie J J, Chen F, et al. Mid-infrared high energy Fe²⁺: ZnSe laser at room temperature[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1101001.
 [12] Li Y Y, Dai T Y, Duan X M, et al. Fe: ZnSe laser pumped by a 2.93- μ m Cr, Er: YAG laser[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(6): 064203.
 [13] Pan Q K, Xie J J, Chen F, et al. Transversal parasitic oscillation suppression in high gain pulsed Fe²⁺: ZnSe laser at room temperature[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 127: 106151.
 [14] Xu F, Pan Q K, Chen F, et al. Theoretical characteristics of mid-infrared gain switched pulsed iron-doped ZnSe laser[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108173.
 [15] Evans J W, Harris T R, Reddy B R, et al. Optical spectroscopy and modeling of Fe²⁺ ions in zinc selenide[J]. Journal of Luminescence, 2017, 188: 541-550.
 [16] Firsov K N, Gavrishchuk E M, Kazantsev S Y, et al. Increasing the radiation energy of ZnSe: Fe²⁺ laser at room temperature[J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(8): 085001.

Joule-Level High Energy Mid-Infrared Solid Fe:ZnSe Laser

Xu Fei^{1,2}, Pan Qikun^{1*}, Zhang Yueru^{1,2}, Chen Yi¹, Yu Deyang¹, Zhang Kuo¹, Zhang Ranran¹, Sun Junjie¹, Chen Fei¹

¹State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective Mid-infrared (4–5 μm) radiation lies in the atmospheric transmission window and has broad application prospects in fields such as atmospheric remote sensing, environmental monitoring, and space communications. Compared with chemical lasers, nonlinear frequency conversion lasers, and other means of obtaining mid-infrared lasers, solid Fe:ZnSe lasers have the advantages of compact volume and high energy, offering a new way to achieve high-energy mid-infrared laser output. This study presents a high energy mid-infrared solid Fe:ZnSe laser. We use the Er:YAG laser as the pump laser and design an Fe:ZnSe laser system whose crystal temperature can be controlled. The work performance of the Fe:ZnSe laser is studied at different temperatures. In addition, Fe:ZnSe laser spectra are obtained at different temperatures.

Methods The Fe^{2+} :ZnSe crystal is sensitive to temperature, which causes a temperature quenching effect at higher temperatures and affects the laser efficiency. When the temperature is above 100 K, the lifetime of the laser upper level decreases rapidly with an increase in temperature, from 60 μs at 77 K to 360 ns at 294 K. To improve the lifetime of the laser upper-level, we use a liquid nitrogen Dewar temperature controller. The Fe:ZnSe crystals are placed in a low-temperature vacuum chamber. A 2.94- μm Er:YAG laser with axial pumping is incident on the crystal surface. The maximum output energy of the Er:YAG laser is 3 J, and its pulse width is 50–300 μs , which comprises multiple spike pulses with a duration of several hundred nanoseconds. The resonant cavity is formed by a flat input mirror M1 and flat output coupler M2 with a cavity length of 50 mm. The input mirror M1 exhibits $>98\%$ transmittance for the pump laser and $>99.5\%$ reflectivity for the Fe^{2+} :ZnSe laser, whereas the output coupler M2 exhibits $>99.9\%$ reflectivity for the pump laser and 70% reflectivity for the Fe:ZnSe laser. The energy density of the pump light incident on the cavity can be adjusted by changing the optical interval of the telescope. An iris is used to adjust the size of the pump spot incident on the Fe:ZnSe crystal; in addition, it is used to suppress transverse parasitic oscillations. Previous research has shown that smaller pump spots can suppress transverse parasitic oscillations and improve laser efficiency. In this study, three Fe:ZnSe crystals are grown via the vertical Bridgman method and simultaneously doped during growth with a higher doping uniformity. The crystal size of crystal #1 is 20 mm \times 20 mm \times 4 mm, with a doping concentration of $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Crystals #2 and #3 have the same size, and their doping concentrations are $0.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and $4.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, respectively.

Results and Discussions At 79 K, the maximum output energy of the Fe:ZnSe laser is 1.04 J with the slope efficiency of 36.4% and optical-to-optical conversion efficiency of 37.8% at a pump energy of 2.75 J [Figs. 2(a) and (b)]. Figure 2(a) shows the output energy and slope efficiency of different Fe:ZnSe crystals. Because of the difference in the doping concentration and gain length, the absorption and slope efficiencies of the crystals are different. The total absorptivities of crystals #1 and #3 are similar; therefore, the slope efficiency of the Fe:ZnSe laser is also similar. Owing to the low doping concentration of crystal #2, the total absorption of the pump light is only 69%; therefore, the laser slope efficiency is lower than those of the other two crystals. The temporal profiles of the Fe:ZnSe laser are shown in Figs. 2(c)–(f) and Figs. 3(a) and (b); it can be observed that the Fe:ZnSe laser waveform remains strongly correlated with the pump laser waveform, and the width of a single spike pulse shortens with the increase in temperature. The output spectrum of the Fe:ZnSe laser is shown in Fig. 3(d). The output spectrum redshifts with increasing temperature, and the tunable range widens.

Conclusions In this study, a low-temperature Fe:ZnSe laser is fabricated using an Er:YAG laser as the pump energy source. The Fe:ZnSe laser has the potential to produce large amounts of energy in the mid-infrared region. At 79 K, the output energy of the Fe:ZnSe laser is 1.04 J with a slope efficiency of 36.4% and an optical-to-optical conversion efficiency of 37.8% at a pump energy of 2.75 J; the wavelength of the Fe:ZnSe laser is 4.1 μm . At the thermoelectric cooling temperature of 240 K, the energy of the Fe:ZnSe laser is 50 mJ with a wavelength of 4.4 μm and pump energy of 500 mJ. The Fe:ZnSe laser introduced in this study has many potential applications in mid-infrared fields, such as environmental monitoring and laser communication, which provides a basis for further miniaturization and fabrication of wavelength-tunable Fe:ZnSe lasers.

Key words lasers; mid-infrared solid lasers; Fe:ZnSe lasers; low temperature; high energy; temporal waveform