

## 室温脉冲 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 中红外激光特性研究

孔心怡<sup>1,2</sup>, 柯常军<sup>1</sup>, 吴天昊<sup>1,2</sup>, 杭寅<sup>3</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 处于 3~5 μm 波段的激光源在遥感、环境保护、医疗、通信和红外对抗等民用和军用领域都有广阔的应用前景。Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体由于在材料特性和光学特性等方面都具有明显优势, 是 3~5 μm 波段极具潜力的激光介质之一。在室温条件下利用自制非链式脉冲 HF 激光器作为泵浦光源, 对晶体直径为 10 mm, 厚度 1 mm, Fe<sup>2+</sup> 离子掺杂浓度为 3×10<sup>19</sup>/cm<sup>3</sup> 的 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体进行了研究, 获得了中心波长 4 295 nm、最大输出能量 78.8 mJ 的中红外激光输出。输出激光能量相对于晶体吸收泵浦能量的转换效率为 27.7%, 斜率效率达 28.8%。采用小角度(3°)斜入射的方案很好地解决了 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光器谐振腔镜镀膜问题。

**关键词:** 中红外激光; Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体; 脉冲 HF 激光; 小角度斜入射泵浦  
**中图分类号:** TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1005001

## Research on the characteristic of pulsed Fe<sup>2+</sup>:ZnSe mid-infrared laser at room temperature

Kong Xinyi<sup>1,2</sup>, Ke changjun<sup>1</sup>, Wu Tianhao<sup>1,2</sup>, Hang Yin<sup>3</sup>

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Lasers in the 3–5 μm waveband have many important scientific and military applications such as remote sensing, environmental protection, medical treatment, communication and infrared countermeasures. Fe<sup>2+</sup>:ZnSe crystal has become one of the most promising materials to generate laser in this region due to its advantages in material and optical properties. The characteristics of a polycrystalline ZnSe sample, which diffusion-doped with Fe<sup>2+</sup> ions at a concentration of 3×10<sup>19</sup>/cm<sup>3</sup>, were investigated. The diameter and the thickness of the sample were 10 mm and 1 mm, respectively. The output characteristics of the Fe<sup>2+</sup>:ZnSe laser, which was excited by a non-chain electric-discharge pulsed HF laser, were studied at room temperature. A mid-infrared laser with the maximum output energy of 78.8 mJ at a center wavelength of 4 295 nm was obtained. The efficiency respecting to the absorbed pump energy

收稿日期: 2018-05-12; 修订日期: 2018-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(60708005; 61178029; 61575198)

作者简介: 孔心怡(1994-), 女, 硕士生, 主要从事中红外激光技术的研究。Email: kongxinyi15@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 柯常军(1973-), 男, 研究员, 博士, 主要从事红外激光技术及其应用方面的研究。Email: cjke@mail.ie.ac.cn

was 27.7% and the slope efficiency was as high as 28.8%. The Fe<sup>2+</sup>:ZnSe laser was pumped at a small angle (3°) with respect to the optical axis of the laser cavity instead of orthogonal-pump. It solved the problems that a HF laser and a Fe<sup>2+</sup>:ZnSe laser are both in the mid-infrared band.

**Key words:** mid-infrared laser; Fe<sup>2+</sup>:ZnSe crystal; pulsed HF laser; pump at a small angle

## 0 引言

随着3~5 μm 激光源在遥感、医疗、环境保护和目标定位等民用和军用领域的需求不断增长,近年来出现的过渡金属离子掺杂 II-VI 族化合物激光技术引起了大家的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体因具有增益截面大、吸收带宽、室温时荧光量子效率高等优点,成为最有应用前景的中红外激光介质材料之一<sup>[4]</sup>。1999 年 Adams 等人采用 Er:YAG 激光器泵浦单晶 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe,在低温下首次实现了 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光输出,并通过温度变化实现了 3 980~4 540 nm 波段的激光调谐,输出最高能量在 130 K 时达到了 12 μJ<sup>[5]</sup>。Fe<sup>2+</sup>的上能级寿命受温度影响很大。当温度由 120 K 增大到 300 K 时,Fe<sup>2+</sup>的上能级寿命由 105 μs 迅速下降到 355 ns<sup>[5-7]</sup>。由于缺乏合适的窄脉宽泵浦源,Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光器的研究长期局限于低温条件。直到 2005 年,Kernal 等人才首次在室温条件下实现了脉冲 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光输出<sup>[8]</sup>。2013 年 Frolov 等人采用能量为 8 J、脉宽 750 μs 的 Er:YAG 泵浦源,在 85 K 的温度下实现了 2.1 J 的激光输出。但同样的泵浦源,在室温下仅输出 42 mJ 的激光,光光转换效率仅为 0.96%<sup>[9]</sup>。这表明在室温下只有通过窄脉冲光源泵浦,才能形成高效的 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光振荡。国内关于 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 中红外激光技术研究属于起步阶段,仅有少数单位报道了研究结果。2015 年 1 月哈尔滨工业大学可调谐激光国家级重点实验室采用脉冲重复频率 1 kHz 的 ZnGeP<sub>2</sub> 光学参量振荡器泵浦 2 mm Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体。当泵浦功率为 1.43 W 时,获得平均功率 53 mW 的激光输出,效率为 4.8%<sup>[10]</sup>;2015 年 2 月中国科学院电子学研究所采用脉宽 180 ns 的非链式脉冲 HF 激光 1 mm Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体,在室温时实现了 15 mJ 的 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光输出,效率为 15%<sup>[11]</sup>。

由于 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体吸收截面峰值位于 3 μm 附近,想要在室温条件下获得高能量的 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光

输出,就需要寻求 3 μm 波段高能窄脉宽的泵浦源。放电引发的非链式脉冲 HF 激光器的波长为 2.6~3.1 μm,恰好位于 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体吸收谱的中部,脉宽约为 100~300 ns,小于室温 Fe<sup>2+</sup>离子在 ZnSe 晶体内的上能级寿命。另外,非链式脉冲 HF 激光器的输出能量可达焦耳量级,是 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光器的理想泵浦光源<sup>[12]</sup>。采用非链式脉冲 HF 激光器作为泵浦源,可以大幅度提高室温 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光的输出能量,重复频率运转还可实现高平均功率激光输出<sup>[13]</sup>。

文中利用自制放电引发的非链式 HF 激光器作为泵浦源,在室温下对脉冲 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 中红外激光的特性进行了研究。当晶体吸收泵浦能量由 38 mJ 增大到 282 mJ 时,实现了最大能量为 78.8 mJ 的 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光输出。输出激光能量相对于晶体吸收泵浦能量的转换效率为 27.7%,斜率效率为 28.8%。

## 1 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光器实验装置

实验中采用的增益介质 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体的制备是在热力学平衡的条件下,通过二步真空高温热扩散方法实现 Fe<sup>2+</sup>离子在多晶 ZnSe 中的均匀掺杂。如图 1 所示,扩散炉是上海光学精密机械研究所研制的双温区电阻炉,采用进口的高纯、高光学质量的 ZnSe 多晶作为基质材料,掺杂材料是光谱纯的 FeSe 粉末。

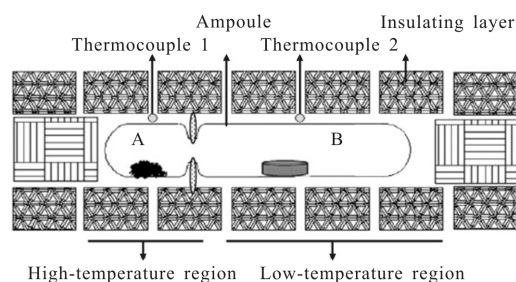


图 1 双温区电阻炉结构图

Fig.1 Structure of double-temperature area resistance furnace

制备完成的 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体的直径为 10 mm,厚

度为 1 mm,  $Fe^{2+}$  离子掺杂浓度为  $3 \times 10^{19}/cm^3$ 。晶体表面未镀膜, 且工作表面的平行度小于  $20''$ 。图 2 为室温下该晶体在  $1.5 \sim 5.5 \mu m$  波长范围内的透过率曲线, 由傅里叶光谱仪测得。从图中可以看出:  $Fe^{2+}:ZnSe$  晶体在  $2.7 \mu m$  处的透过率约为 3%。

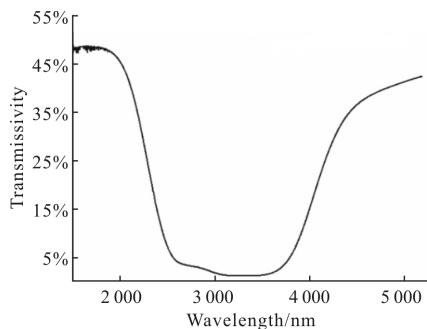


图 2  $Fe^{2+}:ZnSe$  晶体透过率曲线

Fig.2 Transmissivity of  $Fe^{2+}:ZnSe$  crystal

$Fe^{2+}:ZnSe$  激光特性研究所采用的实验装置如图 3 所示。泵浦源采用自制放电引发的非链式脉冲 HF 激光器, 放电体积为  $1 cm \times 2 cm \times 60 cm$ , HF 激光器内的激光介质  $SF_6$  和  $C_2H_6$  的气压分别为 8 kPa 和 0.8 kPa。在该气压下的 HF 激光脉冲波形如图 4 所示, 脉冲宽度为 300 ns, 小于  $Fe^{2+}$  离子在 ZnSe 晶体内的上能级寿命。通过调节 HF 激光器的激励电压, 使得 HF 激光的输出能量在  $10 \sim 350 mJ$  范围内可调。非链式脉冲 HF 激光经过光阑后, 由透镜 L 聚焦在距离透镜 250 mm 位置处的晶体表面中心, 透镜 L 的焦距为 250 mm。由于  $Fe^{2+}:ZnSe$  激光器的泵浦光在  $2.6 \sim 3.1 \mu m$ , 而  $Fe^{2+}:ZnSe$  激光器输出激光在  $4 \mu m$  附近, 均位于中红外波段, 镜片的镀膜难度较大, 因此采用斜入射的泵浦方式。为减小损耗, 实验中采用小角度入射, 泵浦光与谐振腔轴线的夹角为  $3^\circ$ 。

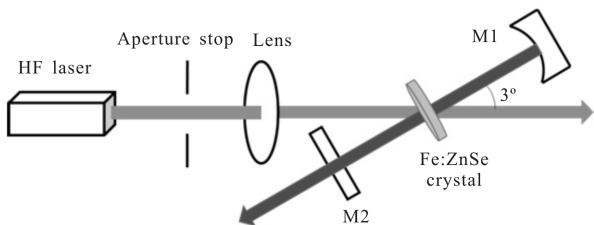


图 3  $Fe^{2+}:ZnSe$  激光器的实验装置图

Fig.3 Experiment setup of  $Fe^{2+}:ZnSe$  laser

激光谐振腔采用平凹腔的结构, 由凹面镜 M1 和平面镜 M2 组成。其中凹面镜 M1 为镀金铜镜, 曲

率半径为 500 mm, 反射率为 99%。平面镜 M2 为未镀膜 Ge 镜。 $Fe^{2+}:ZnSe$  晶体中心放置在谐振腔的光轴上, 且工作面表面垂直于谐振腔光轴。谐振腔腔长为 12.5 cm,  $Fe^{2+}:ZnSe$  晶体靠近平面镜 M2 放置。

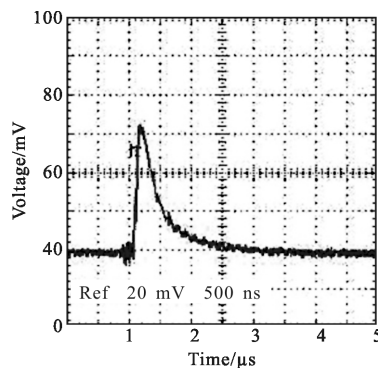


图 4 典型的 HF 激光脉冲波形

Fig.4 Typical oscillogram of HF pulsed laser

泵浦源的输出能量、未被晶体吸收的泵浦能量和  $Fe^{2+}:ZnSe$  激光器的输出能量分别由 Gentec ED500LIR 能量计测得。被晶体吸收的泵浦能量可以通过计算泵浦能量和未被晶体吸收的泵浦能量差值得到。非链式脉冲 HF 激光器和  $Fe^{2+}:ZnSe$  激光器的输出脉冲波形分别由中红外探测器(VIGO PVM, 时间常数  $\leq 1.5 ns$ )接收, 并通过示波器 (Agilent Technologies DSO-X 3034 A, 350 MHz) 记录。 $Fe^{2+}:ZnSe$  激光的近场光强分布由光束质量分析仪记录。

## 2 实验结果与分析

所有实验均在室温条件下进行。 $Fe^{2+}:ZnSe$  激光器的输出能量随晶体吸收能量的变化曲线如图 5 所示, 可以推断出晶体吸收泵浦阈值为 18 mJ。泵浦光能量由 46 mJ 变化到 347 mJ 时,  $Fe^{2+}:ZnSe$  晶体吸收

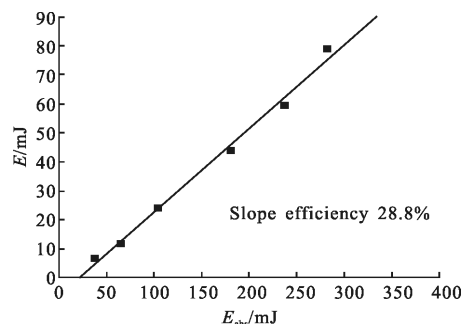


图 5  $Fe^{2+}:ZnSe$  激光能量随吸收泵浦能量的变化关系

Fig.5  $Fe^{2+}:ZnSe$  laser energy dependent on absorbed pump energy

泵浦光的能量由 38 mJ 变化到 282 mJ。当 HF 激光脉冲能量和晶体吸收泵浦光的能量分别为 347 mJ 和 282 mJ 时, Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光实现最大输出能量为 78.8 mJ。输出激光能量相对于晶体吸收泵浦能量的斜率效率为 28.8%。此时输出激光能量相对于晶体吸收泵浦能量的光光转换效率为 27.7%, Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光输出与吸收的泵浦能量之间呈现出很好的线性关系, 表明晶体吸收远未饱和。继续增加泵浦能量, Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光输出能量也会进一步提高。

Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光在吸收不同泵浦能量的情况下的脉冲波形如图 6 所示。输出激光的脉宽随晶体吸收泵浦光能量的增大而增大。当晶体吸收泵浦能量为 38 mJ 时, 输出激光脉冲波形如图 6(b)所示, 波形近似三角波, 脉宽为 30 ns。当晶体吸收泵浦光能量为 181 mJ 时, 输出激光脉冲波形如图 6(a)所示, 脉宽为 225 ns。但激光脉冲波形在后部出现明显的准稳态平台。平台的宽度和高度随晶体吸收泵浦能量的增大而增大。该现象的可能原因是弛豫振荡效应。当泵浦能量增大时, 反转粒子数快速达到阈值, 输出激光, 随后由于弛豫振荡, 形成一系列尖峰, 并且当泵浦能量不断增大时, 尖峰形成越快。同时, Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光的近场三维光强分布如图 7 所示, 表明 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe

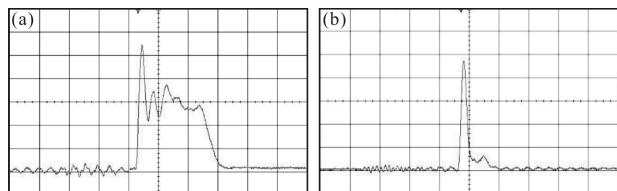


图 6 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光脉冲波形, 其中(a)吸收泵浦光能量 181 mJ, (b)吸收泵浦光能量 38 mJ

Fig.6 Oscillogram of Fe<sup>2+</sup>:ZnSe pulsed laser, (a) absorbed pump energy is 181 mJ, (b) absorbed pump energy is 38 mJ

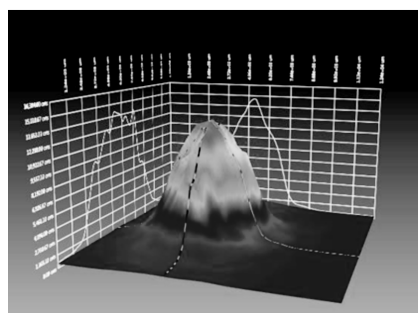


图 7 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光近场三维光强分布

Fig.7 3D intensity distribution pattern of the Fe<sup>2+</sup>:ZnSe laser

激光具有良好的光束质量。Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光的光谱图如图 8 所示, 谱线峰值为 4 295 nm, 线宽为 115 nm。

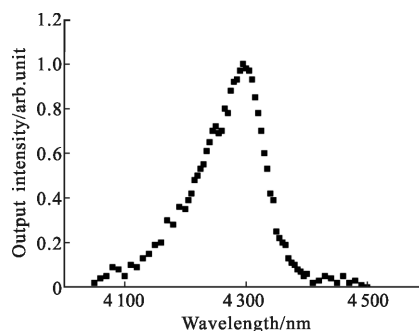


图 8 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光光谱

Fig.8 Spectrum of Fe<sup>2+</sup>:ZnSe laser

### 3 结 论

采用自制放电引发的非链式 HF 激光器代替常用固体激光器作为泵浦源, 对 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光器的输出特性进行了研究。采用小角度(3°)斜入射的方案代替了垂直入射的泵浦方案, 解决了由于 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光器的泵浦光和输出激光均处于中红外波段所带来的双色镜的镀膜困难的问题。在室温条件下实现了 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光的高效输出, 最大激光输出能量达 78.8 mJ, 输出激光相对于晶体吸收泵浦能量的斜率效率为 28.8%。Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光具有良好的光束质量。Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光输出与吸收的泵浦能量之间呈现出很好的线性关系, 晶体吸收未达到饱和, 可通过继续增加泵浦能量, 进一步提高 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光输出能量。另外, 通过优化谐振腔结构、增加 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体厚度、降低 Fe<sup>2+</sup>掺杂浓度等方法也可以提高能量转换效率, 实现更高的 Fe<sup>2+</sup>:ZnSe 激光输出能量。

### 参 考 文 献:

[1] Sabbir L, Kevin A B, Laura X, et al. Noninvasive in vivo glucose sensing on human subjects using mid-infrared light [J]. *Opt Express*, 2014, 5(7): 2397-2404.

[2] Ren W, Jiang W Z, Frank K. Single-QCL-based absorption sensor for simultaneous trace-gas detection of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O [J]. *Appl Phys B*, 2014, 117(1): 245-251.

[3] Ke Changjun, Kong Xinyi, Wang Ran, et al. Research progress on mid-IR Fe:ZnSe laser technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0305002. (in Chinese) 柯常军, 孔心怡, 王然, 等. 中红外 Fe:ZnSe 激光技术最新

- 研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0305002.
- [4] Mirov S B, Fedorov V V, Martyshekin D, et al. Progress in mid-IR lasers based on Cr and Fe-doped II-VI chalcogenides [J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 2015, 21(1): 1601719.
- [5] Adams J J, Bibeau C, Page R H, et al. 4.0–4.5  $\mu\text{m}$  lasing of Fe:ZnSe below 180 K, a new mid-infrared laser material [J]. *Opt Lett*, 1999, 24(23): 1720–1722.
- [6] Akimov V A, Voronov A A, Kozlovsky V I, et al. Efficient lasing in a  $\text{Fe}^{2+}$ : ZnSe crystal at room temperature [J]. *Quantum Electron*, 2006, 36(4): 299–301.
- [7] Myoung N, Fedorov V V, Mirov S B. Optically dense Fe: ZnSe crystals for energy scaled gain switched lasing [C]// SPIE, 2010, 7578: 75781H.
- [8] Kernal J, Fedorov V V, Gallian A, et al. 3.9–4.8  $\mu\text{m}$  gain-switched lasing of Fe:ZnSe at room temperature [J]. *Opt Express*, 2005, 13(26): 10608–10615.
- [9] Frolov M P, Korostelin Y V, Kozlovsky V I, et al. Study of a 2-J pulsed Fe:ZnSe 4  $\mu\text{m}$  laser [J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(12): 125001–125007.
- [10] Yao Baoquan, Xia Shixing, Yu Kuaikuai, et al.  $\text{Fe}^{2+}$ :ZnSe achieving laser output [J]. *Chinese J Laser*, 2015, 42(1): 0119001. (in Chinese)  
姚宝权, 夏士兴, 于快快, 等.  $\text{Fe}^{2+}$ :ZnSe 实现中红外波段激光输出 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0119001.
- [11] Ke Changjun, Wang Ran, Wang Xiangyong, et al. 15 mJ  $\text{Fe}^{2+}$ :ZnSe laser operating at room temperature [J]. *Chinese J Laser*, 2015, 42(2): 0219004. (in Chinese)  
柯常军, 王然, 王向永, 等. 室温  $\text{Fe}^{2+}$ :ZnSe 激光器获得 15 mJ 激光输出 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0219004.
- [12] Apollonov V V, Kazantsev S Y, Oreshkin V F, et al. Nonchain electric-discharge HF (DF) laser with a high radiation energy [J]. *Quantum Electron*, 1998, 28(2): 116–118.
- [13] Velikanov S D, Evdokimov P, Zapolsky A F, et al. Pulse periodic HF (DF) laser of atmospheric pressure with pulse repetition rate up to 2200 Hz [C]//SPIE, 2009, 7131: 71311–71317.