

文章编号:1001-5078(2024)11-1659-08

· 综述与评论 ·

中红外激光技术研究进展

张熙宁,唐晓军,陈国,刘昆,张昆,赵鸿
(中国电子科技集团公司第十一研究所,北京 100015)

摘要:报告介绍了3~5 μm 中红外激光的主要应用领域,概述了该波段中红外激光器国内外研究的最新进展。并对中红外激光器的主要技术路线进行了详细的对比分析,总结其关键技术;结合应用场景,指出不同方案工程应用的难点和特点。最后,对中红外激光技术未来的发展进行了展望。

关键词:中红外激光;直接激射;非线性频率变换;超短脉冲;定向对抗

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.11.002

Research progress on mid-infrared laser technology

ZHANG Xi-ning, TANG Xiao-jun, CHEN Guo, LIU Kun, ZHANG Kun, ZHAO Hong
(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: This paper presents important applications for mid-infrared lasers with emission spectrums located in the 3 ~ 5 μm band. The latest progress of mid-infrared lasers research at is summarized, the principal technical approaches are compared and analyzed, the key technologies are summarized. Combined with application scenarios, the difficulties and characteristics of different engineering applications are discussed. The future development of mid-infrared lasers is discussed.

Keywords: mid-infrared laser; emission from population inversion; nonlinear frequency transformation; ultrashort pulse; directional infrared countermeasures

1 引言

3~5 μm 波段中红外激光波长位于大气窗口,涵盖了大多数分子的振动吸收峰对应的波长,与空间飞行器尾焰辐射波段吻合;因此中红外激光在军事、生物医疗、环境监测及自由空间光通信等领域有重要的应用,一直以来都是国内外研究的热点^[1-4]。

在军事应用方面,定向红外对抗、激光制导都是重要应用方向,其中定向红外对抗经过三十多年的发展,已比较成熟,型号产品被各国军方大量装备。采用的对抗光源从最早的 OPO 参量转换激光器到近几年发展起来的量子级联激光器,追求轻小型化、高可靠。激光制导中的三维成像制导是近几年发展迅速的激光应用,还不是很成熟,中波波段激光的应

用还处在研发阶段早期。

采用 OPO 参量转换激光光源的定向红外对抗系统还是各国军方装备的主流,例如美国诺·格公司和 BAE 系统公司分别研制的通用红外对抗(CIRCM)系统,桑德斯公司研制的战术飞机红外对抗(TADIRCM)系统,以色列埃尔比特公司研制的红外对抗(C-MUSIC)系统,意大利莱昂纳多公司开发的(Mysis-DIRCM)系统等等。量子级联激光器因其体积小、重量轻,电光效率高,已部分替代了上述红外对抗系统中的 OPO 光源,在装备中得到了应用,例如美国日光防务公司(Day Light Defense)的 Solaris 量子级联激光器,在美国陆军的通用红外对抗系统中获得应用^[5]。

收稿日期:2024-10-22

此外,连续体制对抗光源只能起到干扰效果,无法应对多目标;而脉冲体制光源可以实现对传感器的致盲效果,在新一代光电对抗技术发展中,高峰值功率脉冲光源技术得到重视,在连续或高平均功率体制光源向小型化、高效率、高可靠发展的同时,高峰值功率脉冲光源技术也在蓬勃发展。

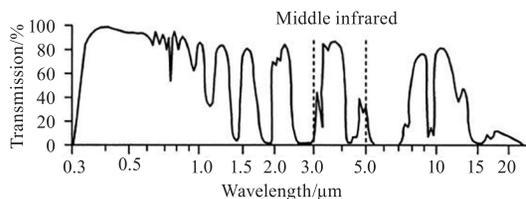


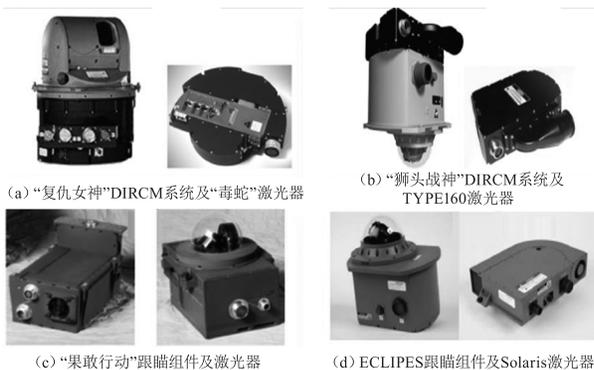
图 1 大气透过率曲线

Fig. 1 Atmospheric transmittance spectrums



图 2 定向红外对抗应用

Fig. 2 Applications of directed infrared countermeasures

图 3 红外对抗系统及激光器^[5]Fig. 3 Directed infrared countermeasures system and lasers^[5]

中红外激光的产生方式较为丰富,通常分为两部分,一部分是利用增益介质的受激辐射直接生成,另一部分则是依靠非线性光学效应生成。前者包括了固体激光器、光纤激光器、量子级联激光器、气体激光器和自由电子激光器等,后者主要包括光学参量振荡器(OPO)、光学参量放大器(OPA)、拉曼激光器(SRS)等^[6-7]。

2 中红外激光输出主要技术路线分析

2.1 直接激射输出中红外激光

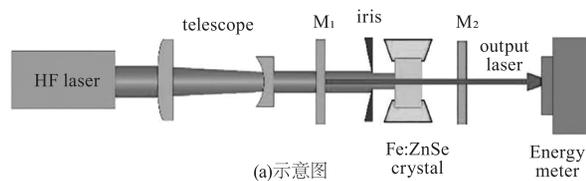
目前中红外激光的主要输出设备有氟化氢/氟化氘(HF/DF)化学激光器、一氧化碳(CO)气体激光器、固体块状激光器、半导体激光器和光纤激光器。在固体或光纤激光中,按照增益介质分类可划

分为基于 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Pr^{3+} 等稀土离子掺杂的固体/光纤激光器以及以 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 为代表的过渡金属离子掺杂的固体激光器。

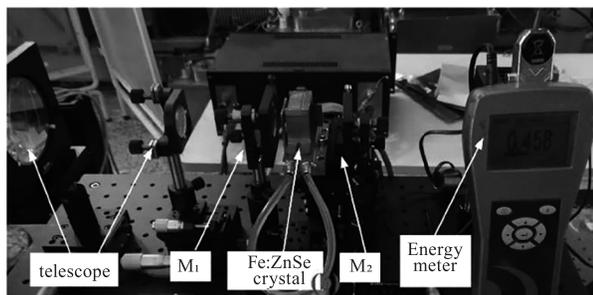
化学激光器可以产生大能量、高平均功率输出,但是化学激光器一般体积庞大,运行工质有毒,并且排放有害废气需要处理,并不适合用于武器装备自卫的红外对抗光源。

气体激光器也可以实现高平均功率输出,同样存在体积较大的问题,不适合武器装备配属携带,仅可装备于独立的对抗系统中,如专门的对抗干扰车辆中。

固体块状增益介质激光器最典型的是 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 激光器,可产生大能量激光输出,但是目前只能在低温下高效输出,常温工作时上能级寿命太短,输出能量急剧降低,并且增益介质制备难度较大,限制了该种激光器的应用。发展该种类型的激光器,重点是突破优质增益介质制备技术,短脉冲泵浦源技术,以及常温高效运转的自激抑制、模式匹配等关键技术。



(a)示意图



(b)实物照片

图 4 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器实验装置^[8]Fig. 4 Experimental setup of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser^[8]

稀土离子掺杂的氟化物、硫化物玻璃光纤激光器输出功率可达瓦级,结构紧凑,近几年一直是研究工作中的热点,在解决了全光纤化、基质材料稳定性,以及抗损伤能力等问题后,有希望得到推广应用,但是由于缺乏可以实现 $4\ \mu\text{m}$ 以上激光输出的激活材料,难以在红外对抗中得到应用。探索新的基质材料以及优化掺杂设计才能推动该类型光纤激光器进一步发展。

充气空心光纤具备传统气体激光器和光纤激光

器的诸多优点,有望实现高功率、窄线宽中红外激光输出,现在的主要是如何克服全光纤化困难,进一步提升输出功率。

半导体量子级联激光器是电激励激光器,体积小、重量轻、集成度高,可实现 3 ~ 15 μm 波长激光输出,单管输出可达瓦级,可通过合成技术扩展输出功率,是目前红外对抗光源研究的重要方向,美国已有型号批量装备部队。国内正在努力提高单管的输出功率和可靠性,努力解决合束需要的关键技术,如高效、高抗光损伤中红外光栅技术等。

在 3 ~ 5 μm 波段中红外激光技术中,半导体量子级联激光器通过合束技术实现了十瓦量级以上的激光输出,以其体积小、重量轻、结构紧凑、转换效率高满足了大部分定向对抗需求,已成为定向对抗技术发展的重要方向,在干扰型对抗应用中,正逐步替代传统的 OPO 激光技术;而可以实现大能量输出的 Fe:ZnSe 等固体激光技术,契合了致盲型对抗技术的发展需求,获得了广泛的关注,有较多团队进行了深入的研究。光纤激光技术潜在优势巨大,一直是研究工作中的热点,受限于掺杂材料以及基质材料的特性,应用到定向对抗中前景并不明朗,只适用于有限的特定应用场景。

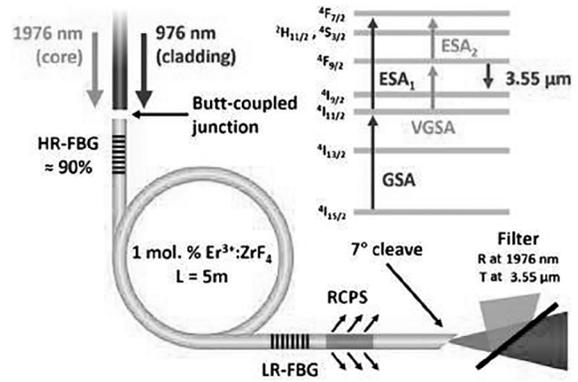


图5 中红外光纤激光器示意图^[9]

Fig. 5 Schematic of mid-infrared fiber laser^[9]

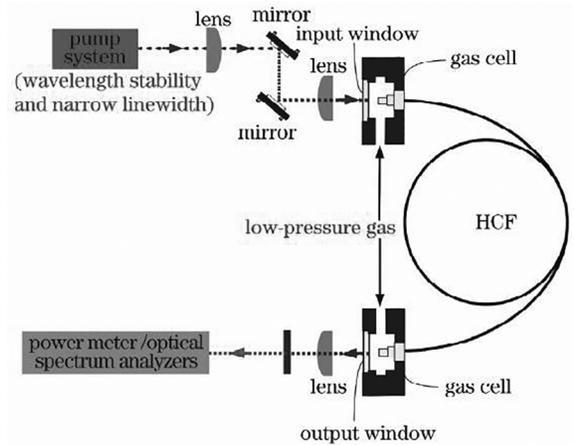


图6 基于粒子数反转的光纤气体激光器示意图^[10]

Fig. 6 Diagram of fiber gas laser based on population inversion^[10]

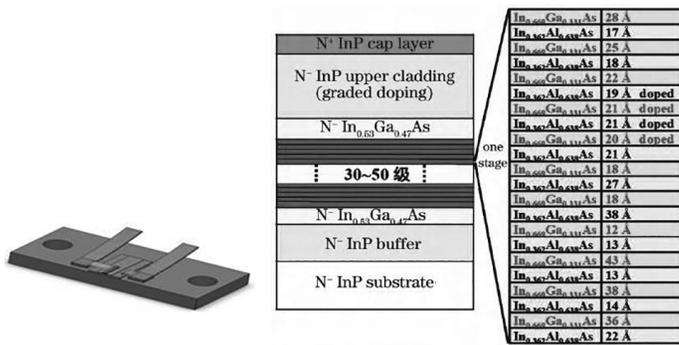


图7 量子级联激光器结构示意图^[11]

Fig. 7 Schematic of the QCL structure^[11]

2.2 非线性频率变换中红外激光技术

产生中红外激光输出的非线性频率变换技术有 OPO、OPA、SRS、DFG 等,非线性介质有晶体如 ZGP、PPLN 等,光纤如硫化物玻璃基质光纤、氟化物玻璃基质光纤等,气体如氢气、甲烷、二氧化碳等。

通过参量效应 (OPO、OPA) 产生中红外激光输出,尤其是较大功率的激光输出是当前主要的技术手段。中红外 OPO 的非线性晶体主要有磷酸氧钛

钾 (KTP)、硒镓银 (AgGaSe₂)、磷锗锌 (ZnGeP₂)、掺杂氧化镁的周期性极化铌酸锂 (MgO:PPLN) 等。KTP OPO 发展较早,但受晶体通光波段限制,其输出波长一般小于 4 μm。AgGaSe₂ OPO 易于实现中红外激光输出,但该种晶体材料热导率较小,抗损伤阈值低。

基于 MgO:PPLN 的中红外激光器输出的平均功率达到十瓦级水平,同时也是发展皮秒以下短脉

冲中红外激光的首选途径。由于 MgO:PPLN 的泵浦源波长多在 1 μm 附近,参量过程的物理机制决定 3~5 μm 中红外闲频光的转换效率低。同时,大口径 MgO:PPLN 晶体的制备工艺一时难以突破瓶颈,因此泵浦功率密度受到晶体损伤阈值的限制,阻碍了 MgO:PPLN 中红外激光器输出能力的进一步提升。

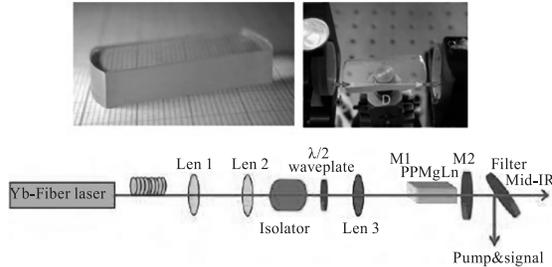


图 8 掺镱光纤泵浦 MgO:PPLN-OPO 实验装置^[12]

Fig. 8 MgO:PPLN-OPO pumped by Yb doped fiber laser^[12]

ZGP₂ 晶体作为中红外激光晶体具有高非线性系数、高热导率、红外透光范围宽等优异的性质,素有“中红外晶体之王”的美誉。大口径 ZGP₂ 晶体的生长技术在近年来亦取得了突破性进展。因此,基于 ZGP₂ 晶体发展高能、高功率的中红外激光器备受关注。在高性能 2 μm 泵浦源技术,ZGP₂ 晶体高效散热技术,以及 OPO、OPA 级联放大技术加持下,单脉冲能量已实现 0.5 J 输出,高平均功率输出已达百瓦级以上。

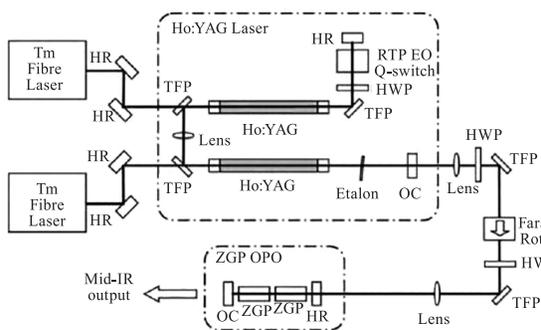


图 9 掺铥光纤 + Ho:YAG 棒泵浦 ZGP-OPO 中红外激光装置^[13]

Fig. 9 ZGP-OPO mid-IR laser pumped by Tm:fiber

laser and Ho:YAG rod laser^[13]

相对于化学激光器、气体激光器,全固态的参量转换激光器结构紧凑,适宜机动平台应用,目前输出平均功率已达百瓦量级,可满足绝大多数干扰型定向对抗需求,各国军方都有相应的装备在役,但是由于半导体量子级联激光器的迅速发展,且一般干扰型定向对抗有数十瓦激光功率足以满足需求,小功

率参量转换激光器有被替代的趋势,大功率器件面临应用场景不足的问题,因此,研究致盲型中红外定向对抗所需的大能量激光成为参量转换激光器未来重要的发展方向。

通过拉曼效应产生中红外激光输出一般采用光纤或充气空芯光纤实现,硫系玻璃基质、碲酸盐玻璃基质、氟化物玻璃基质光纤是产生中红外拉曼激光输出的非线性材料,利用拉曼效应的级联特性,可以灵活实现中红外波段(3~5 μm) 范围内众多波长的激光输出,目前最高输出平均功率已达瓦级。理论研究表明,使用碲酸盐玻璃光纤作为拉曼光谱增益介质,确实有望实现高效的中红外拉曼激光输出。研究结果显示,使用这种介质可以达到数十瓦的平均功率输出,这对于中红外光谱应用(如光谱分析、生物医学成像和环境监测等)具有重要的潜在应用价值,但还未有实验结果报道,突破瓦级以上平均功率激光输出,还需要在基质玻璃材料研究上有所突破。

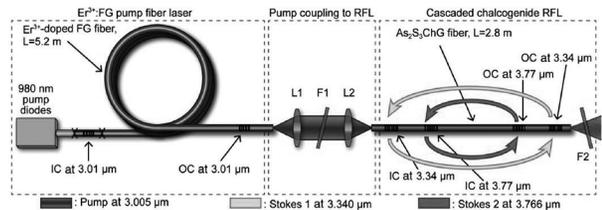


图 10 硫系玻璃光纤 3.77 μm 级联拉曼激光器实验装置^[14]

Fig. 10 Experimental setup of the As₂S₃-based

3.77 μm cascaded RFL^[14]

空芯充气光纤拉曼激光光源很好结合了光纤激光器和气体激光器的优势。相对传统的实芯光纤激光器,其在增益气体介质的选择方面更灵活,因此输出的激光波长非常丰富。同时,空芯光纤中类高斯光束的光场分布使得空芯边沿玻璃基质处的激光功率密度远小于纤芯中空处,使该种空芯光纤具备较高的损伤阈值,因此在高功率输出方面具有较大潜力。此外,由于气体介质的非线性效应非常弱,因此充气空芯光纤拉曼激光光源在高峰值功率下的窄线宽输出方面有巨大优势。受限于工艺等因素,目前该种激光器输出多在毫瓦到百毫瓦量级,个别报道瓦级输出,应用于定向对抗前景比较远。

光学差频产生(DFG)技术,是一种可调谐的宽带中红外激光输出技术,采用飞秒激光驱动可在 2

~20 μm 范围内产生较高激光输出,但是总体上输出平均功率不及参量方式,且结构复杂,适用于要求高功率、宽光谱、可调谐的应用场景。

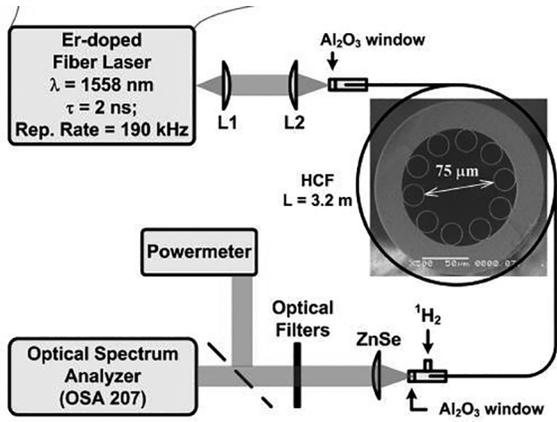


图 11 充气光纤拉曼激光器示意图^[15]

Fig. 11 Scheme of the gas fiber Raman laser^[15]

2.3 超短脉冲中红外激光技术

目前已经有许多比较成熟的激光技术可以对脉冲进行整形、放大,例如差频(DFG)、啁啾脉冲放大(CPA)、光学参量放大技术(OPA)以及光学参量啁啾脉冲放大(OPCPA)等。利用OPCPA技术具有的高放大增益、高信噪比、宽增益带宽的优点在高非线性系数的非线性晶体中进行脉冲放大已经成为当前获取超强超短中红外脉冲的主要手段之一。

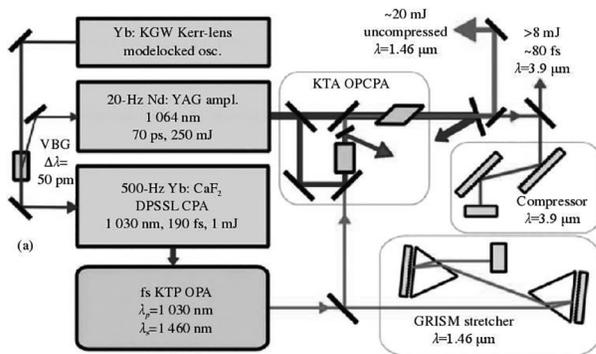


图 12 3.9 μm OPCPA 系统示意图^[16]

Fig. 12 Layout of the 3.9 μm OPCPA system^[16]

OPCPA 技术主要包括超短脉冲种子源技术,超短脉冲啁啾脉冲放大技术,超短脉冲参量啁啾脉冲放大技术三大部分;目前主要研究方向是采用 Nd:YAG、Yb:YAG 等增益介质产生 1 μm 附近的皮秒飞秒种子源,通过啁啾展宽和高增益放大器提升脉冲激光的脉冲能量,以此作为泵浦激光,泵浦 KTA 等非线性参量晶体,通过参量放大过程得到大能量

的中红外激光,由脉冲压缩器压缩脉冲宽度,最终实现高能量(毫焦量级)超短脉冲激光输出。激光波长最长可以达到 4.0 μm。此外,研制 2 μm 附近超短脉冲种子源,啁啾放大,泵浦 ZGP 等非线性介质产生 4 μm 以上波长激光输出也是重要的中波超短脉冲激光研究方向。

3 中红外激光技术国内外研究进展

近十几年以来,中红外激光领域围绕定向红外对抗,气体分子检测,超强超短激光脉冲开展极端物理试验等应用需求,从基础材料、器件出发,开展了大量研究工作,相关文献众多,详情已有多篇综述文章梳理^[1-2,4,6,10-11],本文只选取典型技术路线的典型文献概括描述中红外激光领域的最新进展,佐证文中观点。

3.1 直接激射中红外激光技术

Fe:ZnSe 增益介质可产生大能量中红外激光输出,但是受温度影响巨大,常温输出激光脉冲能量远不及低温下的输出。目前的技术状态还达不到致盲型定向对抗的应用需求,不过很有潜力,值得深入研究,国际上主要是俄罗斯的研究团队在深耕这一领域。

表 1 直接激射:Fe:ZnSe 固体

Tab. 1 Direct emission:Fe:ZnSe solid

年份	研究机构	研究水平
2018 年	中科院光所 潘其坤等人	136mJ@100ns(室温条件) 斜效率为 33.2 % 光-光效率为 26.5 % ^[8]
2019 年	俄罗斯 化学研究所 Balabanov 等人	(室温条件)480 mJ 总效率 38 % ^[17]
2019 年	俄罗斯 列别捷夫研究所 Frolov 等人	1.6 J@300 μs(5 °C) ^[18]
2020 年	中科院光所 潘其坤等人	(室温条件)502 mJ 斜率效率 32.6 % ^[7]

光纤激光(固体)直接激射主要以氟化物、硫化物以及硝酸盐玻璃为基质,铒、钬、镱掺杂的增益光纤实现,波长一般难以突破 4 μm。相比半导体量子级联激光器,输出功率还没有优势。高水平的研究出自加拿大的拉瓦尔大学。

光纤激光(气体)直接激射主要是采用反共振空心光纤,充入乙炔、二氧化碳等气体作为增益介质

实现。光泵浦,结合了气体激光器和光纤激光器的优点,国内外都有研究小组在探索,国防科技大学的研究成果最为突出,但是如何实现全光纤化,提升输出激光功率,拓展输出波长范围,还有很长的路要走。目前还不具备工程应用的能力。

表2 直接激励:光纤激光(固体)

Tab.2 Direct emission: fiber laser(solid)

年份	研究机构	研究水平
2017年	加拿大拉瓦尔大学 F. Maes 等人	5.6 W@ 3.55 μm ($\text{Er}^{3+} + \text{ZrF}_4$) ^[9]
2018年	加拿大拉瓦尔大学 F. Maes 等人	200mW@ 3.92 μm ($\text{HO}^{3+} + \text{InF}_3$) ^[19]
2019年	加拿大拉瓦尔大学 V. Fortin 等人	10.1 W@ 3.24 μm ($\text{Dy}^{3+} + \text{FG}$) ^[20]
2022年	加拿大拉瓦尔大学 M L. Tanguay 等人	14.9 W@ 3.55 μm ($\text{Er}^{3+} + \text{ZrF}_4$) ^[21]

表3 直接激励:光纤激光(气体)

Tab.3 Direct emission: fiber laser(gas)

年份	研究机构	研究水平
2019年	国防科技大学 崔宇龙等人	80 mW@ 4.3 μm 斜效率为 9.3 % (CO_2) ^[22]
2020年	国防科技大学 周智越等人	125mW@ 4.165 μm , 3.977 μm 光-光效率为 10 % (HBr) ^[23]
2022年	国防科技大学 黄威等人	4.5W@ 3.1 μm 光-光效率为 14 % (C_2H_2) ^[24]

QCL 是中红外激光领域中的一个重要的研究方向,因其体积小、重量轻、可集成度高的特点,在众多领域都有广阔的发展前景。目前以美国西北大学的技术水平最高,中科院半导体所是国内水平最好的,相比美国西北大学,还是有明显差距。

3.2 非线性频率变换中红外激光技术

OPO 非线性光学频率转换技术是目前获取高功率中红外激光的首选,2021年的时候哈尔滨工业大学已经实现了 161 W 平均功率的 3~5 μm 中红外激光输出,2023年中国电科十一所实现了 212.5 W 的 3~5 μm 中红外激光输出;国内这一领域研究水平已超越国际同行,输出平均功率水平已远超于抗型对抗所需,但是应用场景并不明朗。

通过硫系、氟化物等玻璃光纤,以及空心充气光纤的非线性拉曼散射,可实现多种波长的中红外激光输出。该领域国内外的研究较多,在 3~5 μm 波

段,出色的研究成果集中在国外的几个研究组。

表4 直接激励:半导体量子级联激光技术
Tab.4 Direct emission: semiconductor quantum cascade laser technology

年份	研究机构	研究水平
2018年	美国西北大学 Wenjia Zhou 等人	20 W(峰值功率)@ 3.8 μm 30 W(峰值功率)@ 4.8 μm ^[25]
2020年	俄罗斯约飞研究所 V. V. Dudelev 等人	10 W@ 4.5~4.6 μm ^[26]
2020年	美国西北大学 Wang F 等人	5.6W(CW)@ 4.8 μm ^[27]
2023年	中科院半导体所 Fei Teng 等人	3W(CW)@ 4.6 μm ^[28]

表5 OPO 非线性频率转换

Tab.5 OPO nonlinear frequency conversion

年份	研究机构	研究水平
2019年	哈尔滨工业大学 钱传鹏等人	ZGP-OPO 110 W@ 3~5 μm ^[29]
2020年	哈尔滨工业大学 杨科等人	BCSe-OPO 5.12 W@ 3~5 μm ^[30]
2021年	哈尔滨工业大学 刘高佑等人	ZGP-OPO/OPA 161 W@ 3~5 μm ^[31]
2023年	中国电科十一所 陈国等人	ZGP-OPO 212.5 W@ 3~5 μm

表6 拉曼散射非线性频率转换

Tab.6 Raman scattering nonlinear frequency conversion

年份	研究机构	研究水平
2014年	加拿大拉瓦尔大学 Bernier 等人	9 mW@ 3.77 μm (硫系玻璃光纤) ^[14]
2016年	加拿大拉瓦尔大学 Duval 等人	2.1W@ 3.4 μm 37 nJ 孤子激光 (氟化物光纤) ^[32]
2019年	俄罗斯科学院 Astapovich 等人	1.4 W@ 4.42 μm 量子效率 53 % (空心光纤,充 5 MPa 气体 H_2) ^[15]

3.3 中红外超短脉冲激光技术

通过选择合适的泵浦源与非线性晶体,采用 OPO/OPA/OPCPA 技术可产生所需波长的超短脉冲激光输出,这一领域国外研究水平较高,国内研究团队总体上研究水平还有差距,个别指标有突破,2022年,中国电科十一所在 4 μm 超短脉冲输出方面获得了 10.3 % 的转换效率。

表7 OPCPA 参量啁啾脉冲放大技术

Tab.7 OPCPA parametric chirped pulse amplification technology

年份	波长/ μm	晶体	泵浦波长/ μm	泵浦技术	重频/ Hz	脉宽	脉冲能量/ mJ	转化效率/ %	研究机构
2016	3.9	KTA	1.064	Nd : YAG(100 ps)	20	100 fs	35.0	5.0	维也纳科技大学 V. Shumakova 等人 ^[33]
2018	4.0	KTA	1.064	Nd : YAG(50 ps)	100	108 fs	5.5	5.5	中科院上海光所 Wang Pengfei 等人 ^[34]
2022	4.0	KTA	1.03	Yb : YAG(1.9 ps)	100	180 fs ~ 2.7 ps	5.7	10.3	中国电科十一所刘昆等人

4 结 语

在低重频大能量方面, Fe:ZnSe 固体增益介质直接激射输出中波激光具有很大优势, 目前受限于低温工作的限制以及调 Q 器件的限制, 发展较为缓慢, 相信未来通过技术迭代一定能突破技术瓶颈。

非线性频率转换技术是目前获取高功率中红外激光的首选, 其中非线性晶体 ZGP₂ 由于其有效非线性系数高、热导率高以及较高的损伤阈值, 实现高功率中红外激光具有明显的优势。

高峰值功率大能量中红外 OPA/OPCPA 技术的发展与其泵浦源的发展息息相关, 相较于 Nd : YAG, Yb : YAG 拥有更小的量子亏损、更大的增益带宽, 以其泵浦的 OPA/OPCPA 产生高能量皮秒或飞秒中红外激光将是一个重要方向。

基于以上展望, 随着高功率 2.09 μm 激光器技术的不断进步, 各种非线性光学频率转换晶体的生长工艺得到改良和新型高效转换晶体的问世, 中红外激光的输出功率有望显著增强。与此同时, 超短脉冲激光光源性能的提升, 预示着超短脉冲中红外激光技术将迎来重大进展。

QCL 中红外激光在连续低功率输出方面有明确优势, 随着单管功率的提升以及合束技术的发展, 有望实现更高亮度的连续中波输出。

参考文献:

- [1] Zhou Song, Li Maozhong, Jiang Jie, et al. Solid-state mid-infrared laser technology research progress [J]. Infrared Technology, 2019, 41(5): 391 - 399. (in Chinese)
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.
- [2] Pan Qikun. Progress of mid-infrared solid-state laser [J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 557 - 566. (in Chinese)
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.
- [3] Ke Changjun, Kong Xinyi, Wang Ran, et al. Research progress on mid-IR Fe:Zn Se laser technology [J]. Infrared

and Laser Engineering, 2016, 45(3): 0305002 - 1. (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 - 1.

- [4] Xu Fei, Pan Qikun, Chen Fei, et al. Development progress of Fe²⁺:ZnSe lasers [J]. Chinese Optics, 2021, 14(3): 458 - 469. (in Chinese)
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.
- [5] Zhang Yuansheng, Xu Liang, Chen Fang, et al. Mid-infrared lasers used in airborne directed infrared countermeasures system and its key technologies [J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(5): 56 - 59. (in Chinese)
张元生, 徐亮, 陈方, 等. 机载定向红外对抗系统的中波红外激光器及关键技术 [J]. 光电与控制, 2017, 24(5): 56 - 59.
- [6] Cheng Naijun, Li Weifan, Qi Feng. Progress of mid-infrared laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(17): 1700006. (in Chinese)
程乃俊, 李惟帆, 祁峰. 中红外激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(17): 1700006.
- [7] Pan Qikun, Xie Jijiang, Chen Fei, et al. Transversal parasitic oscillation suppression in high gain pulsed Fe²⁺:ZnSe laser at room temperature [J]. Optics and Laser Technology, 2020, 127: 106151.
- [8] Pan Qikun, Xie Jijiang, Chen Fei, et al. Mid-infrared high energy Fe²⁺:ZnSe laser at room temperature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1101001. (in Chinese)
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.
- [9] Maes F, Fortin V, Bernier M, et al. 5.6 W monolithic fiber laser at 3.55 μm [J]. Optics Letters, 2017, 42(11): 2054 - 2057.
- [10] Wang Zefeng, Zhou Zhiyue, Cui Yulong, et al. Research progress and prospect of fiber gas laser sources (II): based on population inversion [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401009. (in Chinese)
王泽峰, 周智越, 崔宇龙, 等. 光纤气体激光光源研究进展及展望 (II): 基于粒子数反转 [J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401009.

- [11] Liu Fengqi, Zhang Jinchuan, Liu Junqi, et al. Progress in quantum cascade lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7):0701007. (in Chinese)
刘峰奇, 张锦川, 刘俊岐, 等. 量子级联激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7):0701007.
- [12] Liu Shande, Wang Zhaowei, Zhang Baitao, et al. Wildly tunable, high-efficiency MgO:PPLN mid-IR optical parametric oscillator pumped by a Yb-fiber laser[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(2):024204.
- [13] Alexander Hemming, Jim Richards, Alan Davidson, et al. 99 W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25 % duty cycle [J]. Optics Express, 2013, 21(8):10062 – 10069.
- [14] Bernier M, Fortin V, El-Amraoui M, et al. 3.77 μm fiber laser based on cascaded Raman gain in a chalcogenide glass fiber[J]. Optics Letters, 2014, 39(7):2052 – 2055.
- [15] Astapovich M S, Gladyshev A V, Khudyakov M M, et al. Watt-level nanosecond 4.42 μm Raman laser based on silica fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(1):78 – 81.
- [16] Andriukaitis G, Balčiūnas T, Ališauskas S, et al. 90 GW peakpower few-cycle mid-infrared pulses from an optical parametric amplifier[J]. Optics Letters, 2011, 36(15):2755 – 2757.
- [17] Balabanov S S, Firsov K N, Gavrishchuk E M, et al. Room-temperature lasing on $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ with meniscus inner doped layer fabricated by solid-state diffusion bonding [J]. Laser Physics Letters, 2019, 16(5):055004.
- [18] M P Frolov, Yu V Korostellin, V I Kozlovsky, et al. Study of a room temperature, monocrystalline $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ laser, pumped by a high-energy, free-running $\text{Er}:\text{YAG}$ laser [J]. Laser Physics, 2019, 29(8):085004.
- [19] Maes F, Fortin V, Poulain S, et al. Room-temperature fiber laser at 3.92 μm [J]. Optica, 2018, 5(7):761 – 764.
- [20] V Fortin, F Jobin, M Larose, et al. 10 W level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24 μm [J]. Optics Letters, 2019, 44(3):491 – 494.
- [21] M L Tanguay, M. Fortin, V. Boilard, et al. 15 W monolithic fiber laser at 3.55 μm [J]. Optics Letters, 2022, 47(2):289 – 292.
- [22] Cui Yulong, Huang Wei, Wang Zefeng, et al. 4.3 μm fiber laser in CO_2 -filled hollow-core silica fibers [J]. Optica, 2019, 6(8):951 – 954.
- [23] Zhou Zhiyue, Li Hao, Cui Yulong, et al. Optically pumped 4 μm CW HBr gas laser based on hollow-core fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16):1614001. (in Chinese)
周智越, 李昊, 崔宇龙, 等. 基于空芯光纤的光泵浦 4 μm 连续波 HBr 气体激光器[J]. 光学学报, 2020, 40(16):1614001.
- [24] Huang Wei, Zhou Zhiyue, Cui Yulong, et al. 4.5 W 3.1 μm mid-infrared fiber gas laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1):0101024 – 1. (in Chinese)
黄威, 周智越, 崔宇龙, 等. 4.5 W 中红外 3.1 μm 光纤气体激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(1):0101024 – 1.
- [25] Wenjia zhou, Donghai Wu, Quan-Yong Lu, et al. Single-mode, high-power, mid-infrared, quantum cascade laser phased arrays[J]. Scientific Reports, 2018, 8(26):14866.
- [26] V V Dudelev, D A Mikhailov, A V Babichev, et al. Development and study of high-power quantum-cascade laser-emitting at 4.5 – 4.6 μm [J]. Quantum Electronics, 2020, 50(11):989 – 994.
- [27] Wang F, Slivken S, Wu D H, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 22 % wall plug efficiency in continuous-wave operation [J]. Optics Express, 2020, 28(12):17532 – 17538.
- [28] Teng Fei, Shenqiang Zhai, Jinchuan Zhang, et al. 3 W continuous-wave room temperature quantum cascade laser grown by metal-organic chemical vapor deposition [J]. Photonics, 2023, 10(1):47.
- [29] Qian Chuanpeng, Yao Baoquan, Zhao Benrui, et al. High repetition rate 102 W middle infrared ZnGeP_2 master oscillator power amplifier system with thermal lens compensation [J]. Optics Letters, 2019, 44(3):715 – 718.
- [30] Yang Ke, Liu Gaoyou, Li Chunxiao, et al. Research on performance improvement technology of a BaGa_4Se_7 mid-infrared optical parametric oscillator [J]. Optics Letters, 2020, 45(23):6418 – 6421.
- [31] Liu Gaoyou, Mi Shuyi, Yang Ke, et al. 161 W middle infrared ZnGeP_2 MOPA system pumped by 300 W-class $\text{Ho}:\text{YAG}$ MOPA system [J]. Optics Letters, 2021, 45(1):82 – 85.
- [32] Duval S, Gauthier J C, Robichaud L R, et al. Watt-level fiber-based femtosecond laser source tunable from 2.8 μm to 3.6 μm [J]. Optics Letters, 2016, 41(22):5294 – 5297.
- [33] A V Mitrofanov, A A Voronin, D A Sidorov-Biryukov, et al. Subterawatt few-cycle mid-infrared pulses from a single filament [J]. Optica, 2016, 3(3):299 – 302.
- [34] Wang Pengfei, Li Yanyan, Li Wenkai, et al. 2.6 mJ/100 Hz CEP-stable near-single-cycle 4 μm laser based on OPCPA and hollow-core fiber compression [J]. Optics Letter, 2018, 43(9):2197 – 2200.