

文章编号: 1001-3806(2018)02-0151-05

Fe:ZnS/ZnSe 中红外固体激光器研究进展

程小劲¹, 李超¹, 徐飞¹, 姜本学²

(1. 上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620; 2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 高性能中红外激光在军事对抗、生物安全、环境科学等领域有重要的应用价值。Fe:ZnS/ZnSe 具有长输出波长、宽吸收带和发射带的特点, 是实现高性能、宽调谐 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 激光输出的最有效激光介质。介绍了 Fe:ZnS/ZnSe 的光谱和热力学特性, 评述了 Fe:ZnS/ZnSe 在低温和常温下激光输出性能方面的最新进展, 分析了 Fe:ZnS/ZnSe 激光器在功率、能量提升以及室温运转方面面临的科学挑战。

关键词: 激光器; 固体激光器; 中红外波段; Fe:ZnS/ZnSe; 高性能

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.02.002

Progress in Fe:ZnS/ZnSe middle-infrared solid-state lasers

CHENG Xiaojin¹, LI Chao¹, XU Fei¹, JIANG Benxue²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: High-performance mid-infrared laser has important application value in the field of military confrontation, biological safety and environmental sciences. Fe:ZnS/ZnSe is considered to be the most effective laser medium to obtain $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ mid-infrared lasers with high performance and wide tuning range because of long output wavelength, wide absorption band and emission band. The spectral and thermodynamic characteristics of Fe:ZnS/ZnSe are introduced. The latest development of Fe:ZnS/ZnSe at low temperature and room temperature is reviewed. Scientific challenges of Fe:ZnS/ZnSe laser in power, energy enhancement and room temperature operation are also analyzed.

Key words: lasers; solid-state lasers; middle-infrared band; Fe:ZnS/ZnSe; high performance

引言

高性能的中红外激光在军事、民用及科学研究上的重大应用前景使其成为国际激光领域的研究热点^[1]。在新一代光电制导和光电对抗领域, 第4代中红外波段凝视成像制导技术可以显著提高红外制导的灵敏度和抗干扰能力, 是未来精密武器复合制导的主要发展方向之一。另一方面, 中红外波段存在水的强吸收峰, 且覆盖大气的关键传输窗口, 因此又被广泛应用于气候监测、生物检测以及医疗应用领域。2013年, WANG 等人指出: 宽带红外光谱包含许多分子的基本特征振动峰, 处于“分子指纹”区, 其必将成为光

学检测和化学成分分析中独特且强有力的工具^[2]。

目前国际上获得中红外激光的主要技术路线有: 化学激光器(主要是氟化氢、氟化氙)^[3-4]、自由电子激光器^[5]、半导体激光器^[6]、固体(包括光纤)激光器 + 光学参量振荡器(optical parametric oscillator, OPO)^[7-10]和通过固体激光器直接获得中红外激光输出^[11]。其中, 化学激光器体积庞大、维护复杂且一般会产生有毒的化学副产品; 自由电子激光器体积庞大、价格昂贵; 半导体量子级联激光器(quantum cascade lasers, QCL)产生的中红外激光存在光束质量差、输出功率低且工艺复杂等问题; 通过 OPO 获得的中红外激光属于闲置光, 转换效率低且系统结构较复杂。而通过激光二极管(laser diode, LD)抽运稀土或过度金属离子掺杂的固体激光介质产生中红外激光的技术路线具有结构紧凑灵活、输出波长多样、价格较为低廉且具有高功率、高能量输出能力等优点, 是当前最有发展前途的技术路线之一。

通过固体激光器直接获得中红外激光输出的一个

基金项目: 上海市高校青年教师培养计划资助项目 (ZZGCD15082)

作者简介: 程小劲(1978-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事固体激光器及其相关技术研究。

E-mail: xjcheng@sues.edu.cn

收稿日期: 2017-04-30; 收到修改稿日期: 2017-06-05

关键问题是固体激光介质,在中红外波段,人们的研究热点主要集中在“与钛宝石在中红外波段的性能非常类似”的掺杂过渡金属离子(Cr, Fe, Co等)的宽禁带II-VI族硫化物上(ZnS, ZnSe等)^[12-14]。与氟化物相比,过度金属离子掺杂的 ZnS/Se 具有声子能量低、吸收和发射截面大的特点。Cr, Co 和 Fe 在 ZnS/ZnSe 中的发光波长分别为 2μm~3μm, 3μm~4μm 和 3.5μm~5.5μm, 因此, Cr, Co 和 Fe 掺杂的 ZnS/ZnSe 的激光波长可以覆盖整个中红外波段。其中, Fe 的发光波长为 3μm~5μm, 因此 Fe:ZnS/ZnSe 是实现高功率、高能、宽调谐 3μm~5μm 激光输出的最有效激光介质之一^[15-16]。

1 Fe:ZnS/ZnSe 的光谱和热特性

材料的吸收截面、发射截面、荧光寿命、热导率等光谱和热动力学特性对激光器的输出性能有极大影响。国内外的许多研究人员都对 Fe:ZnS/ZnSe 的吸收和发射光谱进行了独立的测试。图 1 所示的是 MYOUNG 等人的测试结果。在常温下, Fe:ZnS 和 Fe:ZnSe 有着宽的吸收带和发射带, Fe:ZnSe 的吸收截面和发射截面峰值分别在 3μm 和 4.3μm 附近, 而 Fe:ZnS 的吸收和发射截面峰值要略小于 Fe:ZnSe。宽的吸收带使得 Fe:ZnS/ZnSe 激光器在抽运源的选择上范围较广, 而宽的发射带非常有利于获得宽调谐的激光输出^[17]。

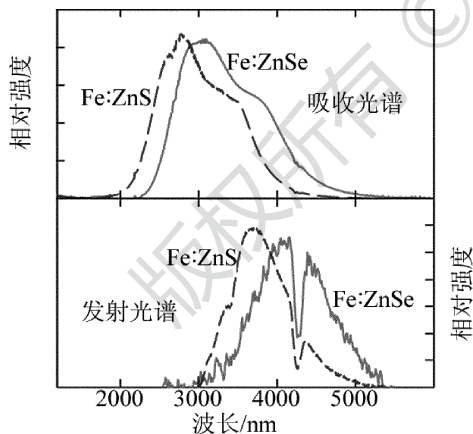


图1 室温下 Fe:ZnS 和 Fe:ZnSe 的吸收和发射光谱

Fe²⁺ 离子的荧光寿命是影响 Fe:ZnS/ZnSe 的激光性能的另一个重要参量, 由于存在多声子淬灭效应, Fe²⁺ 离子的荧光寿命随温度升高而迅速下降。许多研究人员都对 Fe:ZnS/ZnSe 在不同温度下的荧光寿命做了较为系统的测试, 由于被测的 Fe:ZnS/ZnSe 材料的制备质量及掺杂工艺有所差别, 得到的数据也有所差异。图 2 为 MIROV 等人的测试数据^[11]。在 100K 温度下 Fe:ZnSe 的荧光寿命约为 57μs, 随着温度的升高,

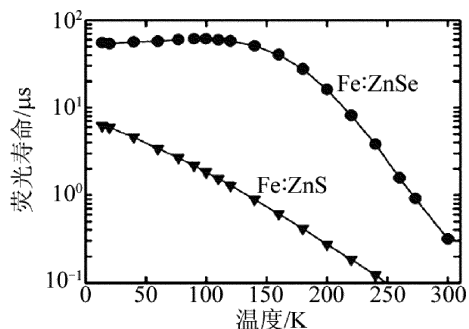


图2 Fe:ZnS 和 Fe:ZnSe 在不同温度下的荧光寿命

荧光寿命迅速降低, 300K 时, Fe:ZnSe 的荧光寿命降为 0.4μs, Fe:ZnS 的荧光寿命要明显低于 Fe:ZnSe, 在接近 0K 时, 其荧光寿命约为 6.2μs。

激光介质的散热对于固体激光器, 尤其是高功率高能量固体激光器至关重要。热导率 κ 是影响激光介质内热分布的重要参量, 以传统的棒状激光介质为例, 激光棒的中心温度 T_0 与棒外表面的温度 $T_{r,0}$ 之差可以用下式表示^[18]: $T_0 - T_{r,0} = P_a / (4\pi\kappa L)$ (1) 式中, P_a 为激光棒内需要散的总热量, L 为棒的长度。由(1)式可知, 在抽运功率和激光介质尺寸确定的条件下, 热导率越高, 激光棒内的温差越小, 而温差的大小又直接决定了热应力和热致双折射, 因此热导率的大小对于固体激光器的热效应有极大影响, 进而影响激光器的输出效率和光束质量。ZnSe 和 ZnS 的热导率会随着温度的上升而下降。俄罗斯的 LUGUEVA 等人将 ZnS/ZnSe 样品密封在一个真空容器中, 测试并计

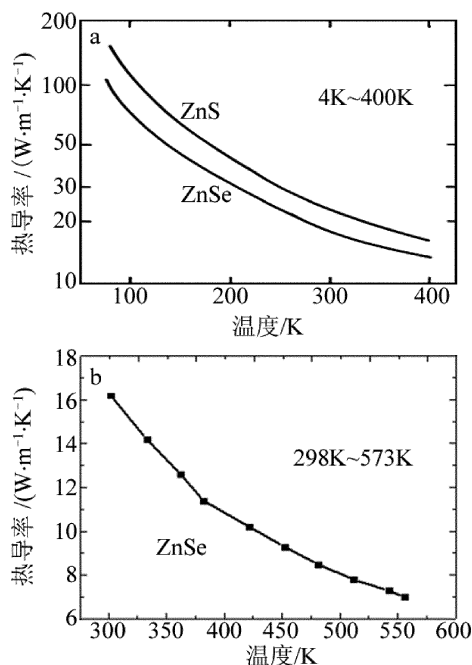


图3 不同温度下 ZnS/ZnSe 的热导率

算了 4K ~ 400K 温度下的 ZnS/ZnSe 的热导率^[19], 如图 3a 所示。在低温下 ZnS/ZnSe 的热导率要明显高于常温下的热导率。山东大学的 YANG 博士在其博士论文里面通过测量 ZnSe 的热扩散系数, 计算了 298K ~ 573K 范围内 ZnSe 的热导率^[20], 如图 3b 所示。对比两人的计算结果, 在 300K 附近 ZnSe 的热导率的值是比较一致的, 掺杂 Fe²⁺ 离子后, Fe:ZnS/ZnSe 的热导率会随着掺杂浓度的增高而降低。

2 Fe:ZnS/ZnSe 材料的制备

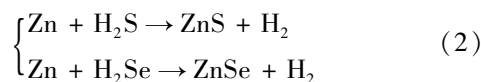
激光材料是激光技术的核心和基础, ZnS/ZnSe 高温挥发严重且存在相变, 其中 ZnSe 的相变温度约为 1425℃, ZnS 的相变温度约为 1020℃, 所以无法用传统的提拉法单晶生长技术来获得高质量晶体。目前 ZnS/ZnSe 的制备方法主要有热压法和气相沉积法, 其中, 气相沉积法又分为物理气相沉积法 (physical vapor deposition, PVD) 和化学气相沉积法 (chemical vapor deposition, CVD)^[21]。

热压法制备 ZnS/ZnSe 主要包括粉末的制备和高温挤压成形两个过程, 其中 ZnS/ZnSe 粉末的制备需要先用还原氨 (NH₂ · NH₂) 产生 ZnS/ZnSe · N₂H₄ 沉淀, 然后将其与醋酸反应并通过加热去除醋酸盐杂质。将制备好的粉底放入真空炉 (一般会加入氮气) 中加热、加压, 从而使微晶粒子挤压和再分布, 排出粒子中的微气泡。热压法制备 ZnS/ZnSe 的主要问题是粉底的提纯时会引入杂质, 真空热压后不可避免存在微气孔, 并且热压中模具与衬底分离时的巨大应力会在 ZnS/ZnSe 表面产生微裂纹, 这些都会增加 ZnS/ZnSe 的散射损耗。

PVD 法通过控制气化温度来提纯原材料, 其制备 ZnS/ZnSe 的主要流程包括: 先将粉末状 ZnS/ZnSe (固相) 在真空中加热到气相, 当气相的 ZnS/ZnSe 遇到温度较低的衬底后会在衬底上沉积成晶体 (固相)。PVD 法工艺较为简单, 但制备出来的 ZnS/ZnSe 的纯度较差。

CVD 法是目前制备高质量 ZnS/ZnSe 的主要方法, 这种方法将原材料制成多种高纯度的气相物质, 并使它们在一定的温度和压力下进行气相反应, 气相反应生成物沉积在衬底上, 从而形成一定尺寸的晶体。利用此方法制备 ZnS/ZnSe 的主要流程包括: Zn 蒸汽和 H₂S (制备 ZnSe 为 H₂Se) 气体以 Ar 为载气输送到一定的温度和压力的反应室, 在衬底上实现下列气相反应, 反应生成的 ZnS/ZnSe 分子在衬底上长成 ZnS/

ZnSe 多晶体。



目前, ZnS/ZnSe 材料的制备存在的主要问题是在制备过程中易混入杂质以及微小气孔难以完全排除。原料提纯技术的改进和热等静压等烧结技术的引入使得 ZnS/ZnSe 的气孔和杂质大幅度减少, 但目前也到了一个新的瓶颈期, 因此, 寻找新的制备技术解决气孔和杂质的问题是目前 Fe:ZnS/ZnSe 激光器的研究热点。近期, 中国科学院上海光学精密机械研究所的研究人员提出高温诱导陶瓷定向生长技术, 希望能够获得与单晶质量相媲美的陶瓷 (多晶) 材料, 基本原理为: 首先将单晶和陶瓷通过光胶键合, 形成多层复合结构, 然后通过高温处理, 达到陶瓷增益层单晶化势垒, 使陶瓷沿单晶方向定向生长, 并通过合理控制诱导温度和时间, 实现陶瓷增益层完全单晶化。目前, 他们已经成功利用单晶 YAG 诱导 Yb:YAG 陶瓷, 实现 Yb:YAG 陶瓷与 YAG 单晶的无键合面高质量平面波导结构材料制备, 并获得了数十瓦激光输出, 最近正在将陶瓷定向生长技术的研究范围从近红外拓宽到中红外波段。

3 Fe:ZnS/ZnSe 激光器的最新研究进展

研究人员从 20 世纪末就开始对 Fe:ZnS/ZnSe 的激光性能开展研究。如图 2 所示, 同样温度下, Fe:ZnSe 的荧光寿命要明显大于 Fe:ZnS, 更有利于获得高能激光输出, 且在掺杂技术方面 Fe:ZnSe 要比 Fe:ZnS 成熟, 因此关于 Fe:ZnSe 的研究报道要明显多于 Fe:ZnS。此外, 由于 Fe:ZnS/ZnSe 低温下的光学和热动力学性能明显优于常温, 因此主要的研究成果都是在低温下获得的。1999 年, 美国利弗莫尔国家实验室的 ADAMS 等人利用 2.7μm 的 Er:YAG 激光器抽运 Fe:ZnSe, 在 130K 温度下, 首次获得了最大单脉冲能量 12μJ 的中红外激光输出^[22]。自此以后, 关于 Fe:ZnS/ZnSe 在中红外波段的激光输出性能的报道不断出现。美国 Alabama 大学的 MIROV 课题组长期从事中红外激光器的研究, 是在 Fe:ZnSe 领域取得较多研究成果的课题组之一。2015 年, 该课题组报道了利用闪光灯抽运的 Er:YAG 激光器为抽运源 (中心波长 2.94μm, 脉冲宽度 250μs), 在低温条件下, 通过 Fe:ZnSe 获得了重复频率 100Hz、单脉冲能量 0.35J (平均功率为 35W) 的中红外激光输出, 波长可调范围为 3.88μm ~ 4.17μm, 脉冲宽度约为 150μs, 这是目前关于 Fe:ZnSe 激光器的最高平均功率的报道^[11,23]。俄罗斯 Lebedev 物理研究所的 KO-

ZLOVSKY 课题组是另一个在 Fe:ZnS/ZnSe 领域取得较好研究成果的团队:2013 年,采用 $2.94\mu\text{m}$ 的 Er:YAG 激光器抽运 Fe:ZnSe,在单次运转和 85K 低温条件下获得最高脉冲能量 2.1J、输出波长 $4.1\mu\text{m}$ 的激光输出,光光效率达到 35%^[24];2015 年,利用 Er:YAG 激光器作为抽运源,在 85K 的低温下,他们将单次运转下的脉冲输出能量提高到了 4.9J^[25];2016 年他们又将单次运转下的脉冲输出能量提高到 10.6J^[26],这是目前关于 Fe:ZnSe 激光器的最高单脉冲能量的报道。在 Fe:ZnS 激光器方面,KOZLOVSKY 课题组在 2015 年利用与 Fe:ZnSe 激光器相同的抽运源和冷却条件,在 85K 下获得了 3.25J 的单脉冲能量输出^[26]。

Fe:ZnS/ZnSe 的光学和热动力学特性使其更容易在低温下获得较高的功率和能量输出,然而室温运转或接近室温运转更符合中红外激光实际应用的客观需求。因此研究人员一直致力于提高室温下 Fe:ZnS/ZnSe 的激光性能。2011 年,MIROV 课题组的 MYOUNG 等人采用 $2.8\mu\text{m}$ 的 Er:Cr:YSGG 激光器作为抽运源,在室温下获得了脉冲能量 43.6mJ、输出波长 $4.37\mu\text{m}$ 的激光输出^[27]。KOZLOVSKY 课题组利用与低温 Fe:ZnS/ZnSe 激光器相同的抽运条件和结构,在室温下获得了 53mJ 的单脉冲能量输出^[25],为了提高室温下的脉冲输出能量,他们改用可以提供窄脉冲宽度的氟化氢(HF)激光器作为抽运源,利用单晶 Fe:ZnSe 为激光介质,获得了 1.2J 的单脉冲能量输出^[26]。

在连续运转的 Fe:ZnS/ZnSe 方面,由于缺乏有效的抽运源,进展比较缓慢。2013 年,FEDOROV 等人利用 Cr:ZnSe 激光器作为抽运源,在 77K 时获得了 1.5W 的 $4.1\mu\text{m}$ 连续 Fe:ZnSe 激光输出,这是迄今为止报道的 Fe:ZnSe 连续激光输出的最高功率指标^[28]。

在国内,受限于 Fe:ZnS/ZnSe 材料的制备及镀膜等相关技术,Fe:ZnS/ZnSe 的研究成果较国外相对落后,已有研究主要集中在华北光电技术研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院上海硅酸盐所、中国科学院电子学研究所、哈尔滨工业大学、上海交通大学和江苏师范大学等。其中,中国科学院电子学研究所的 KE 等人利用上海光学精密机械研究所制备的 Fe:ZnSe 材料,在室温条件下获得了单脉冲能量 15mJ、中心波长 $4.3\mu\text{m}$ 的中红外激光输出,光光转换效率为 15%^[29]。哈尔滨工业大学的 YAO 等人利用 OPO 激光器输出的 1kHz、 $2.89\mu\text{m}$ 的脉冲激光抽运 Fe:ZnSe(华北光电技术研究所制备),获得了平均功率 53mW、脉冲宽度 25ns、中心波长 $4.45\mu\text{m}$ 的激光输出^[30]。

4 Fe:ZnS/ZnSe 激光器面临的主要挑战

Fe:ZnS/ZnSe 在中红外激光领域巨大的应用前景引起了国内外学者的广泛关注,并开展了相关研究,取得了一些重要的进展,但关于 Fe:ZnS/ZnSe 在中红外波段的激光性能的理论 and 实验研究还不够系统和完善,仍然存在以下瓶颈问题。

(1) 输出激光的平均功率和峰值功率急需提高。目前,Fe:ZnSe 的最高平均输出功率为 MIROV 课题报道的 35W,脉冲宽度约为 $150\mu\text{s}$;Fe:ZnSe 的最大单脉冲能量为 KOZLOVSKY 课题组在单次运转情况下得到的 10.6J,脉冲宽度为 $100\mu\text{s}$ 量级。Fe:ZnS 激光器的相应指标要更低一些。然而,针对精确制导和新型战术激光武器的战略应用需求,现有的中红外激光平均功率和峰值功率仍无法实现有效的防御和对抗。因此,发展可重复率工作的窄脉冲、高平均功率和峰值功率的中红外激光是今后 Fe:ZnS/ZnSe 激光器的一个重要研究方向。

(2) 输出激光光束质量较差。目前的研究主要集中在输出能量、功率和可调谐能力上,对输出激光的光束质量缺乏深层次的研究,这也是导致 Fe:ZnS/ZnSe 激光器实用化进度缓慢的主要原因之一。

(3) 室温和低温下 Fe:ZnS/ZnSe 的激光性能相差甚远。Fe:ZnS/ZnSe 的荧光寿命、热导率等光学和热动力学特性对温度极为敏感,造成 Fe:ZnSe 室温下的激光性能远低于低温下的激光性能。然而,室温运转或接近室温运转更符合中红外激光实际应用的客观需求,因此,提高室温条件下的 Fe:ZnSe 的激光输出性能已迫在眉睫。

这些瓶颈问题的解决离不开高性能的抽运源和高质量的 Fe:ZnS/ZnSe 激光材料。Fe:ZnS/ZnSe 在室温下荧光寿命的迅速下降使得在室温下只有通过窄脉冲的光抽运源才能形成高效振荡。因此,发展高功率、高能量、窄脉冲的 $3\mu\text{m}$ 激光器是 Fe:ZnS/ZnSe 获得高功率、高能量激光输出的前提条件。同时,激光技术的发展在很大程度上依赖于激光材料的发展,通过对制备工艺过程的改善,得到能和单晶材料质量相媲美的 Fe:ZnS/ZnSe 是另一个有效改进 Fe:ZnS/ZnSe 激光器输出性能的途径。

5 小 结

$3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 中红外激光在军事、民用及科学研究上重大的应用前景使其成为国际激光领域的研究热

点,通过 Fe:ZnS/ZnSe 获得高功率、高能量的 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 中红外激光输出是目前最受关注的技术路线。本文中总结了对激光器的性能有重大影响的吸收截面、发射截面、荧光寿命、热导率等光谱和热动力学参量。对 Fe:ZnS/ZnSe 的不同制备工艺进行了分析比较,并认为陶瓷定向生长技术可能会对 Fe:ZnS/ZnSe 的制备工艺产生重大影响。在此基础上,本文中综述了 Fe:ZnS/ZnSe 激光器的最新进展,并分析了 Fe:ZnS/ZnSe 激光器在获取更高性能中红外激光输出所面临的主要挑战和所需解决的瓶颈问题。

参 考 文 献

- [1] WON R. Shining in the mid-infrared[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(8): 457-458.
- [2] WANG C Y, HERR T, DELHAYE P, *et al.* Mid-infrared optical frequency combs at $2.5\mu\text{m}$ based on crystalline microresonators[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1345.
- [3] KARTASHOV D, ALISAUSKAS S, PUGZLYS A, *et al.* Mid-infrared laser filamentation in molecular gases[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3194-3197.
- [4] SINGHAL G, TYAGI R K, MAINI A K. Development of safe infrared gas lasers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 47(4): 56-63.
- [5] KNYAZEV B A, KULIPANOV G N, VINOKUROV N A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(5): 054017.
- [6] VIJAYRAGHAVAN K, JIANG Y, JANG M, *et al.* Broadly tunable terahertz generation in mid-infrared quantum cascade lasers[J]. *Nature Communications*, 2013, 4:2021.
- [7] WU B, KONG J, SHEN Y. High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN-based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2W at $3.82\mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1118-1120.
- [8] YAO B Q, ZHU G L, JU Y L, *et al.* A ZnGeP₂ optical parametric oscillator with mid-IR output power 3W pumped by a Tm, Ho:GdVO₄ laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(2): 024209.
- [9] XU L, ZHANG Sh Y, CHEN W B. Tm:YLF laser-pumped periodically poled MgO-doped congruent LiNbO₃ crystal optical parametric oscillators[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 743-745.
- [10] XIE Y Zh, WANG Y, DENG H Y, *et al.* Study on the Mid-infrared laser PPMgLN optical parametric oscillators[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3):368-371 (in Chinese).
- [11] MIROV S B, FEDOROV V V, MARTYSHKIN D, *et al.* Progress in mid-IR lasers based on Cr and Fe-doped II-VI chalcogenides[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 292-310.
- [12] WILLIAMS J E, FEDOROV V V, MARTYSHKIN D V, *et al.* Mid-IR laser oscillation in Cr²⁺:ZnSe planar waveguide[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 25999-26006.
- [13] MARTYSHKIN D V, GOLDSTEIN J T, FEDOROV V V, *et al.* Crystalline Cr²⁺:ZnSe/chalcogenide glass composites as active mid-IR materials[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9): 1530-1532.
- [14] MYOUNG N S, MARTYSHKIN D V, FEDOROV V V, *et al.* Mid-IR lasing of iron-cobalt co-doped ZnS(Se) crystals via Co-Fe energy transfer[J]. *Journal of Luminescence*, 2013, 133(1): 257-261.
- [15] EVANS J W, BERRY P A, SCHEPLER K L. A broadly tunable continuous-wave Fe:ZnSe laser[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2013, 8599:85990C.
- [16] MIROV S B, FEDOROV V V, MARTYSHKIN D V, *et al.* Progress in Cr and Fe doped ZnSe and ZnS polycrystalline materials and lasers [C]//Advanced Solid State Lasers, 2014. New York, USA: Optical Society of America, 2014: AM4A.6.
- [17] MYOUNG N S, FEDOROV V V, MIROV S B, *et al.* Temperature and concentration quenching of mid-IR photoluminescence in iron doped ZnSe and ZnS laser crystals[J]. *Journal of Luminescence*, 2012, 132(3): 600-606.
- [18] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. New York, USA: Springer, 2013:407-412.
- [19] LUGUEVA N V, LUGUEV S M. The effect of structural defects on the thermal conductivity of ZnS, ZnSe, and CdTe polycrystals[J]. *High Temperature*, 2004, 42(1): 54-59.
- [20] YANG Y J. Study on growth properties of several important infrared optical crystals[D]. Ji'nan: Shangdong University, 2012:87-89 (in Chinese).
- [21] FU L G. Study on the preparation process of CVD ZnSe[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2013:11-18 (in Chinese).
- [22] ADAMS J J, BIBEAU C, PAGE R H, *et al.* $4.0 \sim 4.5\mu\text{m}$ lasing of Fe:ZnSe below 180K, a new mid-infrared laser material[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(23): 1720-1722.
- [23] MIROV S B, FEDOROV V V, MARTYSHKIN D V, *et al.* High average power Fe:ZnSe and Cr:ZnSe mid-IR solid state lasers [C]//Advanced Solid State Lasers, 2015. New York, USA:Optical Society of America, 2015: AW4A.1.
- [24] FROLOV M P, KOROSTELIN Y V, KOZLOVSKY V I, *et al.* Study of a 2J pulsed Fe:ZnSe $4\mu\text{m}$ laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(12): 125001.
- [25] VELIKANOV S D, ZARETSKIY 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.
- [26] KOZLOVSKY V I, KOROSTELIN Y V, PODMARKOV Y P, *et al.* Middle infrared Fe²⁺:ZnS, Fe²⁺:ZnSe and Cr²⁺:CdSe lasers; new results[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 740(1): 012006.
- [27] MYOUNG N S, MARTYSHKIN D V, FEDOROV V V, *et al.* Energy scaling of $4.3\mu\text{m}$ room temperature Fe:ZnSe laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(1): 94-96.
- [28] FEDOROV V V, MARTYSHKIN D V, MIRROV M, *et al.* Fe-doped II-VI mid-infrared laser materials for the 3 to $8\mu\text{m}$ region [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 23(4):7946-7956.
- [29] KE Ch J, WANG D L, WANG X Y, *et al.* Mid-infrared Fe:ZnSe laser with output energy of 15mJ at room temperature[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2):219004 (in Chinese).
- [30] YAO B Q, XIA Sh X, YU K K, *et al.* Mid-infrared lasers output is achieved from Fe:ZnSe [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1):119001 (in Chinese).