

窄谱宽中红外激光技术研究进展

吕国瑞, 卞进田, 温佳起, 孔辉, 徐海萍, 郭磊, 王荣庆

Research progress of narrow-linewidth mid-infrared laser

引用本文:

吕国瑞, 卞进田, 温佳起, 孔辉, 徐海萍, 郭磊, 王荣庆. 窄谱宽中红外激光技术研究进展[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 742–750.

L Guorui, BIAN Jintian, WENG Jiaqi, et al. Research progress of narrow-linewidth mid-infrared laser[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(6): 742–750.

您可能感兴趣的其他文章

1. 1.7 μm 波段光纤激光技术研究进展及应用

引用本文: 宁雨竹, 张鹏, 何爽, 等. 1.7 μm 波段光纤激光技术研究进展及应用[J]. *激光技术*, 2023, 47(2): 154–170.

2. 掺铋光纤铋活性中心发光机理的研究进展

引用本文: 贾宝楠, 王付刚, 孙仕豪, 等. 掺铋光纤铋活性中心发光机理的研究进展[J]. *激光技术*, 2020, 44(6): 657–663.

3. 8 μm ~ 14 μm 长波红外相干辐射技术

引用本文: 王旭明, 杨峰, 董程, 等. 8 μm ~ 14 μm 长波红外相干辐射技术[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 821–828.

4. 三谱线、高功率窄线宽纳秒光纤激光器

引用本文: 李川, 陈安涛, 赵文娟, 等. 三谱线、高功率窄线宽纳秒光纤激光器[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 753–756.

5. 基于MOPA结构的1064nm单频光纤激光器

引用本文: 朱志坚, 薛竣文, 王玉珂, 等. 基于MOPA结构的1064nm单频光纤激光器[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 800–803.

文章编号: 1001-3806(2023)06-0742-09

窄谱宽中红外激光技术研究进展

吕国瑞¹, 卞进田^{1*}, 温佳起¹, 孔辉¹, 徐海萍¹, 郭磊^{1,2}, 王荣庆¹

(1. 国防科技大学 电子对抗学院, 合肥 230037; 2. 安徽理工大学 力学与光电物理学院, 淮南 232001)

摘要: 3 μm ~5 μm 中红外激光处于大气窗口波段, 对应着众多原子或分子的特征吸收峰, 在医疗诊断、大气环境监测、空间通信以及光电对抗等诸多领域具有非常重要的应用价值。在这些应用领域, 人们往往要求光源拥有窄谱宽和快速波长调谐功能, 而窄谱宽激光具有较小的谱宽、能量集中, 是满足这些应用的理想光源。总结了实现窄谱宽 3 μm ~5 μm 中红外激光输出的 Fe²⁺/Cr²⁺ 离子掺杂固体激光器和氟化物光纤激光器谱宽压缩技术, 以量子级联激光器为例, 展示了几种激光稳频的措施, 重点阐述了结构紧凑、全固化的中红外光参量振荡器的调谐原理和压缩谱宽所采取的技术, 对课题组在窄谱宽光参量振荡器方面的研究工作进行了介绍, 并对窄谱宽中红外激光技术的研究前景进行了展望。

关键词: 激光技术; 窄谱宽; 固体激光器; 光纤激光器; 光参量振荡器

中图分类号: TN242

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.06.003

Research progress of narrow-linewidth mid-infrared laser

LÜ Guorui¹, BIAN Jintian¹, WENG Jiaqi¹, KONG Hui¹, XU Haiping¹, GUO Lei^{1,2}, WANG Rongqing¹

(1. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China; 2. School of Mechanics and Optoelectronic Physics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: 3 μm ~5 μm is one of the transmission windows of the atmosphere, including many atoms or molecules' characteristic absorption peaks. 3 μm ~5 μm laser sources have wide applications, such as medical diagnosis, environmental monitoring, spectral analysis, military countermeasure, and so on. In these application fields, light sources are often required to have narrow linewidth and wavelength tuning capability. Narrow-linewidth laser is an ideal light source for these applications due to its small spectrum range and concentrative energy. The technology of narrow-linewidth of 3 μm ~5 μm laser were summarized, including the linewidth compression method of the Fe²⁺/Cr²⁺ ion-doped solid-state laser and fluoride fiber laser, and several methods of quantum cascade laser frequency stabilization were discussed. The compact and all-solid-state mid-infrared optical parametric oscillator was mainly introduced. And the related research work of our group on the narrow linewidth of an optical parametric oscillator was introduced. Finally, the research prospect of the narrow-linewidth mid-infrared laser has been prospected.

Key words: laser technique; narrow-linewidth; solid-state laser; fiber laser; optical parametric oscillator

引言

3 μm ~5 μm 中红外波段是典型的“大气透过窗口区”和“分子指纹光谱区”, 在激光医疗、污染物监测、红外遥感以及光电对抗等领域具有重要应用前景^[1-4]。在大气监测领域, 许多重要污染气体如二氧化氮、氯化

氢和硫化氢等在中红外波段具有特殊的吸收谱线, 因此, 该波段的激光可用于污染物检测以及光谱研究^[5-7]。为实现对待测气体吸收谱线进行高精度分析, 激光不仅要具有良好的光束质量, 还要满足其谱宽应小于气体分子吸收谱宽。在窄谱宽激光基础上, 如何更进一步获得频率稳定性好、连续单模运转的激光光源, 这对于引力波探测、冷原子光钟等领域的研究具有重要意义^[8]。

当前实现 3 μm ~5 μm 波段中红外激光的技术方法从机理上可分为两种: 一种是直接方式, 如固体激光器、光纤激光器和量子级联激光器 (quantum cascade laser, QCL) 等; 另一种是利用非线性频率变换间接产生中红外激光输出, 例如结构简单、小型化、全固化的光参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO)^[9]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62105003); 安徽省自然科学基金资助项目 (2108085QA29); 先进激光技术安徽省实验室主任基金资助项目 (AHL2020ZR03)

作者简介: 吕国瑞 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事窄谱宽中红外激光技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: bianjintian17@nudt.edu.cn

收稿日期: 2022-10-14; 收到修改稿日期: 2022-11-27

随着技术的不断进步,大功率、高能量的 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 中红外激光器逐渐由实验研究转向实际应用,在科学研究和生产中发挥着显著的作用。然而,自由运行状态下的激光器谱宽往往无法满足高精度的应用需求,推动了谱宽压缩技术快速发展。因此,如何压缩激光谱宽、提高光谱纯度已成为国内外激光工作者研究的热点课题。基于此,作者所在课题组开展了相关研究,包括中红外硒镓钡光参量振荡器和氧化镁掺杂周期极化铌酸锂 (MgO-doped periodically-poled lithium niobate, MgO:PPLN) 光参量振荡器的谱宽压缩工作。本文作者就窄谱宽中红外激光技术进行了总结概述,介绍了 Fe:ZnSe/Cr:ZnSe 固体激光器和氟化物光纤激光

器谱宽压缩的方法,展示了几种 QCL 激光稳频的技术;重点介绍了窄谱宽中红外 OPO 激光技术的国内外研究进展;最后介绍了本课题组相关的研究工作。

1 窄谱宽中红外固体激光器

过渡金属离子掺杂的 II~VI 族晶体是中红外固体激光器的常用增益介质,两种典型的材料分别是 Fe:ZnSe 和 Cr:ZnSe 晶体,其输出的光谱特征宽度约为 $10\ \text{nm}\sim 50\ \text{nm}$ 。近年来,窄谱宽固体激光器激光取得了长足发展,输出激光谱宽可以达到 $0.1\ \text{nm}$ 的水平,有几种固体激光器谱宽压缩方法已经得到证实。表 1 中列出了国内外相关研究工作进展。

表 1 窄谱宽中红外固体激光器研究进展
Table 1 Progress of narrow-linewidth solid laser

年份	晶体	抽运源	输出特性			谱宽
			波长/ μm	功率/W	能量/mJ	
2019 ^[10]	Cr:ZnSe	掺 Tm 光纤激光	2.455~2.65	0.475	—	$\leq 900\ \text{MHz}$
2019 ^[11]	Fe:ZnSe	Ho,Pr:LLF 激光	3.957	—	0.016	23.2 nm
2019 ^[12]	Cr:ZnSe	Tm:YLF 激光	2.338~2.572	0.92	—	50 MHz
2018 ^[13]	Fe:ZnSe	Er:YAG 激光	4.24	—	8.89	10 nm
2017 ^[14]	Fe:ZnSe	掺 Er 光纤激光	4.05	>3.5	—	<1 nm
2017 ^[15]	Fe:CdMnTe	Fe:ZnSe 激光	5.223	0.81	—	1 nm
2016 ^[16]	Cr:ZnSe	掺 Tm 光纤激光	2.3~2.7	1.33	—	0.14 nm
2016 ^[17]	Cr:ZnSe	Ho:YAG 激光	2.450~2.570	5.5	—	<1 nm
2015 ^[18]	Fe:ZnSe	Er:YAG 激光	4.122	0.076	—	6 nm
2015 ^[19]	Cr:ZnSe	掺 Tm 光纤激光	2.077~2.777	0.120	—	<0.1 nm

实现窄谱宽固体激光输出一种方法是利用热等静压 (hot isostatic pressing, HIP) 技术对晶体样本进行金属离子扩散掺杂处理。研究表明, HIP 技术可以增加未掺杂多晶 ZnSe 的晶粒尺寸,并能够减少掺杂 Cr^{2+} 离子 ZnSe 晶体中的缺陷,消除了可能存在的非均匀展宽^[20]。2016 年, STITES 等人^[16]报道了一种利用 HIP 技术将过渡金属离子 Cr^{2+} 扩散到 ZnSe 晶体的技术。研究人员首先通过溅射沉积法在 ZnSe 衬底表面形成 Cr^{2+} 离子薄层,然后经 HIP 完成 Cr^{2+} 离子扩散掺杂的过程,处理后得到的 Cr:ZnSe 晶体样品如图 1 所示。实验结果表明,经 HIP 处理后的 Cr:ZnSe 输出激光谱宽被显著压缩,在探测器分辨率极限下测得的谱宽为 $140\ \mu\text{m}$,并且可以在整个增益带宽范围内保持窄谱宽输出。

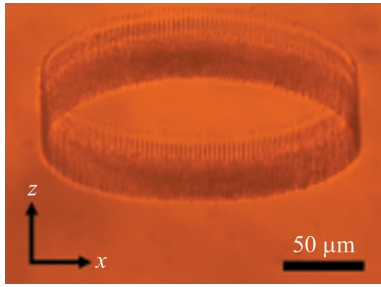
实现窄谱宽固体激光输出另一种方法是在晶体中形成波导结构来实现窄谱宽激光输出。2015 年, LANCASTER 等人通过超快激光技术在 Fe:ZnSe 晶体上制



图 1 热等静压离子扩散 Cr:ZnSe 晶体外观图^[16]

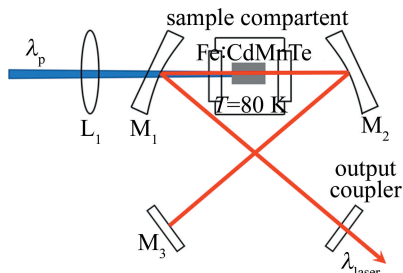
Fig. 1 Schematic of Cr^{2+} ion-doped ZnSe crystal^[16]

造出一种凹陷的波导结构,实现了 Fe:ZnSe 波导激光输出,其波导端面显微镜图像如图 2 所示^[18]。实验结果表明,在 $4122\ \text{nm}$ 处产生的最大输出功率为 $76\ \text{mW}$, 阈值低至 $154\ \text{mW}$, 激光输出谱宽为 $6\ \text{nm}$ 。虽然对于包层波导中激光谱宽变窄的原因尚未完全清楚,但波导结构表现出波长选择性特征,这在 McDANIEL 等人

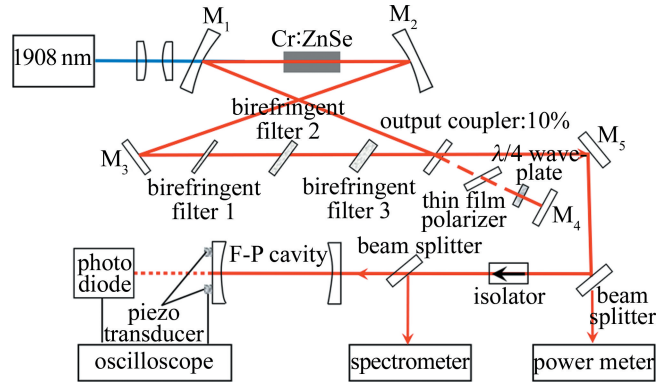
图2 Fe:ZnSe波导端面显微镜图^[18]Fig. 2 Optical micrograph of Fe:ZnSe waveguide end face^[18]

的工作中同样观察到了^[21],该实验展示了波导结构在自由运行下获得窄谱宽激光的优势,对创建紧凑型全固态 Fe:ZnSe 激光器系统提供了一种可能。

热等静压技术和波导结构分别从金属离子扩散掺杂方式和晶体结构方面,证明了在获得窄谱宽激光方面的优势。针对晶体生长方式对输出激光谱宽的影响,研究人员同样开展了相关工作。2017年,EVANS等人报道了工作在 $5.2\ \mu\text{m}$ 波长下的 Fe: CdMnTe 激光器,实验装置如图3所示。其中 Fe: CdMnTe 样品为使用布里奇曼晶体生长技术从熔体中生长而来^[15],实验中获得了最大平均功率为 $810\ \text{mW}$ 、光谱宽度为 $1\ \text{nm}$ 的 $5223\ \text{nm}$ 激光输出。由于 Fe: CdMnTe 晶体由布里奇曼法生长而来,离子掺杂均匀性得到了改善,使得输出谱宽同其它晶体生长技术输出谱宽相比变得更窄。

图3 Fe: CdMnTe 激光器实验装置^[15]Fig. 3 Schematic of Fe: CdMnTe laser experimental setup^[15]

上述3种方法仅是通过改变增益介质本身特性实现窄谱宽激光输出。此外,还可通过使用光栅、法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)标准具等光学元件实现窄谱宽操作。2019年,WANG等人报道了一种基于自种子光环型腔结构的波长可调谐连续波单频 Cr: ZnSe 激光器,实验装置如图4所示^[12]。在谐振腔中插入3个不同厚度的石英双折射滤光片,得到了窄谱宽激光输出,其输出光谱特性由分辨率为 $0.5\ \text{nm}$ 的光谱仪和法布里-珀罗扫描干涉仪进行监测分析;通过旋转双折射滤光片的角度,可以实现波长调谐;实验中获得了最大单频功率 $0.92\ \text{W}$,谱宽约为 $50\ \text{MHz}$ 的激光输出。

图4 单频可调谐 Cr: ZnSe 激光器实验装置图^[12]Fig. 4 Experimental setup of tunable single-frequency Cr: ZnSe laser^[12]

2 窄谱宽中红外光纤激光器

窄谱宽光纤激光器具有效率高、光束质量好等优点,其中分布布喇格反射(distributed Bragg reflection, DBR)和分布反馈(distributed feedback, DFB)光纤激光器是两种典型代表。DBR光纤激光器谐振腔较短,两端为窄带光纤布喇格光栅,而DFB光纤激光器则是在有源光纤上直接刻写相移光栅产生窄带滤波效应实现窄谱宽输出。由于材料和激光技术的限制, $3\ \mu\text{m}$ 波段单频光纤激光器的发展相对缓慢,相关研究工作总结于表2中。

表2 $3\ \mu\text{m}$ 波段窄谱宽光纤振荡器研究进展Table 2 Progress of narrow-linewidth fiber lasers at $3\ \mu\text{m}$

年份	光纤基质	输出特性		
		波长/ μm	功率/W	谱宽
2021 ^[22]	Er: ZBLAN	2.7	约0.2	0.4 nm
2017 ^[23]	Er: ZBLAN	2.71~2.82	1.5	1.5 nm
2015 ^[24]	Ho, Pr: ZBLAN	2.825~2.975	7.2	<0.14 nm
2015 ^[25]	Er: ZBLAN	2.794	0.012	<20 kHz
2014 ^[26]	Er: ZBLAN	2.8	0.98	0.9 nm
2013 ^[27]	Ho, Pr: ZBLAN	2.914	0.011	<0.4 nm
2007 ^[28]	Er: ZBLAN	2.7~2.83	2	1.27 GHz

2015年,BERNIER等人报道了首个 $3\ \mu\text{m}$ 波段掺 Er³⁺的DFB单频光纤激光器,实验装置如图5所示^[25]。全光纤腔包含高掺杂 Er³⁺的氟化物光纤,通过红外飞秒脉冲和抖动相位掩模方法嵌入光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating, FBG),实验结果表明,在 $2794.4\ \text{nm}$ 波长处获得了谱宽为 $20\ \text{kHz}$ 的输出。由于只有一小部分抽运功率被吸收,最大连续输出功率和斜率效率仅为 $12\ \text{mW}$ 和 0.19% 。

在单掺 Ho³⁺的多组分氟化物光纤中,激光下能级寿命高于上能级,为了产生 $3\ \mu\text{m}$ 波段激光,一般采取与 Pr³⁺离子共掺杂的方法。HUDSON等人通过 Ho³⁺/

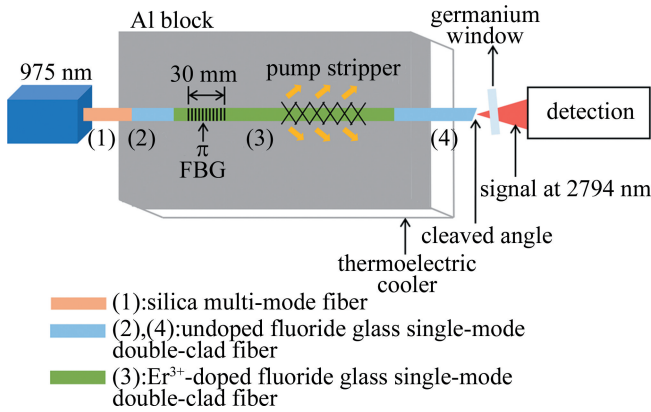


图 5 Er^{3+} 掺杂单频光纤激光器实验装置图^[25]

Fig. 5 Schematic of Er^{3+} -doped single-frequency fiber laser^[25]

Pr^{3+} 共掺的氟化物光纤,成功实现了单纵模窄谱宽光纤激光输出,实验装置如图 6 所示^[27]。利用飞秒脉冲激光和逐点刻写技术,将 FBG 直接刻写在 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺氟化物光纤中获得窄谱宽输出。实验结果表明,在两台 1150 nm 半导体激光器抽运下实现 2914 nm 单频输出,最大输出功率为 11 mW,斜率效率为 1.4%,激光谱宽小于 0.4 nm。

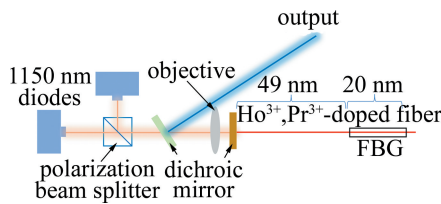


图 6 单频 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器实验原理图^[27]

Fig. 6 Schematic of the single-frequency $\text{Ho}^{3+}, \text{Pr}^{3+}$ -doped ZBLAN fiber laser^[27]

3 窄谱宽中红外量子级联激光器

量子级联激光器是一种基于量子阱子带间电子跃迁的半导体激光器,发射光谱可覆盖几微米至 250 μm 以上很宽的范围。QCL 由于较小的谱宽展宽系数和超快辐射过程,其固有的谱宽仅有几十赫兹,接近肖洛-汤斯极限^[29]。然而,当量子级联激光器在自由运行状态下,由于存在不期望的噪声,致使输出激光谱宽存在一定展宽,通常为兆赫兹量级。几种降噪稳频的方法已被证明在激光谱宽压缩方面具有良好效果。

第 1 种方法是利用气体分子吸收线作为频率鉴别器,通过检测激光频率变化所产生的误差信号控制 QCL 电流进行稳频。CAPPELLI 等人报道了利用分子吸收线参考技术亚千赫兹谱宽中红外 QCL^[30]。通过把 QCL 激光频率锁定到二氧化碳吸收线,获得了谱宽为 760 Hz 的激光输出。除了使用气体作为频率鉴别

器外,研究者还使用光延迟线对 QCL 进行稳频处理。2019 年, SHEHZAD 等人报道了利用光延迟线实现 10 kHz 谱宽的 QCL,与自由运行的激光器相比,谱宽减少了近 60 倍^[31]。

第 2 种方法是利用光频梳的高稳定性实现 QCL 的窄谱宽输出。BORRI 等人报道了通过光注入实现与频率梳直接相连的中红外 QCL 实验系统^[32],实验结果表明,激光谱宽从几个 MHz 缩小到 20 kHz。虽然这种技术可以将 QCL 频率稳定到亚赫兹水平,但这种方法的实验装置通常十分复杂。

上述两种方法为主动稳频技术,此外还可以采取被动稳频的方法。2020 年, ZHAO 等人提出了一种利用光反馈对 QCL 进行被动稳频的简易实验装置,如图 7 所示^[33]。QCL 发射的激光被光束分束器 (beam splitter, BS) BS_1 分成两束,一束通过金镜反射提供反馈,反馈光强度受偏振器 P_1 和 P_2 控制,大小由功率计监测;另一路径的光被光束分束器 BS_2 分成两路,一束光入射到傅里叶变换红外光谱仪 (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) 用于表征频率噪声,另一束光穿过一氧化碳吸收池,经光探测器 (photo detector, PD) 转换为电信号,最后由电频谱分析仪 (electrical spectrum analyzer, ESA) 测量功率谱密度。实验结果表明,光谱宽度从 7.6 MHz 缩小到 107 kHz,在不使用任何反馈相位控制的情况下,实现了对 QCL 谱宽的压缩,并且该方法不仅适用于 F-P 的 QCL,而且还可用于分布式反馈 QCL 和分布式布喇格反射 QCL。

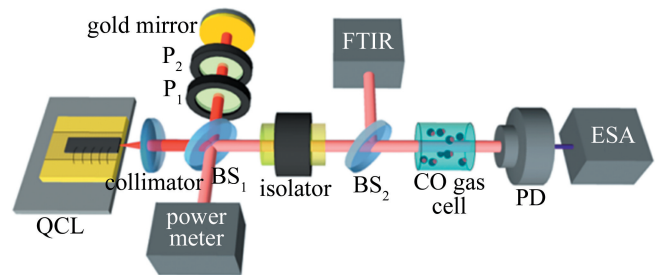


图 7 光强反馈稳频实验装置示意图^[33]

Fig. 7 Schematic of the strong optical feedback stabilized quantum cascade laser^[33]

以上技术实现窄谱中红外激光一般输出功率较低,且波长调谐范围小,在一些要求输出功率大、调谐范围大的场合需要采取光参量振荡技术。

4 窄谱宽中红外光参量振荡器

光参量振荡激光器是实现 3 μm ~5 μm 中红外激光器输出的主要方法之一,具有全固化、小型化、结构

简单等优点。通过周期、角度和温度等多种调谐方式, OPO 技术可实现红外、可见光甚至紫外激光输出, 是可调谐激光产生的重要手段。如图 8 所示, OPO 通常由 3 个部分组成, 即非线性晶体、抽运源和谐振腔。基于晶体的 2 阶非线性效应, 将频率为 ω_p 的抽运光转换为两束参量光, 其中低频光 ω_i 被称为闲频光, 高频光 ω_s 被称为信号光。根据谐振腔内振荡的频率数目, OPO 分为单谐振 OPO 和双谐振 OPO。相比而言, 单谐振腔虽然抽运阈值较高, 但光谱特性和功率稳定性好, 高功率条件下不易发生参量逆转换^[34]。OPO 工作效率与抽运源和非线性晶体等多种因素有关, 而非线性晶体起着决定性作用。可用于 OPO 的非线性晶体很多, 如 MgO:PPLN、ZnGeP₂、AgGaSe₂、KTiOAsO₄ 和 KTiOPO₄ 等。其中, 基于准相位匹配 (quasi-phase matching, QPM) 方式的 MgO:PPLN 具有非线性系数大、调谐范围宽等优点, 在实现宽调谐和高功率的中红外激光输出方面具有重大潜力, 是 3 μm ~ 5 μm 中红外 OPO 的理想选择。

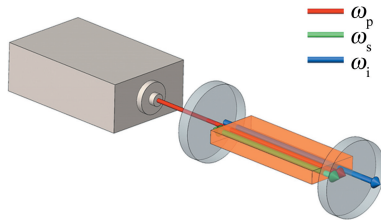


图 8 光参量振荡器示意图

Fig. 8 Schematic of optical parametric oscillator

在非线性频率变换过程中, 光参量振荡器必须同时遵守能量守恒和动量守恒^[35]:

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_s} \quad (1)$$

$$\omega_p n_p = \omega_i n_i + \omega_s n_s \quad (2)$$

式中, $\lambda_p, \lambda_i, \lambda_s$ 分别为抽运光、闲频光和信号光的波长; $\omega_p, \omega_i, \omega_s$ 分别为抽运光、闲频光和信号光的频率; n_p, n_i, n_s 分别是抽运光、闲频光和信号光的折射率。此外, 对基于 QPM 方式的 MgO:PPLN OPO, 应考虑相位失配参数 Δk ^[35]:

$$\Delta k = \left(\omega_p n_p - \omega_s n_s - \omega_i n_i - \frac{2\pi c}{\Lambda} \right) / c \quad (3)$$

式中, Λ 表示非线性晶体的极化周期; c 为光速。当 $\Delta k = 0$ 时, OPO 符合最佳匹配条件, (3) 式可写成^[35]:

$$\frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_s}{\lambda_s} - \frac{n_i}{\lambda_i} - \frac{1}{\Lambda} = 0 \quad (4)$$

通过 (4) 式可以计算得 MgO:PPLN OPO 所允许

输出的特征参数。由 OPO 需要满足的能量守恒和相位匹配条件, 可以得到闲频光谱宽 $\Delta\lambda_i$ 为:

$$\Delta\lambda_i = \frac{|\lambda_s^2 \Delta\lambda_p \pm \lambda_p^2 \Delta\lambda_s|}{(\lambda_s - \lambda_p)^2} \quad (5)$$

式中, $\Delta\lambda_s$ 为信号光谱宽, $\Delta\lambda_p$ 为抽运光谱宽。为得到窄谱宽闲频光, 可通过一定技术对振荡信号光的光谱宽进行约束, 从而间接压缩闲频光谱宽。振荡信号光谱宽因采用的约束技术不同而有所差异, 一般情况下不容易受到干扰而保持相对稳定。当 $\Delta\lambda_s = 0.05 \text{ nm}$ 时, 闲频光谱宽和抽运光谱宽关系曲线如图 9 所示。其中, 实线和虚线分别对应 (5) 式中的两种情况, 表示闲频光谱宽的范围。可以看出, 光学参量变换过程中, 闲频光谱宽与抽运光谱宽成正比。因此, 窄谱宽激光抽运源, 有利于实现高效率窄谱宽中红外激光输出。然而, 由于非线性晶体的增益带宽较宽, 通常 OPO 在自由运行时输出的激光谱宽较宽, 最高可达几十纳米, 尤其在高功率运行时谱宽展宽更为明显。

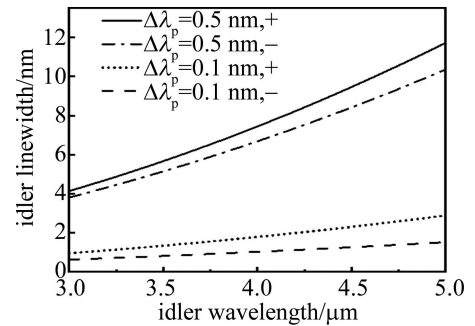


图 9 抽运光线宽与闲频光线宽关系曲线

Fig. 9 Idler linewidth at different pump light linewidth

表 3 中列出了近年来窄谱宽中红外 OPO 的主要进展及性能参数。目前, 基于 OPO 3 μm ~ 5 μm 中红外输出谱宽最小为 1 kHz@ 2.7 μm ~ 4.2 μm ^[36], 调谐范围最宽为 2128.4 nm ~ 5103.2 nm。为实现 OPO 窄谱宽激光输出, 需要采用一定的技术手段对信号光或者闲频光谱宽进行约束。

一种常用的谱宽压缩方法是利用腔内光谱选择器来抑制谐振腔内的激光光谱宽度, 如体布喇格光栅 (volume Bragg grating, VBG) 和标准具。VBG 具有良好的光谱选择性, 已被广泛用于获得高功率窄谱宽输出^[45-47]。2015 年, PENG 等人报道了一种由 1064 nm 主振荡功率放大器 (master oscillator power amplifier, MOPA) 抽运的高功率、窄谱宽 2.907 μm PPMgLN 光参量振荡器, 实验装置如图 10 所示^[46]。OPO 自由运行时, 在 2.907 μm 时的最大平均输出功率为 71.6 W, 斜率效率为 26.7%, 是当时已知的 PPMgLN OPO 在此

表 3 窄谱宽中红外 OPO 研究进展
Table 3 Progress of narrow-linewidth mid-infrared OPO

年份	抽运源	工作物质	输出特性		谱宽
			波长/ μm	功率/W	
2020 ^[37]	光纤激光	MgO:PPLN	3.7	0.0735	0.271 nm
2018 ^[38]	Nd:YVO ₄	MgO:PPLN	2.9~4.1	1.1	—
2017 ^[39]	光纤激光	MgO:PPLN	3.017	2.5	0.42 nm
2017 ^[40]	掺 Yb 光纤激光	MgO:PPLN	2.85~3.05	2.67	0.35 nm
2014 ^[41]	Nd:YAG	MgO:PPLN	2.1	7.1	0.6 nm
2014 ^[42]	掺 Yb 光纤激光	MgO:PPLN	3.4	11	<1.65 MHz
2013 ^[43]	Nd:YAG	MgO:PPLN	3.0~3.5	—	<5.4 GHz
2012 ^[44]	光纤激光	MgO:PPLN	2.7~4.2	1	80 kHz

波段最高输出功率;当使用 VBG 作为腔镜时,在 2907.55 nm 处的最大平均功率为 51.7 W,斜率效率为 22.5%,并且 OPO 激光谱宽由自由运行的 9 nm 压缩到 0.7 nm 以下,实验表明,VBG 在缩小中红外闲频光谱宽方面发挥着关键作用。然而,通过调整 VBG 和 PPMgLN 的温度,闲频光可调谐范围仅为 8 nm。

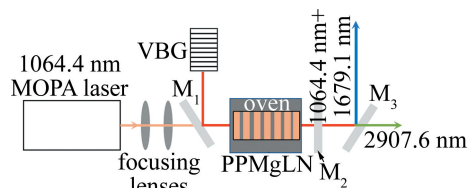


图 10 基于体光栅的 PPMgLN OPO 实验装置图^[46]

Fig. 10 Experimental setup of PPMgLN OPO based on VBG^[46]

为了同时实现 OPO 的宽调谐和窄谱宽输出,标准具成为一种有力的工具。2020 年,LI 等人报道了一种波长可调谐的啁啾强度调制光参量振荡器,实验装置如图 11 所示^[48]。1064 nm 抽运光经过电光调制器,调制频率范围为 10 MHz~2.1 GHz,调制后的光通过一个掺镱光纤放大器进行放大,通过在腔内插入 0.2 mm 厚的 F-P 标准具,限制振荡激光的谱宽。在抽运光为

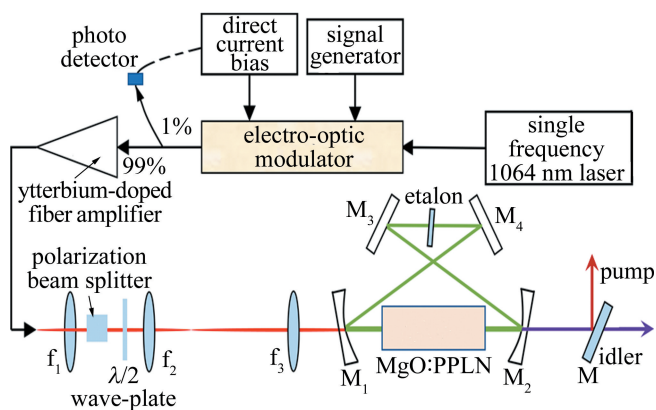


图 11 强度调制 OPO 实验装置示意图^[48]

Fig. 11 Experimental setup of the intensity modulated OPO^[48]

15.2 W 时,获得 2.16 W 闲频光输出,最大转换效率为 16.5%。通过改变晶体的温度,闲频光波长从 3.1 μm 调整到 3.8 μm 。实验发现,在 OPO 工作于自由运行状态下,当抽运功率超过 10 W 时腔内会出现多模振荡。当标准具插入后,发现在相同的抽运功率水平下闲频光谱中没有纵模拍频现象,表明闲频光是单频振荡。在调制频率为 300 MHz 的情况下,测得频率不稳定性在 200 s 内小于 1.5 Hz。

通过使用标准具等光谱选择元件,可以起到压缩谱宽的效果,但同时也会带来额外的损耗。另一种谱宽压缩方法是种子光注入技术,即利用一个窄谱宽的激光器作为主振荡器,结合使用 OPO 进行放大,得到大功率、窄谱宽的中红外激光输出。如图 12 所示^[49],2021 年,ERUSHIN 等人报道了一种种子光注入光参量振荡器。抽运光为 1053 nm 的 Nd:YLF 激光器,最大脉冲能量为 1 mJ,激光谱宽为 0.11 nm。种子光为二极管激光器,通过改变温度可以使输出波长在 1538 nm~1544 nm 范围内连续调整。实验结果表明,在未注入

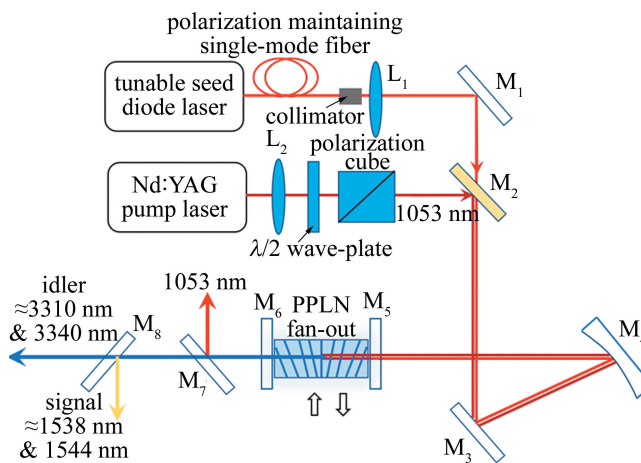


图 12 种子光注入窄谱宽光参量振荡器实验装置示意图^[49]

Fig. 12 Experimental setup of the narrow-linewidth OPO with seed light injection^[49]

种子光时,抽运光转换为闲频光的效率为 5.8%,谱宽约为 18 nm。种子光注入后,抽运光转换为闲频光的效率为 6.15%,谱宽为 2 nm 左右。该实验证明了将 OPO 与种子光注入实现中红外光源输出的可行性,同时体现了种子光注入在激光谱宽压缩、输出波长稳定、波束质量改善等方面的独特作用。

在如何通过 MgO:PPLN OPO 获得窄谱宽、宽调谐中红外激光方面,本课题组开展了有关研究工作。如图 13 所示,搭建了一种基于 F-P 标准具的窄谱宽 OPO 实验装置。1064 nm 抽运源为一种基于非对称平平腔设计的二极管侧抽运 Nd:YAG 激光器,在 10 kHz 的重复频率下产生超过 30 W 的线性偏振输出,脉冲宽度为 220 ns。MgO:PPLN 晶体放置在温度精度为 0.1 °C 温控炉中,通过改变温度实现 OPO 输出波长调谐。为获得窄谱宽输出,在腔内放置了 F-P 标准具。实验中测得信号光谱宽约为 0.03 nm,根据(5)式理论计算闲频光谱宽小于 1 nm。

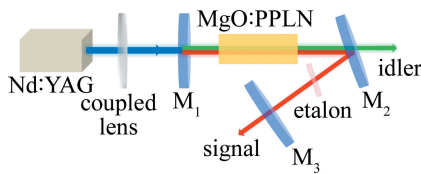


图 13 窄谱宽 MgO:PPLN OPO 实验原理示意图

Fig. 13 Schematic setup of narrow-linewidth MgO:PPLN OPO

遗憾的是,当波长在 4 μm 波段以上时,铌酸锂晶体存在光子吸收效应,无法兼顾高功率和窄谱宽输出。ZnGeP₂ 晶体非线性系数高 (75 pm/V),透射光谱范围宽 (2 μm ~ 12 μm),在中、远红外激光产生中具有重要应用。如图 14 所示,2018 年,本课题组报道了 ZnGeP₂ OPO 产生 4.3 μm 窄谱宽激光的实验研究^[50]。对于波长小于 2 μm 的激光,ZnGeP₂ 晶体具有较强的吸收,因此目前的工作大都基于 2.1 μm 钛激光抽运源。然而用 2.1 μm 激光抽运 ZnGeP₂ OPO 产生 4.3 μm 激光只能采用 I 类相位匹配方式,且 4.3 μm 处于简并点附近,输出谱宽可以达到 200 nm,不利于获得窄谱宽激

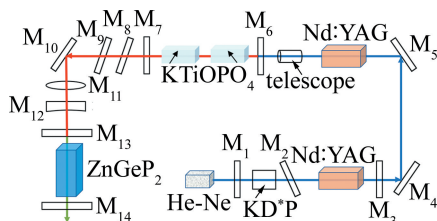


图 14 KTiOPO₄ OPO 抽运 ZnGeP₂ OPO 实验装置^[50]

Fig. 14 Experimental setup of ZnGeP₂ OPO pumped by KTiOPO₄ OPO laser^[50]

光。为此,本课题组利用 1064 nm 抽运 KTiOPO₄ OPO 产生 2.7 μm 抽运源,然后基于 II 类匹配方式,用 2.7 μm 激光抽运 ZnGeP₂ OPO 获得 4.3 μm 波段窄谱宽激光输出。实验结果表明,当抽运波长为 2.7 μm 时,在 4.26 μm 处获得最大单脉冲能量 2.12 mJ,谱宽约为 30 nm,取得了良好的谱宽压缩效果。

硒镓钷 (BaGa₄Se₇, BGSe) 是一种具有宽光谱透过范围的新型中红外非线性晶体 (0.47 μm ~ 18 μm),其有效非线性系数大,损伤阈值高,在宽调谐、窄谱宽中红外激光方面具有研究价值。2022 年,本课题组首次报道了一种基于标准具的 L 型窄谱宽 BGSe 光学参量振荡器,实验装置如图 15 所示^[51]。在自由运行下状态时, I 型相位匹配下 BGSe (56.3°, 0°) 输出峰值波长为 3529 nm,谱宽为 4.53 nm。在插入标准具后,谱宽减小到 1.27 nm ~ 2.05 nm,输出光谱如图 16 所示。当标准具倾斜角度为 2.34° 时,谱宽为 2.05 nm,峰值波长仍为 3529 nm;当标准具倾斜角为 3.90° 时,峰值波长为 3534.9 nm,谱宽为 1.27 nm,这是目前报道的 BGSe OPO 最窄谱宽。同时,在插入标准具后光束质量也得到了改善。

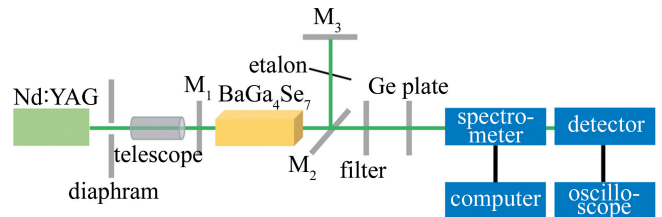


图 15 窄谱宽硒镓钷光参量振荡器实验装置^[51]

Fig. 15 Experimental setup of narrow-linewidth BaGa₄Se₇ OPO^[51]

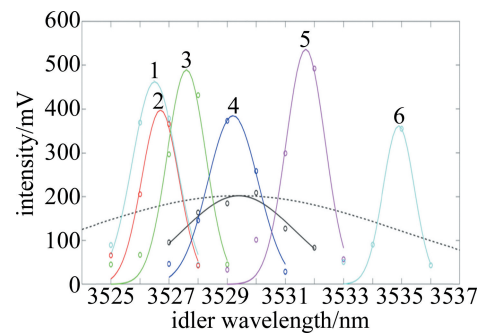


图 16 硒镓钷光参量振荡器输出光谱图^[51]

Fig. 16 Schematic of output spectra of BaGa₄Se₇ OPO^[51]

5 结束语

谱宽是激光器的重要指标之一,窄谱宽激光在诸多应用方面都具有优势。实现窄谱中红外激光输出的方法有很多,中红外固体激光器可以通过对过渡金属

离子掺杂、扩散工艺的控制或改善晶体生长方式等来实现窄谱宽激光输出,光纤激光器通过反射光栅设计可获得单频激光输出。量子级联激光器固有的谱宽仅有几十赫兹,在窄线宽激光方面具有重大潜力,可采用饱和吸收稳频、光反馈稳频等方法实现极窄谱宽激光输出。中红外 OPO 采取种子光输入、在谐振腔内插入标准具或体光栅可以将中红外激光谱宽由十几纳米压缩到 2 nm 以下。其中,谐振腔内插入标准具的 MgO:PPLN OPO 具有高输出功率、宽波长调谐和成熟抽运源的优点,是产生 3 μm ~ 5 μm 窄谱中红外激光的有效技术手段。另外,随着新型非线性晶体的出现,将弥补 MgO:PPLN OPO 波长长于 4 μm 输出功率急剧下降的缺点,3 μm ~ 5 μm 窄谱光学参量振荡器将会取得更大突破,在 4 μm ~ 5 μm 波段实现更高功率激光输出,并创造出新的应用前景。

参 考 文 献

- [1] FAN J X. Status quo and trend of infrared system and technologies for America's ballistic missile defense system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 536-540(in Chinese).
范晋祥. 美国弹道导弹防御系统的红外系统与技术的发展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5):536-540.
- [2] MOULTON P, DERGACHEV A, ISYANOVA Y, *et al.* Recent advances in solid state lasers and nonlinear optics for remote sensing [C]// *Conference on Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III*. Bellingham, USA: International Society for Optical Engineering, 2003: 193-202.
- [3] GUO B J, WANG Y, PENG C, *et al.* Laser-based mid-infrared reflectance imaging of biological tissues[J]. *Optics Express*, 2004, 12(1): 208-219.
- [4] VAN HERPEN M, TE LINTEL HEKKERT S, BISSON S E, *et al.* Development of a powerful continuously tunable mid-infrared CW PPLN OPO for trace gas detection[C]// *ALT'01 International Conference on Advanced Laser Technologies*. Bellingham, USA: International Society for Optical Engineering, 2002: 16-21.
- [5] VAINIO M, SILTANEN M, PELTOLA J, *et al.* Grating-cavity continuous-wave optical parametric oscillators for high-resolution mid-infrared spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(4): A1-A10.
- [6] RICHTER D, FRIED A, WERT B P, *et al.* Development of a tunable mid-IR difference frequency laser source for highly sensitive airborne trace gas detection[J]. *Applied Physics*, 2002, B75(2/3): 281-288.
- [7] KRZEMPEK K, JAHJAH M, LEWICKI R, *et al.* CW DFB RT diode laser based sensor for trace-gas detection of ethane using novel compact multipass gas absorption cell[J]. *Applied Physics*, 2013, B112(4):461-465.
- [8] ELVIN R, HOTH G W, WRIGHT M, *et al.* Cold-atom clock based on a diffractive optic[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38359-38366.
- [9] REN T, WU C, YU Y, *et al.* Development progress of 3-5 μm mid-infrared lasers: OPO, solid-state and fiber laser[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(23): 11451.
- [10] TURNER E J, McDANIEL S A, TABIRYAN N, *et al.* Rapidly tunable HIP treated Cr:ZnSe narrow-linewidth laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12282-12288.
- [11] LI Y Y, JU Y L, DAI T Y, *et al.* A gain-switched Fe:ZnSe laser pumped by a pulsed Ho,Pr:LLF laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2019, 36(4): 24-26.
- [12] WANG Q, LIU C, QI L, *et al.* Wavelength tunable single-frequency Cr:ZnSe laser[C]// *2019 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Laser Technology and Applications*. Bellingham, USA: International Society for Optical Engineering, 2019: 114370H.
- [13] DAI S, FENG G, HONG Z, *et al.* 4. 24 μm mid-infrared laser based on a single Fe²⁺-doped ZnSe microcrystal[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(3): 411-414.
- [14] EVANS J W, STITES R W, HARRIS T R. Increasing the performance of an Fe:ZnSe laser using a hot isostatic press[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(12): 4296-4303.
- [15] EVANS J W, DOLASINSKO B D, HARRIS T R, *et al.* Demonstration and power scaling of an Fe: CdMnTe laser at 5. 2 microns[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(3): 860-867.
- [16] STITES R W, McDANIEL S A, BARNES J O, *et al.* Hot isostatic pressing of transition metal ions into chalcogenide laser host crystals [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(10): 3339-3353.
- [17] YUAN J H, CHEN Y, YANG H Y, *et al.* Investigation of a gain-switched Cr²⁺:ZnSe laser pumped by an acousto-optic Q-switched Ho:YAG laser[J]. *Quantum Electronics*, 2016, 46(9): 772-776.
- [18] LANCASTER A, COOK G, McDANIEL S A, *et al.* Mid-infrared laser emission from Fe: ZnSe cladding waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(3): 885-895.
- [19] MACDONALD J R, BEECHER S J, LANCASTER A, *et al.* Ultra-broad mid-infrared tunable Cr:ZnSe channel waveguide laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 21(1): 375-379.
- [20] CHEN M, CUI H, LI W, *et al.* Reparative effect of diffusion process on host defects in Cr²⁺ doped ZnS/ZnSe[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 597(17): 124-128.
- [21] McDANIEL S A, BERRY P A, SCHEPLER K L, *et al.* Gain-switched operation of ultrafast laser inscribed waveguides in Cr:ZnSe [C]// *Solid State Lasers XXIV: Technology and Devices*. Bellingham, USA: International Society for Optical Engineering, 2015: 93420E.
- [22] SHEN Y, WANG Y, ZHU F, *et al.* 200 μJ , 13 ns Er:ZBLAN mid-infrared fiber laser actively Q-switched by an electro-optic modulator [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 1141-1144.
- [23] SHEN Y, WANG Y, LUAN K, *et al.* High peak power actively Q-switched mid-infrared fiber lasers at 3 μm [J]. *Applied Physics*, 2017, B123(4): 105-111.
- [24] CRAWFORD S, HUDSON D D, JACKSON S D. High-power broadly tunable 3 μm fiber laser for the measurement of optical fiber loss [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1502309.
- [25] BERNIER M, MICHAUD-BELLEAU V, LEVASSEUR S, *et al.* All-fiber DFB laser operating at 2. 8 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 81-84.
- [26] SHEN Y L, HUANG K, ZHU F, *et al.* Laser diode-pumped watt-level single mode heavily erbium-doped mid-infrared fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(3): 0314002(in Chinese).

- 沈炎龙, 黄珂, 朱峰, 等. LD泵浦瓦级单模高掺铒中红外光纤激光器[J]. 光子学报, 2014, 43(3): 0314002.
- [27] HUDSON D D, WILLIAMS R J, WITHFORD M J, *et al.* Single-frequency fiber laser operating at 2.9 μm [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2388-2390.
- [28] ZHU X Sh, JAIN R. Compact 2 W wavelength-tunable Er:ZBLAN mid-infrared fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2381-2383.
- [29] BAYRAKLI I. Frequency-stabilized narrow-linewidth double-mode quantum cascade laser[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(1): 22 (2022).
- [30] CAPPELLI F, GALLI I, BORRI S, *et al.* Subkilohertz linewidth room-temperature mid-infrared quantum cascade laser using a molecular sub-doppler reference[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 4811-4813.
- [31] SHEHZAD A, BROCHARD P, MATTHEY R, *et al.* 10 kHz linewidth mid-infrared quantum cascade laser by stabilization to an optical delay line[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(14): 3470-3473.
- [32] BORRI S, GALLI I, CAPPELLI F, *et al.* Direct link of a mid-infrared QCL to a frequency comb by optical injection[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1011-1013.
- [33] ZHAO B, WANG X, WANG C. Strong optical feedback stabilized quantum cascade laser[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(5): 1255-1261.
- [34] NIE H K, NING J, ZHANG B T, *et al.* Recent progress of optical-superlattice-based mid-infrared optical parametric oscillators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501008 (in Chinese). 聂鸿坤, 宁建, 张百涛, 等. 光学超晶格中红外光参量振荡器研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(5): 0501008.
- [35] WANG X C, WANG Y H, ZHENG H, *et al.* Wide-tunable mid infrared intra-cavity optical parametric oscillator based on multi-period MgO:PPLN[J]. *Current Optics and Photonics*, 2021, 5(1): 59-65.
- [36] RICCIARDI I, MOSCA S, PARISI M, *et al.* Sub-kHz-linewidth mid-infrared optical parametric oscillator[C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics*. New York, USA: IEEE, 2014; STh1N.3.
- [37] FENG J, CHENG X, LI X, *et al.* Highly efficient mid-infrared generation from low-power single-frequency fiber laser using phase-matched intracavity difference frequency mixing[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10(21): 7454-7461.
- [38] ZHAO J, CHENG P, XU F, *et al.* Watt-level continuous-wave single-frequency mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO:PPLN at 3.68 μm [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2018, 8(8): 1345-1352.
- [39] XING Y L, WANG L, HU Sh W, *et al.* Cavity-linewidth narrowing of 3 μm low threshold MgO:PPLN-OPO by volume Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0101006 (in Chinese).
- 邢廷伦, 王礼, 胡舒武, 等. 3 μm 低阈值 MgO:PPLN-OPO 布拉格体光栅腔谱宽压窄研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 10101006.
- [40] XING T, WANG L, HU S, *et al.* Widely tunable and narrow-bandwidth pulsed mid-IR PPMgLN-OPO by self-seeding dual etalon-coupled cavities[J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31810-31815.
- [41] JIAO Z, GUO J, HE G, *et al.* Narrowband intracavity MgO:PPLN optical parametric oscillator near degeneracy with a volume Bragg grating[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 56: 230-233.
- [42] ZEIL P, THILMANN N, PASISKEVICIUS V, *et al.* High-power, single-frequency, continuous-wave optical parametric oscillator employing a variable reflectivity volume Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29907-29913.
- [43] DOLASINSKI B, POWERS P. Narrow bandwidth tunable optical parametric generator[C]// *Nonlinear Frequency Generation and Conversion*. Bellingham, USA: International Society for Optical Engineering, 2013:8604H.
- [44] RICCIARDI I, DE TOMMASI E, MADDALONI P, *et al.* A narrow-linewidth optical parametric oscillator for mid-infrared high-resolution spectroscopy[J]. *Molecular Physics*, 2012, 110(17): 2103-2109.
- [45] JACOBSSON B, CANALIAS C, PASISKEVICIUS V, *et al.* Narrow-band and tunable ring optical parametric oscillator with a volume Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(22): 3278-3280.
- [46] PENG Y, WEI X, NIE Z, *et al.* High-power, narrow-bandwidth mid-infrared PPMgLN optical parametric oscillator with a volume Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 30827-30832.
- [47] HE G, GUO J, JIAO Z, *et al.* High-efficiency near-degenerate PPMgLN optical parametric oscillator with a volume Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(8): 1364-1366.
- [48] LI K, YANG S, WANG X, *et al.* Frequency chirped intensity modulated mid-infrared light source based on optical parametric oscillation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(1): 1500409.
- [49] ERUSHIN E, NYUSHKOV B, IVANENKO A, *et al.* Tunable injection-seeded fan-out-PPLN optical parametric oscillator for high-sensitivity gas detection[J]. *Laser Physics Letters*, 2021, 18(11): 116201-116207.
- [50] BIAN J T, YE Q, SUN X Q. ZnGeP₂ optical parametric oscillator 4.3 μm laser with narrow line-width[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(4):9-14(in Chinese). 卞进田, 叶庆, 孙晓泉. ZnGeP₂ OPO 产生 4.3 μm 波段窄线宽激光实验研究[J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(4):9-14.
- [51] BIAN J T, KONG H, YE Q, *et al.* Narrow-linewidth BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(4): 041901.