

文章编号: 1000-7032(2022)12-1905-10

直接泵浦中红外 Dy:PbGa₂S₄ 激光器研究进展

胡 萍^{1,2}, 刘晓萌^{2*}, 田 颖¹, 张圣梓², 汪洪军²

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310016;

2. 中国计量科学研究院 热工计量科学研究所, 北京 100029)

摘要: 3~5 μm 中红外激光在光电对抗、激光医疗、有害气体探测等领域具有重要的应用。以稀土离子掺杂的晶体作为增益介质可实现中红外激光输出,其中掺掺杂硫镓铅(Dy:PbGa₂S₄, Dy:PGS)晶体具有相对较低的声子能量和较大的电子能隙,是一种性能优良、具有潜在应用价值的中红外激光介质材料。本文综述了中红外 Dy:PGS 固体激光器的研究进展,重点介绍了在不同波长泵浦下的连续或脉冲激光输出特性,并对其未来发展方向进行了探讨。

关键词: 激光器; 中红外激光; Dy:PbGa₂S₄; 直接泵浦

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20220203

Research Progress of Directly Pumped Mid-infrared Dy:PbGa₂S₄ Lasers

HU Ping^{1,2}, LIU Xiao-meng^{2*}, TIAN Ying¹, ZHANG Sheng-zhi², WANG Hong-jun²

(1. School of Optics and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310016, China;

2. Institute of Thermal Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

* Corresponding Author, E-mail: liuxiaom@nim.ac.cn

Abstract: Mid-infrared laser at 3~5 μm has important applications in the fields of photoelectric countermeasures, laser medical treatment, harmful gas detection. Rare earth ion doped crystal can be used as gain medium to realize mid-infrared laser output. Dysprosium doped lead thiogallate(Dy:PbGa₂S₄, Dy:PGS) crystal is a mid-infrared laser medium material with excellent performance and potential application value under the advantages of relatively low phonon energy and large electron energy gap. In this paper, the research progress of mid-infrared Dy:PGS solid state lasers is reviewed, with emphasis on the output characteristics of continuous or pulsed lasers pumped at different wavelengths, and its future development directions are discussed.

Key words: lasers; mid-infrared laser; Dy:PbGa₂S₄; directly pumped

1 引 言

3~5 μm 中红外激光波长位于大气传输窗口,在大气环境中传输时其能量衰减较小。许多气体

分子的基频特征吸收位于 3~5 μm 中红外波段,其识别需要发展紧凑的激光光源。这些中红外激光光源在光电对抗、激光医疗、有害气体探测等领域具有重要的应用^[1-7]。近年来,中红外激光正在逐

收稿日期: 2022-05-18; 修订日期: 2022-06-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFF0604004); 国家市场监督管理总局科技计划项目(2020MK157)资助

Supported by National Key R&D Program of China(2021YFF0604004); State Administration for Market Regulation Science and Technology Program(2020MK157)

渐成为相关领域的研究热点^[8]。

获得 3~5 μm 中红外激光输出的方式大致可以分为增益介质型和非线性频率转换型两种。增益介质型主要包括量子级联激光器、气体激光器(泛频 CO 激光器、DF 激光器)、离子掺杂的固体或光纤激光器等;非线性频率转换型主要通过非线性频率转换(包括光参量振荡、光参量放大、倍频等)将其他波长转化到中红外波段。量子级联激光器(QCL)体积很小、光束质量极好,可以覆盖 3 μm 以上所有中红外波长,是目前最有前景的紧凑型中红外激光器之一^[9-10]。2019年,Zhou等^[11]报道的 QCL 的 8 μm 输出已达到 8.2 W。2020年,Dudelev等^[12]研究了室温下量子阱数对 4.5~4.6 μm QCL 输出功率的影响,在量子阱数为 30 时 QCL 双面的激光峰值输出功率达到 10 W。中红外气体激光器输出功率大且光束质量高,有一定的波长调谐能力,CO 气体激光器已实现千瓦级平均功率的 4.9~5.7 μm 激光输出^[13]。离子掺杂型光纤激光器体积小、结构紧凑、输出光束质量高、作用距离长^[14]。目前,基于氟化物光纤输出的最长连续光纤激光器波长为 3.92 μm ^[15],硫系玻璃光纤输出的最长连续波长达到了 5.38 μm ^[16]。非线性激光器结构紧凑,输出波长可调谐,转化效率高,且晶体本身并不参与能量交换,因而没有量子亏损,产热很少^[17]。2021年,刘高佑等^[18]采用 ZnGeP_2 作为非线性光学频率转换晶体,实现了平均功率为 161 W、波长为 3~5 μm 的中红外激光输出,斜率效率达到 63.1%。目前,非线性激光器是我国装备的主流高功率中红外激光器,在航空航天等领域发挥着重要作用。

离子掺杂固体激光器主要的掺杂离子有两大类。一类是使用过渡金属离子,最主要的代表是掺铁硒化锌($\text{Fe}:\text{ZnSe}$)激光器^[19-20]。 Fe^{2+} 在 4~6 μm 范围内荧光带宽宽且强,同时其增益带宽也较宽,是获得可调谐中红外激光的良好材料。但问题是 Fe^{2+} 的 ${}^5\text{T}_2$ 能级寿命强烈依赖于温度,并且在温度超过 100 K 时迅速缩短,在室温下仅 300 ns^[21],这导致 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 激光器基本只能在超低温下工作。在室温条件下目前合适的泵浦源仅限于 HF 激光器,而 HF 激光器本身体积庞大,结构复杂,造价昂贵。而且 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 激光器激光输出性能受入射光斑面积的影响较大,入射光斑面积越大, $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 增益介质吸收效率就越高;但增大入射光斑

面积会降低晶体损伤阈值,使增益晶体更容易被泵浦光照射损伤;同时也会引起横向寄生振荡,非激光输出方向的横向寄生振荡会消耗大量的反转粒子数,而反转粒子数的无用消耗会导致激光输出性能降低。目前的尝试也都是基于增大入射光斑面积的同时不降低晶体损伤阈值、阻止横向寄生振荡。

另一类是使用稀土离子,最主要的代表是掺掺杂硫镓铅($\text{Dy}:\text{PbGa}_2\text{S}_4$, $\text{Dy}:\text{PGS}$)激光器^[22],可以在室温下获得所需的中红外波段激光,且上能级寿命长,可以被常用的 1.32 μm 的 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器和 1.73 μm 的 $\text{Er}:\text{YLF}$ 激光器泵浦,是实现中红外小型化便携式激光输出的优良增益介质。目前,在中红外激光输出方面,由于 $\text{Dy}:\text{PGS}$ 晶体的生长技术还不够成熟,相关文章都集中在对其他中红外晶体诸如 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 的激光输出特性研究上,尚未对 $\text{Dy}:\text{PGS}$ 晶体以及对应激光器进行系统梳理并对其中的关键技术进行分析^[19-22]。

本文主要介绍了直接泵浦 $\text{Dy}:\text{PGS}$ 晶体得到中红外激光的发展过程和研究现状,分析限制激光输出性能的主要因素,提出未来直接泵浦的中红外 $\text{Dy}:\text{PGS}$ 固体激光器的发展趋势。

2 Dy:PGS 晶体的基本性质

增益介质 $\text{Dy}:\text{PGS}$ 的基质为硫镓铅(PbGa_2S_4)晶体,简称为 PGS,熔点约 890 $^\circ\text{C}$,随着厚度的增加,颜色从黄色变为黄棕色^[23],不潮解^[24]。属于正交晶系(正双轴晶体),空间群为 $Fddd$ ^[25-26],具有明显的(100)解理面,晶格参数 $a = 2.073 \text{ nm}$, $b = 2.04 \text{ nm}$, $c = 1.224 \text{ nm}$ ^[27-28],最大折射率对应平行于晶体 b 轴的偏振^[29]。

Dy^{3+} 的光谱如图 1^[30-32]所示。由于 PGS 晶体是双轴晶体,所以掺杂 Dy^{3+} 的 PGS 晶体能观察到两种不同的吸收光谱,如图 1(a)^[30],分别对应于沿快轴(平行于 c 轴)和慢轴(垂直于 c 轴)的偏振光。1.32 μm 处的最强吸收峰对应 ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{9/2} + {}^6\text{F}_{11/2}$ 跃迁,快轴对 1.32 μm 的吸收接近慢轴的 1.5 倍。1.73 μm 处的吸收峰对应 ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$ 跃迁,在这个波段快慢轴的偏振吸收差异不明显。最佳吸收峰位于 1.32 μm 附近,其次就是 1.73 μm ,目前主要使用的泵浦源是中心波长为 1.32 μm 的 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器和 1.73 μm 的 $\text{Er}:\text{YLF}$ 激光器。也有少数研究者尝试过使用 1.66 μm 的 $\text{Er}:\text{YAP}$ 激光器作为泵浦源,以及使用 1.7 μm 的二极管激光器

直接泵浦。温度依赖吸收光谱(图 1(b)^[31])显示,在温度更低时吸收峰的强度增加并变窄,峰的位置无明显变化。

图 1(c)为能级结构图,与 4.3 μm 辐射对应的是 ${}^6\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ 跃迁,可以被 1.32 μm 间接激发或 1.73 μm 波长直接激发。在室温下,因为激光上能级 ${}^6\text{H}_{11/2}$ 寿命约为 2 ms,而激光下能级 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 寿命约为 6 ms,是上能级寿命的 3 倍,故 4.3 μm 跃迁是自终止的。

尽管 Dy³⁺ 对 ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{9/2} + {}^6\text{F}_{11/2}$ (1.32 μm) 的跃迁有很强的吸收,但是由于 ${}^6\text{H}_{9/2} + {}^6\text{F}_{11/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$ (5.4 μm) 能级的分支比仅 1% (${}^6\text{H}_{9/2}$ 量子效率

62%), 所以泵浦 ${}^6\text{H}_{9/2}$ 能级的效率不会太高。而 ${}^6\text{H}_{9/2} + {}^6\text{F}_{11/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ (2.4 μm) 的分支比约为 12%, 导致 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 能级粒子数不断积累,大幅降低了 ${}^6\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ (4.3 μm) 跃迁的概率。为了提高激光效率,对 ${}^6\text{H}_{11/2}$ 能级直接激发。在 ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$ 的吸收峰 1.73 μm 处,尽管晶体对 1.7 μm 光的吸收率仅为 1.32 μm 的 25%,但是所有被吸收的泵浦光都会被 ${}^6\text{H}_{11/2}$ 能级吸收,所以使用 1.73 μm 泵浦激光的输出效率比 1.32 μm 要高。而且由于空气中 CO₂ 气体在 4.2 μm 存在吸收,导致 Dy:PGS 晶体的荧光光谱(图 1(d)^[32]) 在峰值附近出现剧烈变形。

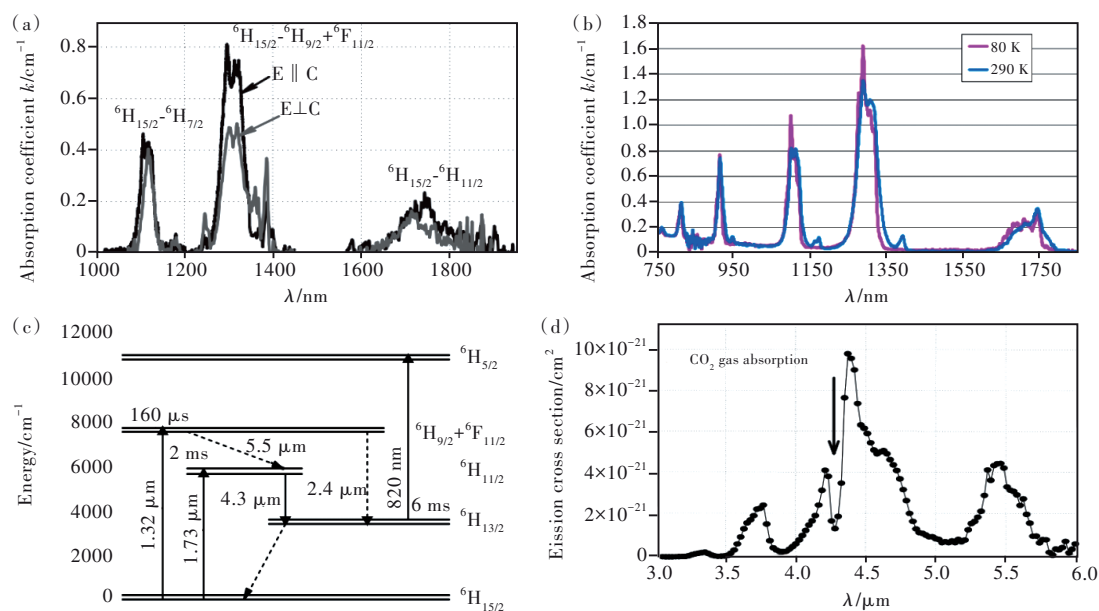


图 1 Dy:PGS 晶体的室温偏振吸收光谱(a)^[30]、温度依赖吸收光谱(b)^[31]、能级跃迁(c)和荧光光谱(使用 3.5~6.0 μm 滤光片)(d)^[32]。

Fig. 1 Room temperature polarized absorption spectra (a), temperature-dependent absorption spectra (b), energy level transition (c) and fluorescence spectrum (d) of Dy:PGS crystal (using 3.5~6.0 μm filter).

3 Dy:PGS 单晶制备方法

截至目前,关于 Dy:PGS 单晶生长的报道数量较少,最常使用的是垂直布里奇曼(Bridgman)法,极少数使用竖直梯度冷凝法,这两种方法都是在晶体合成过程中直接掺杂 Dy³⁺ 离子。但是,在 Dy:PGS 激光器中用到的 Dy:PGS 激光晶体基本都是使用布里奇曼法生长。

布里奇曼法生长 Dy:PGS 单晶需要在高温、高压的条件下实施,分区进行温度控制,制备条件较为复杂。目前存在的主要问题在于制备多晶时,硫在高温下产生的蒸汽压很高,会导致石英坩埚爆炸。且中间反应过程中产生的二元硫熔点很

高,包围着熔融铅,阻止了其与其他元素或金属进一步反应。高纯度 PbGa₂S₄ 多晶材料很难合成,进而影响到单晶的合成难度。

竖直梯度冷凝法是将合成的 Dy:PGS 多晶装入石英生长坩埚中,抽真空后封结。随后把石英坩埚放到竖直梯度冷凝晶体生长炉中,在晶体熔点附近开始晶体生长。在这个过程中不需要对生长炉进行分区控温,与布里奇曼法相比制备过程相对简单,但生长出来的单晶会有一些微气泡。

2015 年,潘世烈等^[33]通过高温固态反应得到了 PGS 单晶。2020 年,吴海信等^[34]在压力辅助法合成高纯度多晶材料的基础上,采用布里奇曼法

成功制备了 $\varphi 21\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的 Dy:PGS 单晶,在 0.5~12.4 μm 波段内具有良好的透光率。同年,方攀等^[35]采用竖直梯度冷凝法成功制备了大尺寸、高品质、掺杂浓度为 0.7% 的 Dy:PGS 单晶,也是首次报道采用竖直梯度冷凝法成功生长的 Dy:PGS 单晶,尺寸达到 $\varphi 27\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,在 3~5 μm 波段内光学透过率大于 60%,如图 2 所示。

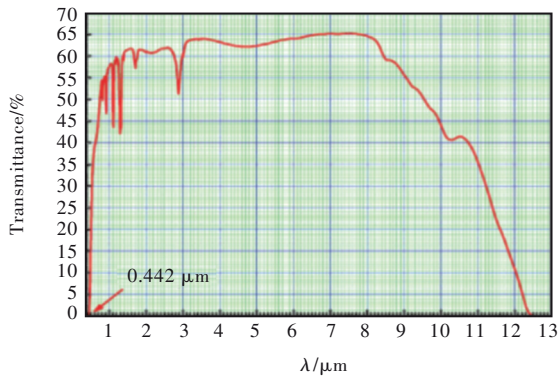


图 2 Dy:PGS 晶体透过光谱^[35]

Fig.2 Transmission spectrum of Dy:PGS crystal^[35]

4 Dy:PGS 激光器研究进展

目前,已经有研究小组使用 Dy:PGS 晶体作为增益介质实现了中红外激光输出,连续输出与脉冲输出以及调谐输出均有涉及。表 1 列举了部分 Dy:PGS 固体激光器的研究工作,并在后文中选取了其中有代表性的工作进行进一步阐述。

虽然早在 1999 年,Neumann 等^[25]就开始了 PGS 晶体的红外晶格振动研究,但 Dy:PGS 激光器起步较晚。一直到 2005 年,Basiev 等^[32]才在没有氮气保护的条件下,通过使用 1.32 μm Nd:YAG 激光器泵浦 Dy:PGS 晶体首次观察到 $\text{Dy}^{3+}:{}^6\text{H}_{11/2}\rightarrow{}^6\text{H}_{13/2}$ 跃迁产生的 4.33 μm 脉冲激光振荡。

2011 年,Sulc 等^[42-43]用 1318 nm 的 Nd:YAG 激光器泵浦 Dy:PGS 晶体,在泵浦光占空比为 50%、输出镜反射率 95% 时,最大脉冲输出能量可达到 0.37 mJ@4.3 μm 。使用不同反射率的输出镜,斜效率最大可达到 3.8%^[42]。同时,通过 1.32 μm 泵

表 1 中红外 Dy:PGS 激光器研究进展

Tab. 1 Research progress of mid-infrared Dy:PGS lasers

年份	泵浦源	增益介质	运转方式	输出特性	脉宽	斜效率	参考文献
2005 年	Nd:YAG@1.32 μm	Dy:PGS 晶体,厚 7 mm	脉冲	0.32 mJ	200 μs	0.9%@4.33 μm	[32]
2008 年	LD@1.32 μm	Na ⁺ 共掺杂 Dy:PGS	脉冲	0.34 mJ	300 μs	1%@4.33 μm	[36]
2008 年	Nd:YAG@1.32 μm	Na ⁺ 共掺杂 Dy:PGS	脉冲	0.8 mJ	200 μs	1.5%@4.33 μm	[29]
2009 年	Nd:YAG@1.32 μm	K ⁺ 共掺杂 Dy:PGS	脉冲	0.34 mJ	300 μs	1%@4.33 μm	[30]
2009 年	Nd:YAG@1.32 μm	Dy:PGS 晶体,长 16.6 mm	脉冲	42 μJ	—	0.08%@4.3 μm	[30,37]
	Er:YAP@1.66 μm			57 μJ		0.15%@4.3 μm	
2010 年	Nd:YAG@1.32 μm	Dy:PGS 晶体	脉冲	90 μJ	—	3.2%@4.3 μm	[38]
2010 年	Nd:YAG@1.32 μm	Na ⁺ 共掺杂 Dy:PGS	脉冲	7.5 mJ	—	2%@4.3 μm	[39]
2010 年	Nd:YAG@1.32 μm	Na ⁺ 共掺杂 Dy:PGS	脉冲	15 mJ	800 μs	4%@4.3 μm	[40]
2010 年	Er:YAP@1.66 μm	Dy:PGS 晶体,厚 13.2 mm	脉冲	275 μJ	200 μs	1.38%@4.33 μm	[41]
2011 年	Nd:YAG@1.32 μm	Dy:PGS 晶体, $\varphi 18.7\text{ mm}\times 13.2\text{ mm}$	脉冲	0.37 mJ	9.5 ms	3.8%@4.33 μm	[42]
2011 年	Nd:YAG@1.32 μm	Dy:PGS 晶体,2.6 mm \times 5.7 mm \times 12.2 mm	连续	8.9 mW	—	4.1%@4.31 μm	[43]
2011 年	Er:YLF@1.73 μm	Dy:PGS 晶体, $\varphi 18.9\text{ mm}\times 14.5\text{ mm}$	脉冲	3.1 mJ	80 μs	8%@4.33 μm	[44]
2011 年	Er:YLF@1.73 μm	Dy:PGS 晶体, $\varphi 18.9\text{ mm}\times 14.5\text{ mm}$	脉冲	7 mJ	80 μs	8%@4.33 μm	[45]
2012 年	Er:YLF@1.73 μm	Dy:PGS 晶体, $\varphi 19.2\text{ mm}\times 16.2\text{ mm}$	脉冲	5.07 mJ	80 μs	6%@4.32 μm	[46]
2012 年	Er:YLF@1.73 μm	Dy:PGS 晶体, $\varphi 19.2\text{ mm}\times 16.2\text{ mm}$	脉冲	7 mJ	120 μs	8%@4.32 μm	[47]
				2.6 mJ	—	2.6%@4.28~4.34 μm	
2013 年	LD@1.7 μm	Dy:PGS 晶体,2.5 mm \times 5.7 mm \times 12.2 mm	脉冲	475 μJ	4.5 ms	9%@4.3 μm	[48]
			连续	67 mW	—	8%@4.3 μm	
2014 年	LD@1.7 μm	Dy:PGS 晶体	脉冲	475 μJ	—	9.7%@4.3 μm	[49]
			连续	48 mW	—	@4.3 μm	
2014 年	Nd:YAG@1.32 μm	Dy:PGS 晶体, $\varphi 19.2\text{ mm}\times 16.2\text{ mm}$	脉冲	107 μJ	—	0.35%@5.44 μm	[31]
				2.35 mJ	—	8.5%@2.5 μm	
				7 mJ	—	3%@4.3 μm	
2016 年	Nd:YAG@1.32 μm	Dy:PGS 晶体, $\varphi 19\text{ mm}\times 16\text{ mm}$	脉冲	0.45 mJ	80 μs	0.5%@5.44 μm	[50]
				2.25 mJ	125 μs	8.5%@2.44 μm	
2016 年	LD@1.32 μm	Dy:PGS 晶体, $\varphi 19\text{ mm}\times 16\text{ mm}$	连续	9 mW	—	1%@4.32 μm	[50]
2016 年	LD@1.7 μm	Dy:PGS 晶体,长 12 mm	脉冲	40 μJ	—	@4.3~4.7 μm	[51]

注:输出特性栏的脉冲激光均用单脉冲能量表示,连续激光使用输出功率表示。

浦使 ${}^6\text{H}_{13/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{5/2}$ 能级双光子吸收产生 820 nm 荧光, 能够有效缓解由于 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 能级的粒子数不断积累而导致的自终止问题, 在水冷条件下实现了 4.31 μm 连续激光输出, 输出功率达到 8.9 mW, 斜效率 4.1%^[43]。使用 1.3 μm 激光器泵浦的典型实验装置如图 3 所示^[38]。

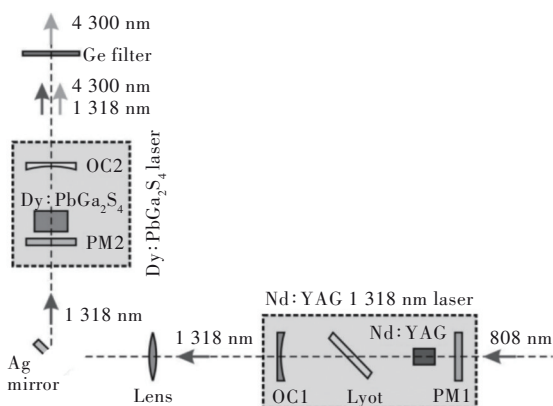


图 3 1.318 nm Nd:YAG 激光器泵浦 Dy:PGS 晶体实验装置^[38]

Fig.3 Experimental setup of 1.318 nm Nd:YAG laser pumping Dy:PGS crystal

虽然 Dy:PGS 晶体本身存在很多的激光能级跃迁, 但在之前的研究中都只激发 ${}^6\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ 能级, 理论上不同能级的跃迁都是可以实现激光输出的。2016 年, Jelinkova 等^[50]使用 1.32 μm 的 Nd:YAG 脉冲激光器泵浦 Dy:PGS 晶体, 通过只给腔镜镀特定波长的反射膜, 降低对其他可能的振荡波长的反射率, 实现了 5.4 μm 以及 2.4 μm 激光的单独输出。

在此期间, Jelinkova 等^[30, 37]还使用 1.32 μm 和 1.66 μm 的激光器作为泵浦源, 在同等条件下泵浦 Dy:PGS 晶体, 比较它们的输出特性。结果发现, 1.66 μm 的 Er:YAP 脉冲激光器与 1.32 μm 的 Nd:YAG 脉冲激光器相比, 出光阈值更低, 斜效率更高^[30, 37]。使用 1.66 μm 的 Er:YAP 脉冲激光器在室温下对 Dy:PGS 晶体进行泵浦, 通过改变输出镜的反射率和晶体的厚度, 得到最大输出能量为 275 μJ 的 4.3 μm 激光^[41]。

1.32 μm 泵浦 Dy:PGS 晶体的明显缺点是, 在没有级联激光的情况下, ${}^6\text{H}_{9/2} + {}^6\text{F}_{11/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$ 跃迁会由于泵浦和振荡波长之间存在相当大的量子缺陷而发生额外的损耗, 降低了整体振荡效率。比较图 1(c) 所示的能级跃迁, 通过 ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$ 能级的直接带内泵浦, 可以降低量子缺陷。而上面用到

的 1.66 μm 激光处在 ${}^6\text{H}_{15/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$ 吸收带的边缘, 导致晶体对该波长泵浦光的吸收极低, 再加上高折射率导致的高菲涅耳损失(约 20%), 使得吸收泵浦能量的评估非常不可靠, 影响激光效率的正确估计, 而与该跃迁匹配的波长在 1.73 μm 左右。直到 2011 年, 使用 1.73 μm 的 Er:YLF 激光器作为泵浦光对 Dy:PGS 晶体进行泵浦的研究才首次被报道, 得到最大输出能量为 7 mJ、斜效率为 8% 的 4.3 μm 近高斯分布的稳定脉冲^[45]。

但是, 对于中红外激光而言, 光束的传输也是一个比较大的问题。2012 年, Jelínková 团队^[46]针对这个问题, 提出利用镀有银涂层和环烯烃聚合物(COP)作为介电涂层的熔石英空心波导(COP/Ag 空心波导)的内部反射引导中红外光的传播。通过透镜将 4.3 μm 中红外光聚焦耦合进波导, 输入波导的中红外光为 1 mJ, 通过 103 cm 长、内径为 700 μm 的波导后, 剩余的能量和强度分别为 0.58 mJ 和 2 kW/cm², 传输效率高达 58.0%, 实验装置如图 4 所示。

同年, 该团队^[47]采用腔内以布鲁斯特角插入 Lyot 滤波片的方式, 实现了 4.28~4.34 μm 范围内的波长调谐, 线宽 60 nm。腔镜在 3.5~4.5 μm 波段范围内都存在很高的反射, 而基于双折射的 Lyot 滤波片的透射率与波长有关, 对不同的振荡波长的损耗也不同, 从而使波长可调谐, 如图 5 所示。最大输出能量达到 2.6 mJ, 对应的斜效率为 2.6%。这是首次使用 Dy:PGS 晶体进行调谐输出, 为 Dy:PGS 晶体的调谐输出奠定了实验基础。为了获得在阈值条件下 4.0 μm 左右的最短振荡波长, 去除 Lyot 滤波片, 腔镜换成仅在 3.0~4.0 μm 波段高反、在 4.3 μm 反射率 40% 的反射镜。得到的最短的振荡波长出现在 4.04 μm 左右, 即谐振腔反射镜最大反射率开始存在的波长。尽管腔镜在 4.3 μm 波段的反射率非常低, 透过损耗很大, 但是由于 Dy:PGS 晶体的优势振荡峰位于 4.3 μm , 在与附近的其他波长的竞争中处于绝对优势位置, 4.3 μm 最强荧光辐射仍然很快就建立了起来。

由于室温下激光下能级 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 寿命是激光上能级 ${}^6\text{H}_{11/2}$ 寿命的 3 倍, 故 4.3 μm 跃迁自终止的问题在使用 1.7 μm 泵浦时也同样存在, 之前的研究也只能输出脉冲激光。与之前使用 1.3 μm 泵浦 Dy:PGS 晶体、利用 ${}^6\text{H}_{13/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{5/2}$ 能级的激发态吸收

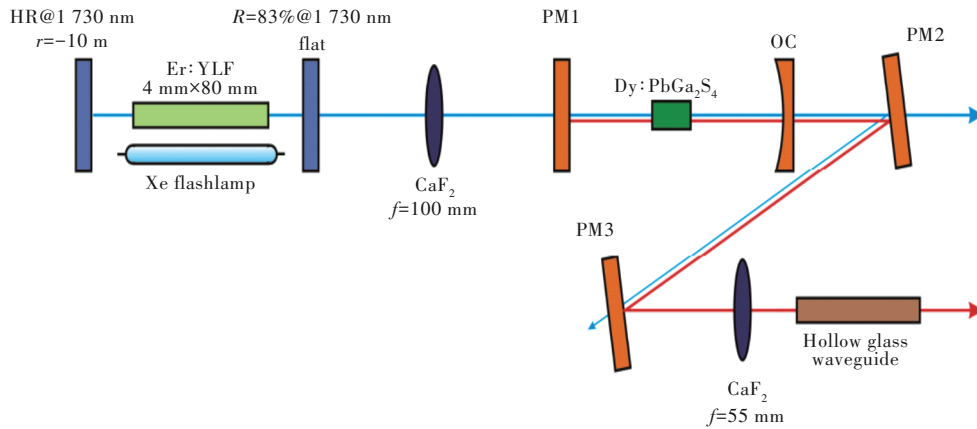


图 4 1.73 μm Er:YLF 激光器泵浦 Dy:PGS 晶体实验装置^[46]

Fig.4 Experimental setup of 1.73 μm Er:YLF laser pumping Dy:PGS crystal

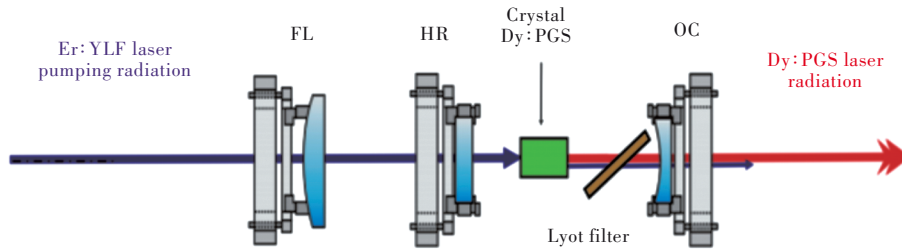


图 5 1.73 μm Er:YLF 激光器泵浦 Dy:PGS 晶体实验装置^[47]

Fig.5 Experimental setup of 1.73 μm Er:YLF laser pumping Dy:PGS crystal

产生 820 nm 荧光从而得到 4.3 μm 连续激光输出的情况类似,在 1.7 μm 直接带内泵浦的条件下, ${}^6\text{H}_{13/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{9/2}$ 能级跃迁产生 1.3 μm 荧光,减少了 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 能级的粒子数,增加了 ${}^6\text{H}_{9/2}$ 能级的粒子数, ${}^6\text{H}_{9/2}$ 能级的粒子又很快弛豫到 ${}^6\text{H}_{11/2}$ 能级,使得 ${}^6\text{H}_{11/2}$ 能级的粒子数增加,促进了 ${}^6\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ 能级跃迁,从而有效控制了自终止现象发生。而且在 1.7 μm 泵浦过程中,随着泵浦功率的增加,荧光强度近似二次方增长,表明产生 1.3 μm 荧光的非线性机制是双光子激发态吸收,这也有利于在 ${}^6\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ 跃迁中获得真正的连续波输出。

基于这一点,2013年,Jelínková等^[48]使用 1.7

μm LD 直接泵浦 Dy:PGS 晶体得到 4.3 μm 连续激光,最大输出功率可达到 67 mW,斜效率 8%,光-光效率 7%,相当于脉冲模式下的 9%,实验装置如图 6 所示。在最大输出功率下,在约 3 min 的运行期间,输出功率没有由于热效应出现而明显下降,激光输出非常稳定。输出光谱稳定在 4 317 nm,线宽为 6 nm。

2016年,他们再次采用腔内以布鲁斯特角插入 Lyot 滤波片的方式实现了 4.3~4.7 μm 范围内的波长调谐,调谐范围 400 nm^[51],这是目前泵浦 Dy:PGS 晶体得到的最大调谐范围,接近使用 1.3 μm 泵浦调谐范围 60 nm 的 7 倍。

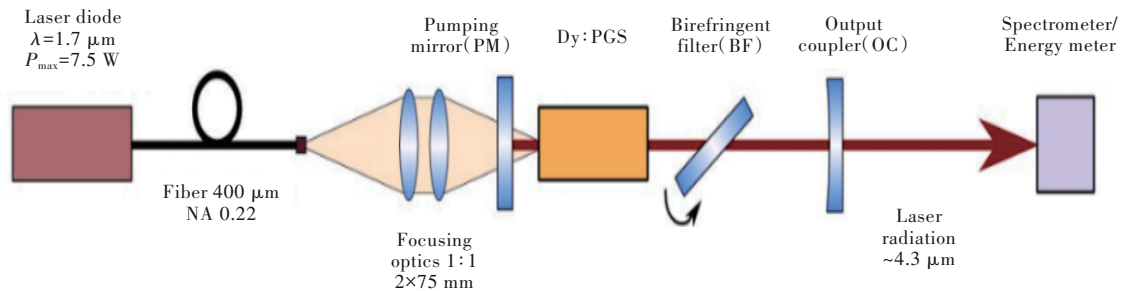


图 6 光纤耦合的 1.7 μm 二极管激光器直接泵浦 Dy:PGS 晶体实验装置^[48]

Fig.6 Experimental setup of fiber-coupled 1.7 μm diode laser directly pumping Dy:PGS crystal

另外, 由于 Pb²⁺ 和 Dy³⁺ 的离子半径差异很大 (8 倍配位为 0.129 nm 和 0.103 nm), 在 Dy³⁺ 掺杂浓度为 1% 时就已经显著降低了晶体的光学均匀性, 损害了其激光性能的重现性。而 Na⁺ 共掺杂可以减轻 Pb²⁺ 和 Dy³⁺ 之间离子半径差异较大的影响, 并有助于电荷补偿。例如, Na⁺ 在八倍配位下的离子半径为 0.116 nm, Dy³⁺ 和 Na⁺ 的离子半径 $R(\text{Dy}^{3+})/R(\text{Na}^+) = 0.89$, 掺杂 Na⁺ 可以使 Dy³⁺ 能够掺杂的浓度增加^[40], 且提高晶体的光学均匀性。而且碱性金属的共掺杂也会影响 Dy³⁺ 离子的荧光和振荡光谱, 在共掺杂晶体中, 荧光强度在 4.6~4.8 μm 光谱范围内有明显增加, 与未掺杂的相比较振荡光谱中增加了一条线^[30, 47]。

2008 年, Basiev 等^[36] 率先尝试使用 Na⁺ 共掺杂的 Dy:PGS 晶体作为增益介质, 用 1 318 nm 的 Nd:YAG 激光器抽运, 在斜效率仅 1% 的情况下, 获得 4.33 μm 和 4.7 μm 激光级联输出。同年, 该团队^[29] 使用 1 318 nm 脉冲激光器泵浦 Na⁺ 共掺杂的 Dy:PGS 晶体, 得到最大输出功率 0.8 mJ 的 4.33 μm 激光输出。

2009 年, Doroshenko 团队^[30] 使用 K⁺ 共掺杂的 Dy:PGS 晶体作为增益介质, 在 1 318 nm 脉冲激光器泵浦下, 中红外激光输出斜效率为 1%。而且在 K⁺ 共掺杂的 Dy:PGS 晶体中, 由于荧光强度在 4.6~4.8 μm 光谱范围内增加, 导致振荡光谱与没有共掺杂的相比增加了一条振荡线, 增加的振荡波长为 4.62 μm。

2010 年, 该团队^[39-40] 再次使用 Na⁺ 共掺杂的 Dy:PGS 晶体作为增益介质, 得到 4.3, 4.5, 4.6 μm 以及 5.2, 5.3, 5.4 μm 级联激光输出。⁶H_{11/2} 激光上能级主要通过 ⁶H_{9/2} 能级的无辐射跃迁填充, 从 ⁶H_{9/2} 到 ⁶H_{11/2} 能级的辐射跃迁比例只有 12%。在 4.2~4.7 μm 范围内, Dy³⁺ 离子的振荡光谱对应于级联跃迁的第二步 ⁶H_{11/2}→⁶H_{13/2}, 而 5.2~5.5 μm 的振荡对应于第一步 ⁶H_{9/2}→⁶H_{11/2} 的跃迁, 通过 ⁶H_{9/2}→⁶H_{11/2} 跃迁得到的 5 μm 激光大大加速了 ⁶H_{11/2} 能级的填充速度, 使 4 μm 激光输出的强度增大。在该过程中用到的泵浦源为输出波长 1.318 μm 的闪光灯泵浦 Nd:YAG 激光器, 采用 V

形腔双增益介质的方案, 单独控制 2 块 Nd:YAG 晶体。在一块 Nd:YAG 晶体的脉宽为 1 ms、另一块的脉宽为 1.5 ms 时, 输出脉冲能量最高, 达 7.5 mJ, 斜效率 2%, Dy:PGS 晶体在最大泵浦功率下运行几分钟后热损坏^[39]。在脉宽为 1.5 ms 时, 得到最高激光输出脉冲能量 15 mJ, 斜效率 4%, 考虑到吸收和输出光子能量之间的差异, 激光过程的量子效应为 6%^[40]。这是截至目前泵浦 Dy:PGS 晶体得到的 4.3 μm 脉冲激光输出的最高能量指标。

5 结论与展望

中红外 Dy:PGS 激光器具有发射谱线多、可调谐范围大、结构简单的优点, 在中红外波段具有很大的发展潜力。目前限制其发展的主要问题在于: (1) 受到晶体本身晶粒尺寸以及固有缺陷的影响, 稀土离子掺杂浓度不高, 一般都在 0.7%。而且目前晶体制备的成功率不高, 尤其是大尺寸单晶的制备更是困难重重, 光学均匀性也有待提高。(2) 晶体有明显的 (100) 解理面, 不利于加工。且晶体对泵浦光的吸收率不高, 一般在 50%~60% 之间。已报道的关于 Dy:PGS 激光器的研究中, 使用的 Dy:PGS 晶体基本上都没有镀对应的增透膜^[38, 41-45, 48-49, 51], 极少数镀了增透膜^[31, 46], 给晶体镀增透膜也可以在一定程度上提高激光器的输出特性。(3) Dy³⁺ 本身由于 ⁶H_{11/2}→⁶H_{13/2} 跃迁下能级寿命是上能级的 3 倍, 易发生自终止。因此, 大多数 3~5 μm 激光必须在短脉冲抽运条件下才能运转, 否则将形成激光下能级阻塞。在后续研究中, 如何在保证光学均匀性的基础上提高掺杂浓度, 制备大尺寸高品质的 Dy:PGS 晶体, 优化谐振腔结构以提高晶体对泵浦光的吸收, 避免自终止的发生, 将会成为未来直接泵浦中红外 Dy:PGS 激光器的主要研究方向。这些问题的逐步解决将推动 Dy:PGS 激光器的发展。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220203>。

参 考 文 献:

- [1] 刘晓旭, 韩聚洪, 蔡和, 等. 用于光电对抗的高重频中红外激光器综述[J]. 激光技术, 2021, 45(3): 271-279.

- LIU X X, HAN J H, CAI H, *et al.* Review of high repetition-rate mid-infrared lasers for photoelectric countermeasures [J]. *Laser Technol.*, 2021, 45(3): 271-279. (in Chinese)
- [2] 徐玲, 卜令兵, 蔡镐泽, 等. 中红外差分吸收激光雷达 NO₂ 测量波长选择及探测能力模拟 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1030002-1-8.
- XU L, BU L B, CAI H Z, *et al.* Wavelength selection and detection capability simulation of the mid-infrared DIAL for NO₂ detection [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2018, 47(10): 1030002-1-8. (in Chinese)
- [3] 辛文辉, 毕元硕, 李仕春, 等. 甲醛气体探测的 DIAL 波长选择及探测性能 [J/OL]. *红外与激光工程*, 2022: 1-11 (2022-01-24). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.tn.20220121.1504.011.html>.
- XIN W H, BI Y S, LI S C, *et al.* Research on wavelength selection and detection performance of DIAL for formaldehyde gas detection [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2022: 1-11 (2022-01-24). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.tn.20220121.1504.011.html>. (in Chinese)
- [4] 汪伟. 中红外波段高速空间激光通信技术研究 [D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2020.
- WANG W. *Research on High-speed Space Laser Communication Technology in Mid-infrared Band* [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2020. (in Chinese)
- [5] 付小宁, 王洁, 任保文. 空中侦察系统中红外小目标的被动测距 [J]. *应用科学学报*, 2012, 30(3): 294-298.
- FU X N, WANG J, REN B W. Passive ranging of small infrared target in airborne reconnaissance [J]. *J. Appl. Sci.*, 2012, 30(3): 294-298. (in Chinese)
- [6] 尚将. 应用 Er:YAG 激光与传统手术刀行口内软组织切口的对比研究 [D]. 大连: 大连医科大学, 2016.
- SHANG J. *A Comparative Study of Wound Healing Following Incision With Scalpel or Er:YAG Laser in the Oral Soft Tissue* [D]. Dalian: Dalian Medical University, 2016. (in Chinese)
- [7] 马芮. 应用钕激光、半导体激光与手术刀作用于大鼠口腔颊黏膜创口的对比研究 [D]. 北京: 北京协和医学院, 2018.
- MA R. *Comparative Study of the Effect of Er:YAG Laser, Diode Laser and Traditional Scalpel on Oral Buccal Mucosa Wound in Rats* [D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2018. (in Chinese)
- [8] MAJEWSKI M R, WOODWARD R I, JACKSON S D. Dysprosium mid-infrared lasers: current status and future prospects [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2020, 14(3): 1900195-1-20.
- [9] 朱纯凡, 王贤耿, 汪祥, 等. 中红外量子级联激光器的光子集成(特邀) [J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(3): 20220197-1-7.
- ZHU C F, WANG X G, WANG X, *et al.* Photonics integration of mid-infrared quantum cascade laser(Invited) [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2022, 51(3): 20220197-1-7. (in Chinese)
- [10] 邓凯, 高志远, 韩隆, 等. 量子级联激光器及其应用的研究进展 [J]. *光电技术应用*, 2021, 36(5): 23-29, 35.
- DENG K, GAO Z Y, HAN L, *et al.* Applications and progress of quantum cascade lasers [J]. *Electro-Opt. Technol. Appl.*, 2021, 36(5): 23-29, 35. (in Chinese)
- [11] ZHOU W J, LU Q Y, WU D H, *et al.* High-power, continuous-wave, phase-locked quantum cascade laser arrays emitting at 8 μm [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(11): 15776-15785.
- [12] DUDELEV V V, MIKHAILOV D A, BABICHEV A V, *et al.* Development and study of high-power quantum-cascade lasers emitting at 4.5-4.6 μm [J]. *Quantum Electron.*, 2020, 50(11): 989-994.
- [13] BOHN W, BUELOW HVOM, DASS S, *et al.* High-power supersonic CO laser on fundamental and overtone transitions [J]. *Quantum Electron.*, 2005, 35(12): 1126-1130.
- [14] 崔宇龙, 周智越, 黄威, 等. 中红外光纤激光技术研究进展与展望 [J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0900001-1-30.
- CUI Y L, ZHOU Z Y, HUANG W, *et al.* Progress and prospect of mid-infrared fiber laser technology [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2022, 42(9): 0900001-1-30. (in Chinese)
- [15] MAES F, FORTIN V, POULAIN S, *et al.* Room-temperature fiber laser at 3.92 μm [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 761-764.
- [16] SHIRYAEV V S, SUKHANOV M V, VELMUZHOV A P, *et al.* Core-clad terbium doped chalcogenide glass fiber with laser action at 5.38 μm [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2021, 567: 120939-1-9.

- [17] 李充, 谢冀江, 潘其坤, 等. 中红外光学参量振荡器技术进展 [J]. 中国光学, 2016, 9(6): 615-624.
LI C, XIE J J, PAN Q K, *et al.* Progress of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Chin. Opt.*, 2016, 9(6): 615-624. (in Chinese)
- [18] LIU G Y, MI S Y, YANG K, *et al.* 161 W middle infrared ZnGeP₂ MOPA system pumped by 300 W-class Ho:YAG MOPA system [J]. *Opt. Lett.*, 2021, 46(1): 82-85.
- [19] 周松, 李茂忠, 姜杰, 等. 中红外固体激光技术研究进展 [J]. 红外技术, 2019, 41(5): 391-399.
ZHOU S, LI M Z, JIANG J, *et al.* Solid-state mid-infrared laser technology research progress [J]. *Infrared Technol.*, 2019, 41(5): 391-399. (in Chinese)
- [20] 徐飞, 潘其坤, 陈飞, 等. 中红外 Fe²⁺:ZnSe 激光器研究进展 [J]. 中国光学, 2021, 14(3): 458-469.
XU F, PAN Q K, CHEN F, *et al.* Development progress of Fe²⁺:ZnSe lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2021, 14(3): 458-469. (in Chinese)
- [21] 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): 0305002-1-7.
KE C J, KONG X Y, WANG R, *et al.* Research progress on mid-IR Fe:ZnSe laser technology [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2016, 45(3): 0305002-1-7. (in Chinese)
- [22] 薛艳艳, 徐晓东, 苏良碧, 等. 中红外波段激光晶体的研究进展 [J]. 人工晶体学报, 2020, 49(8): 1347-1360.
XUE Y Y, XU X D, SU L B, *et al.* Research progress of mid-infrared laser crystals [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2020, 49(8): 1347-1360. (in Chinese)
- [23] KAMENSHCHIKOV V N, STEFANOVICH V A, SUSLIKOV L M. Birefringence of PbGa₂S₄ crystals [J]. *Opt. Spectrosc.*, 2013, 114(3): 394-396.
- [24] ASATRYAN H, BARANOV P. The method of electron paramagnetic resonance for quantum electronic materials investigation (YAG, YLuAG, YAP, YLuAP, PbGa₂S₄) [J]. *Int. J. Mod. Phys. : Conf. Ser.*, 2012, 15: 16-21.
- [25] NEUMANN H, SOBOTTA H, SYRBU N N, *et al.* Infrared lattice vibrations of PbGa₂S₄ [J]. *Cryst. Res. Technol.*, 1994, 29(2): 289-296.
- [26] KAMENSHCHIKOV V N, STEFANOVICH V A, GAD' MASHI Z P, *et al.* Optical phonons in PbGa₂S₄ crystals [J]. *Phys. Solid State*, 2007, 49(2): 351-355.
- [27] MUSAEVA N N, DZHABBAROV R B, KASUMOV U F, *et al.* Optical and photoelectric properties of single-crystal PbGa₂S₄ [J]. *J. Opt. Technol.*, 2003, 70(9): 676-679.
- [28] KAMENSHCHIKOV V N, SUSLIKOV L M. Calculation of the optical properties of PbGa₂S₄ crystal [J]. *Opt. Spectrosc.*, 2014, 116(4): 564-566.
- [29] BADIKOV V, BADIKOV D, DOROSHENKO M, *et al.* Optical properties of lead thiogallate [J]. *Opt. Mater.*, 2008, 31(2): 184-188.
- [30] DOROSHENKO M E, BASIEV T T, OSIKO V V, *et al.* Oscillation properties of dysprosium-doped lead thiogallate crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(5): 590-592.
- [31] JELINKOVÁ H, ŠULC J, JELÍNEK M, *et al.* Mid-IR radiation generated by Dy:PbGa₂S₄ laser [C]. *Proceedings of the Advanced Solid State Lasers, Shanghai*, 2014: ATu2A. 12.
- [32] BASIEV T T, DOROSHENKO M E, OSIKO V V, *et al.* Mid IR laser oscillations in new low phonon PbGa₂S₄:Dy³⁺ crystal [C]. *Proceedings of the Advanced Solid-State Photonics, Vienna*, 2005: 75.
- [33] WU K, PAN S L, WU H P, *et al.* Synthesis, structures, optical properties and electronic structures of PbGa₂Q₄ (Q = S, Se) crystals [J]. *J. Mol. Struct.*, 2015, 1082: 174-179.
- [34] HUANG C B, NI Y B, WU H X, *et al.* Crystal growth and first-principles calculations of the mid-IR laser crystal Dy³⁺:PbGa₂S₄ [J]. *Cryst. Growth Des.*, 2020, 20(2): 845-850.
- [35] 方攀, 袁泽锐, 陈莹, 等. 中红外激光晶体 Dy:PbGa₂S₄ 的生长与器件制备 [J]. 人工晶体学报, 2020, 49(5): 771-773.
FANG P, YUAN Z R, CHEN Y, *et al.* Growth and device fabrication of mid-infrared laser crystal Dy:PbGa₂S₄ [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2020, 49(5): 771-773. (in Chinese)
- [36] BASIEV T T, DOROSHENKO M E, IVLEVA L I, *et al.* Some new approaches for development of mid-IR laser sources [C]. *Proceedings of SPIE, 6998 Solid State Lasers and Amplifiers III, Strasbourg*, 2008: 69980P-1-3.

- [37] JELINKOVA H, KORANDA P, SULC J, *et al.* Dysprosium doped lead thiogallate laser [C]. *Proceedings of the Advanced Solid-State Photonics 2009, Denver*, 2009: WB23.
- [38] ŠULC J, JELÍNKOVÁ H, DOROSHENKO M E, *et al.* Dysprosium-doped PbGa₂S₄ laser excited by diode-pumped Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(18): 3051-3053.
- [39] BASIEV T T, DOROSHENKO M E, OSIKO V V, *et al.* Laser properties of Na⁺ ions co-doped PbGa₂S₄:Dy³⁺ crystal [C]. *Proceedings of the Advanced Solid-State Photonics, San Diego*, 2010: ATuA4.
- [40] BASIEV T T, DOROSHENKO M E, OSIKO V V, *et al.* Qualitative improvement in the lasing performance of PbGa₂S₄:Dy³⁺ crystals through Na⁺ doping [J]. *Quantum Electron.*, 2010, 40(7): 596-598.
- [41] DOROSHENKO M E, BASIEV T T, OSIKO V V, *et al.* Four micron radiation generated by dysprosium doped lead thiogallate laser [C]. *Proceedings of SPIE 7578, Solid State Lasers XI X : Technology and Devices, San Francisco*, 2010: 757825-1-5.
- [42] ŠULC J, JELÍNKOVÁ H, DOROSHENKO M E, *et al.* High duty cycle and long pulse operation of Dy:PbGa₂S₄ laser excited by diode pumped Nd:YAG [C]. *Proceedings of the Advanced Solid-state Photonics, Istanbul*, 2011: AWA21.
- [43] ŠULC J, JELÍNKOVÁ H, DOROSHENKO M E, *et al.* Four-micron CW operating Dy:PbGa₂S₄ laser [C]. *Proceedings of the 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO EUROPE/EQEC), Munich*, 2011: CA8_6.
- [44] JELÍNKOVÁ H, DOROSHENKO M E, JELÍNEK M, *et al.* Dysprosium lead thiogallate crystal resonantly pumped by Er:YLF laser radiation [C]. *Proceedings of the Advanced Solid-state Photonics, Istanbul*, 2011: ATuB18.
- [45] JELÍNKOVÁ H, DOROSHENKO M E, JELÍNEK M, *et al.* Resonant pumping of dysprosium doped lead thiogallate by 1.7 μm Er:YLF laser radiation [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2011, 8(5): 349-353.
- [46] JELÍNKOVÁ H, NEMEC M, MIYAGI M, *et al.* Dy:PbGa₂S₄ laser radiation and its delivery by hollow waveguide [C]. *Proceedings of SPIE 8218, Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XIII, San Francisco*, 2012: 82180R-1-5.
- [47] DOROSHENKO M E, JELÍNKOVÁ H, ŠULC J, *et al.* Tuning possibility of dysprosium-doped lead thiogallate laser [C]. *Proceedings of SPIE 8235, Solid State Lasers XXI : Technology and Devices, San Francisco*, 2012: 82351X-1-7.
- [48] JELÍNKOVÁ H, DOROSHENKO M E, JELÍNEK M, *et al.* Dysprosium-doped PbGa₂S₄ laser generating at 4.3 μm directly pumped by 1.7 μm laser diode [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(16): 3040-3043.
- [49] DOROSHENKO M E, JELÍNEK M, SULC J, *et al.* Diode-pumped dysprosium-doped-PbGa₂S₄ mid-infrared laser [C]. *Proceedings of the 2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC, Munich*, 2014: CA_P_30.
- [50] JELINKOVA H, DOROSHENKO M E, OSIKO V V, *et al.* Dysprosium thiogallate laser: source of mid-infrared radiation at 2.4, 4.3, and 5.4 μm [J]. *Appl. Phys. A*, 2016, 122(8): 738-1-8.
- [51] JELÍNKOVÁ H, DOROSHENKO M E, ŠULC J, *et al.* Laser-diode pumped dysprosium-doped lead thiogallate laser output wavelength temporal evolution and tuning possibilities at 4.3–4.7 μm [C]. *Proceedings of SPIE 9726, Solid State Lasers XXV : Technology and Devices, San Francisco*, 2016: 97261A-1-6.



胡萍(1998-),女,湖北咸宁人,硕士研究生,2020年于武汉纺织大学获得学士学位,主要从事固体激光器的研究。

E-mail: 2635702363@qq.com



刘晓萌(1979-),女,河南郑州人,博士,副研究员,2006年于清华大学获得博士学位,主要从事固体激光、激光雷达和激光探测领域的研究。

E-mail: liuxiaom@nim.ac.cn