

激光与光电子学进展

基于光参量振荡及放大技术的长波固体激光研究进展

王海^{1,2}, 赵莉莉^{1,2}, 田俊涛^{1,2}, 李志永^{1,2*}, 谭荣清^{1,2}¹中国科学院空天信息创新研究院激光工程技术研究中心, 北京 100094;²中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 101408

摘要 差分吸收雷达(DIAL)是有害气体检测的重要设备,对激光源的输出波长和线宽特性具有较高的需求。近年来,光参量振荡和放大技术(OPO/OPA)在中长波红外激光输出方面不断取得突破,在获得高质量长波方面表现出较大发展潜力。整理了不同非线性晶体的特性,对部分晶体光参量振荡器的长波激光性能进行了归纳,主要包括输出功率、脉冲能量、调谐范围以及输出线宽,结合理论增益线宽计算以及近期的实验研究,分析总结了在实现窄线宽方面存在的主要问题,并展望了未来的技术路线和发展方向。

关键词 光参量振荡器; 窄线宽; 长波激光; 非线性晶体

中图分类号 O437

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223375

Research Progress of Long-Wave Solid-State Lasers Based on Optical Parametric Oscillation and Amplification Technology

Wang Hai^{1,2}, Zhao Lili^{1,2}, Tian Juntao^{1,2}, Li Zhiyong^{1,2*}, Tan Rongqing^{1,2}¹Laser Engineering Center, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;²School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

Abstract Differential absorption lidar (DIAL) is an important equipment for the detection of noxious gases. It has a high demand for the wavelength and linewidth of the laser sources. In recent years, optical parametric oscillation and amplification (OPO/OPA) technology has made breakthroughs in medium and long-wave infrared laser, showing great potential in obtaining high-quality long-wave laser. The characteristics of different nonlinear crystals are collected. The performance of long-wave laser obtained by some crystal optical parametric oscillators is generalized, including output power, pulse energy, tuning range and output linewidth. Combined with the theoretical gain linewidth calculation and recent experimental research, the main problems in realizing narrow linewidth are analyzed and summarized, furthermore, the future technical route furthermore, the development direction are prospected.

Key words optical parametric oscillation; narrow linewidth; long-wave laser; nonlinear crystal

1 引言

长波红外(8~12 μm)波段位于大气传输窗口^[1],涵盖多种气体分子的吸收峰,在光谱学^[2]、遥感^[3]、通信^[4]、大气环境检测^[5]以及光电对抗^[6]等领域具有广泛的应用价值。

对大气中有害气体的遥测,是大气环境检测中的

重要环节。基于差分吸收光谱技术研制的差分吸收雷达(DIAL)具有主动探测、工作距离远、探测精度高等特点,已广泛应用于多种有害气体的测量与监控^[7-8]。DIAL通常采用可调谐激光器作为光源,对激光器的输出性能(调谐范围、调谐速度、光束质量、输出线宽和脉冲能量等)具有较高要求,其中,为满足多组分有害气体的高分辨率探测,其输出线宽应尽可能窄。

收稿日期: 2022-12-23; 修回日期: 2023-01-30; 录用日期: 2023-02-06; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61875198, 61775215)、脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金(SKL2021KF04)、中国科学院仪器设备研制项目(YJKYYQ20210045)

通信作者: *zhiyongli@mail.ie.ac.cn

目前,长波红外激光输出主要有线性和非线性两种方法^[9]。其中,线性方法指增益介质的直接激发,主要包括 CO₂激光器和量子级联激光器。非线性方法则基于光学频率转换技术实现波长变换,包括差频(DFG)、光学参量振荡(OPO)和光学参量放大(OPA)技术。

在线性方法中,CO₂激光器^[10]是实现长波红外输出的主要手段,具有输出功率高、单脉冲能量大等优点,然而其在实现连续调谐方面难度较大,如中国科学院空天信息创新研究院的 Lu 等^[11]在 7 atm (1 atm = 101.325 kPa)下实现了连续的可调谐输出,对应的放电电压为 66 kV。量子级联激光器^[12]是实现中红外到太赫兹波段激光输出的重要技术,在谱宽控制、结构紧凑性等方面具有较大优势。然而由于有源区生长工艺的限制,难以实现高峰值功率的输出^[13]。

为了实现长波红外激光输出,非线性频率转换是一种有效的方法。在三种非线性频率转换技术中,

OPO^[14]仅需入射强泵浦光,OPA^[15]需入射强泵浦光和弱信号光,两者通常级联使用,用于获得高功率(能量)的激光输出,具有结构简单、可实现宽范围波长调谐等特点,在获得高性能长波激光输出方面具有较大潜力。本文就不同非线性晶体通过 OPO/OPA 技术获得长波红外激光的研究现状进行了分析和归纳,总结了在实现窄线宽方面存在的问题,并在技术路线和发展方向上提出了展望。

2 长波红外非线性晶体

2.1 晶体特性

目前应用于长波红外的非线性晶体^[16]主要有磷铍锌(ZnGeP₂, ZGP)、硫镓银(AgGaS₂, AGS)、硒镓银(AgGaSe₂, AGSe)、硒镓钡(BaGa₄Se₇, BGSe)、硒化镓(GaSe)、硒化镉(CdSe)、硫镓汞(HgGa₂S₄, HGS)等,详细晶体特性参数如表 1 所示。

表 1 长波非线性晶体的特性
Table 1 Characterization of the long-wave nonlinear crystals

Crystal properties	AgGaSe ₂	AgGaS ₂	GaSe	CdSe	ZnGeP ₂	BaGa ₄ Se ₇	HgGa ₂ S ₄
Symmetry	Square	Square	Hexagonal	Hexagonal	Square	Monoclinic	Square
Point group	$\bar{4}2m$	$\bar{4}2m$	$\bar{6}2m$	$\bar{6}mm$	$\bar{4}2m$	m	$\bar{4}$
Fusing point /°C	860	1238	-	1525	1025	1020	880
Pump source / μm	1.5–2	1–2	1–2	2	2	1–3	1–2
Lattice constant / \AA	5.992(a) 10.886(c)	5.756(a) 10.301(c)	3.742(a) 15.918(c)	-	-	7.625(a) 6.511(b) 14.702(c)	-
Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.011	0.015	0.162(//c) 0.02(\perp c)	0.06	0.36	0.007	0.025
Damage threshold	Low	Low	Low	Low	High	Very high	High
Light range / μm	0.7–18	0.5–13	0.65–18	0.75–20	0.74–12	0.47–18	0.5–13
Optical symmetry	Negative uniaxial	Negative uniaxial	Negative uniaxial	Positive uniaxial	Positive uniaxial	Biaxial	Negative uniaxial
$d_{\text{eff}}/(\text{pm}\cdot\text{V}^{-1})$	$d_{14}=33$	$d_{14}=13$	$d_{22}=56$	$d_{15}=18$	$d_{14}=75$	$d_{16}=31.5$	$d_{14}=24$
Reference	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]

其中,AGS 晶体和 AGSe 晶体损伤阈值较低(10、25 MW/cm²@1.06 μm , 35 ns, 1 Hz),且具有较为严重的走离效应,在应用于 OPO 方面受到了一定限制。GaSe 晶体由于具有较低的机械强度(莫氏硬度约为 0),容易发生断裂,且该晶体的生长难度较大,生长工艺有待提高。

CdSe 晶体和 BGSe 晶体是近年来得到快速发展的晶体,其中 CdSe 晶体机械强度较好(莫氏硬度为 3.25),通过双晶体结构可以弥补其较小的非线性系数(18 pm/V)。然而,对于 8 μm 波段的长波输出,该晶体对泵浦源有一定的要求(>2.3 μm)。BGSe 晶体则具有较高的非线性系数(31.5 pm/V)和损伤阈值(557 MW/cm²@1.06 μm , 5 ns, 1 Hz),在 1 μm 和 2 μm 泵浦源下均可以产生较高质量的长波输出。

HGS 晶体也具有较高的损伤阈值(80 MW/cm²@1.06 μm , 5 ns, 30 Hz),然而,该晶体生长难度较大,且各组分存在较大的不稳定性,目前仅俄罗斯等少数国家可以得到高光学质量的 HGS 单晶,限制了它的进一步应用。此外,正单轴的 ZGP 晶体,其较高的有效非线性系数(75 pm/V)、热导率(0.36 W·cm⁻¹·K⁻¹)以及损伤阈值(86 MW/cm²@2.09 μm , 21 ns, 1 kHz)使得其在光参量振荡过程具有较大优势,然而,由于透过率和双光子吸收的影响,对于 10 μm 以上的 OPO,该晶体的转换效率较低。

近年来,随着晶体生长和加工技艺的不断发展,国内外诸多学者针对不同晶体的非线性频率转换技术展开了研究,并取得了相应的进展。目前,基于 ZGP 晶体和 CdSe 晶体的长波光参量振荡(放大)器均已实现

W 级平均功率的输出,表征了 OPO/OPA 技术在长波红外激光输出方面的发展前景。

2.2 光参量振荡的理论增益线宽

在光参量振荡过程中,影响输出谱线宽度的因素主要包括泵浦光的线宽、泵浦光发散角以及光束间的相位失配等,其中根据光束谱线加宽引起的相位失配计算的理论增益线宽与实验输出线宽具有较高的匹配度,常用于反映不同 OPO 的输出线宽特性。

假设泵浦光的线宽不变,则输出闲频光的光谱增益宽度^[24]为

$$\Delta\lambda_i = \left| \frac{\lambda_i^2}{l_c} \left(n_i - n_s + \lambda_s \frac{\partial n_s}{\partial \lambda_s} - \lambda_i \frac{\partial n_i}{\partial \lambda_i} \right)^{-1} \right|, \quad (1)$$

式中: λ_i 和 n_i 分别代表闲频光波长和折射率; λ_s 和 n_s 代

表信号光的波长和折射率; l_c 代表该过程的相干长度。

通常,不同调谐方式下的折射率变化不同,其输出激光的理论增益线宽也不同。以 ZGP 晶体为例,根据角度相位匹配和温度相位匹配下的 Sellmeier 方程^[25-26]便可计算出不同调谐方式、不同相位匹配条件下的输出闲频光波长及其增益线宽。其中泵浦光波长为 $2.05 \mu\text{m}$,晶体长度为 20 mm 。

图 1 为角度调谐方式下 ZGP OPO 的输出波长及增益线宽的理论曲线,其中,图 1(a)、(c) 分别代表 I 类和 II 类相位匹配条件下的调谐曲线,图 1(b)、(d) 为对应的闲频光增益线宽。可见,在 $8.0 \sim 10.6 \mu\text{m}$ 范围内,II 类相位匹配条件下具有更窄的增益线宽。而且,两种相位匹配条件下,在调谐曲线的简并点附近,其增益线宽曲线均存在转折点($>1000 \text{ nm}$)。

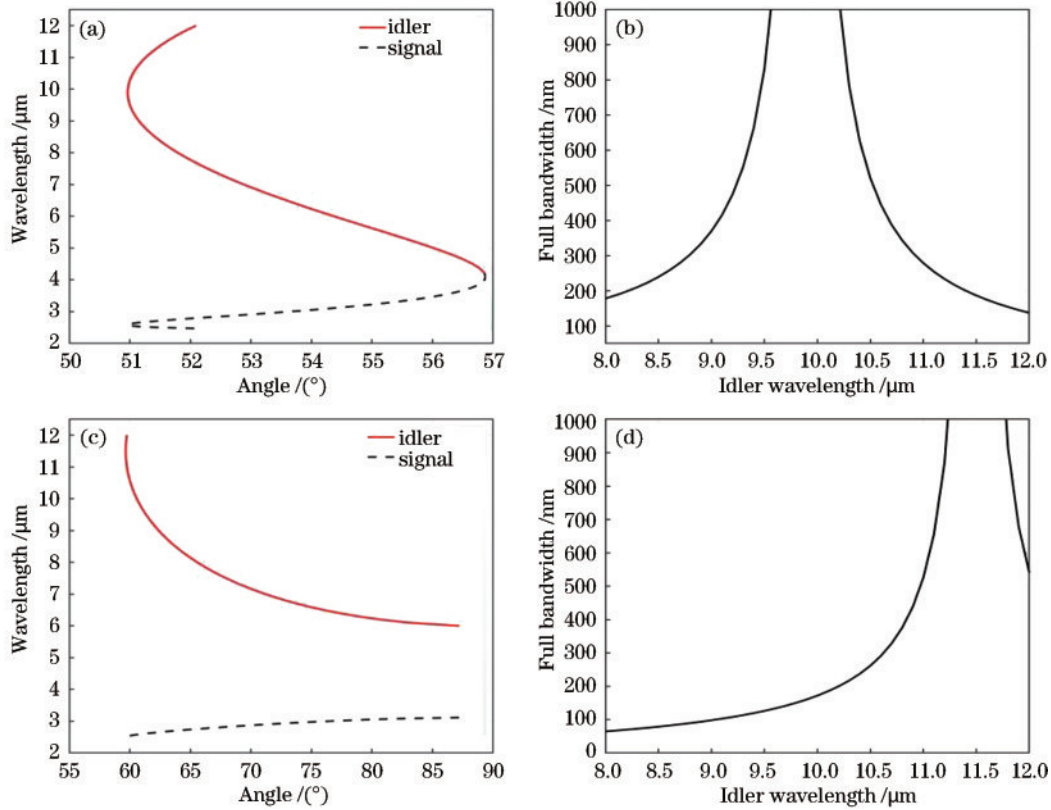


图 1 ZGP 晶体角度调谐下的输出波长及增益线宽。(a)(b) I 类相位匹配;(c)(d) II 类相位匹配

Fig. 1 Wavelength and full bandwidth of ZGP crystal at angle tuning. (a)(b) Class I phase matching; (c)(d) class II phase matching

同时,选择 $\theta=50.9^\circ$ (I 类)和 $\theta=63.1^\circ$ (II 类)两种切割角的晶体进行温度调谐计算,结果如图 2 所示。

图 2 为温度调谐方式下 ZGP OPO 的输出波长及增益线宽的理论曲线,其中,图 2(a)、(c) 代表两类相位匹配条件下的调谐曲线,图 2(b)、(d) 为对应的闲频光增益线宽。可见,在温度调谐下,II 类相位匹配也具有相对更窄的增益线宽。

根据 ZGP 晶体的理论计算可以看出,II 类相位匹配更适合窄线宽长波输出。其中角度调谐方式具有更宽的调谐范围,然而角度调谐往往需要较大的空间,且

存在一定的走离效应。

此外,不同泵浦源下,输出闲频光的理论增益线宽也不同。以 BGSe 为例,其常用的泵浦源有 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $2.05 \mu\text{m}$ 。其中, BGSe 为双轴晶体,其两传播模均是非寻常光,对应两个折射率,折射率较大的称为慢光(n_e),较小的称为快光(n_o)。

值得注意的是,在不同的主平面上,两传播模的折射率表示也不相同。结合该晶体在不同主平面、不同匹配条件下的有效非线性系数(d_{eff})^[27],可得在 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $2.05 \mu\text{m}$ 泵浦下的有效相位匹配过程包括 I-A

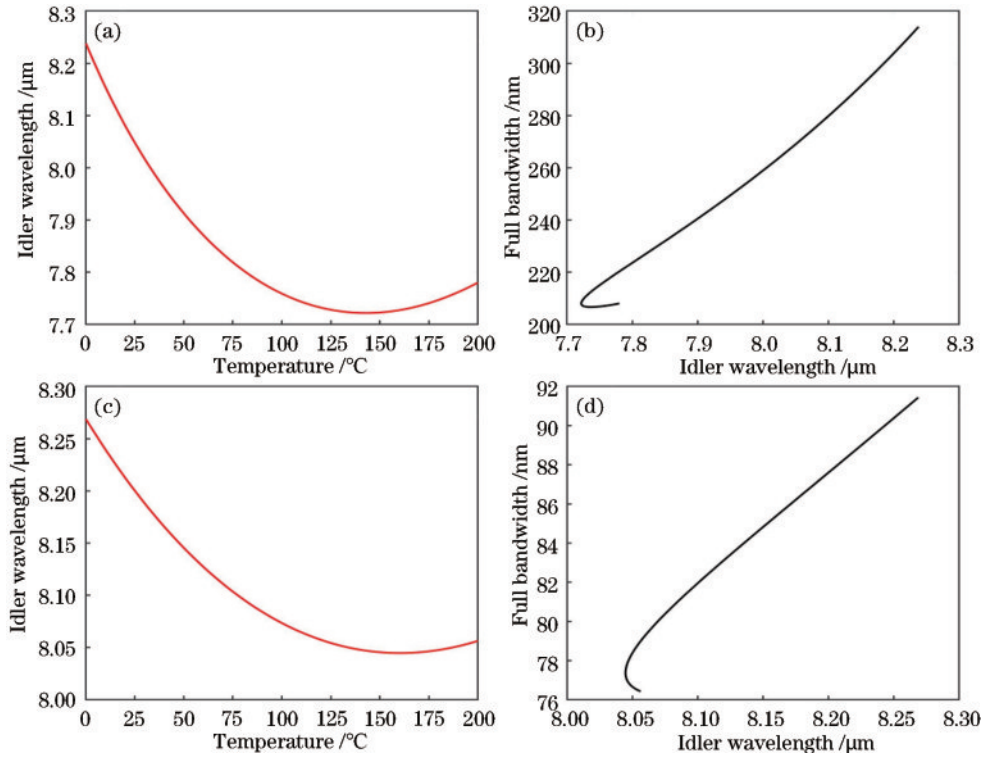


图 2 ZGP 晶体温度调谐下的输出波长及增益线宽。(a)(b) I 类相位匹配, $\theta=50.9^\circ$; (c)(d) II 类相位匹配, $\theta=63.1^\circ$
 Fig. 2 Wavelength and full bandwidth of ZGP crystal at temperature tuning. (a)(b) Class I phase matching, $\theta=50.9^\circ$; (c)(d) class II phase matching, $\theta=63.1^\circ$

($e_2 \rightarrow e_1 + e_1 @xoz$) 和 II-A ($e_2 \rightarrow e_1 + e_2 @yoz$) 两种情况, 其调谐曲线及增益线宽计算结果如图 3 所示。

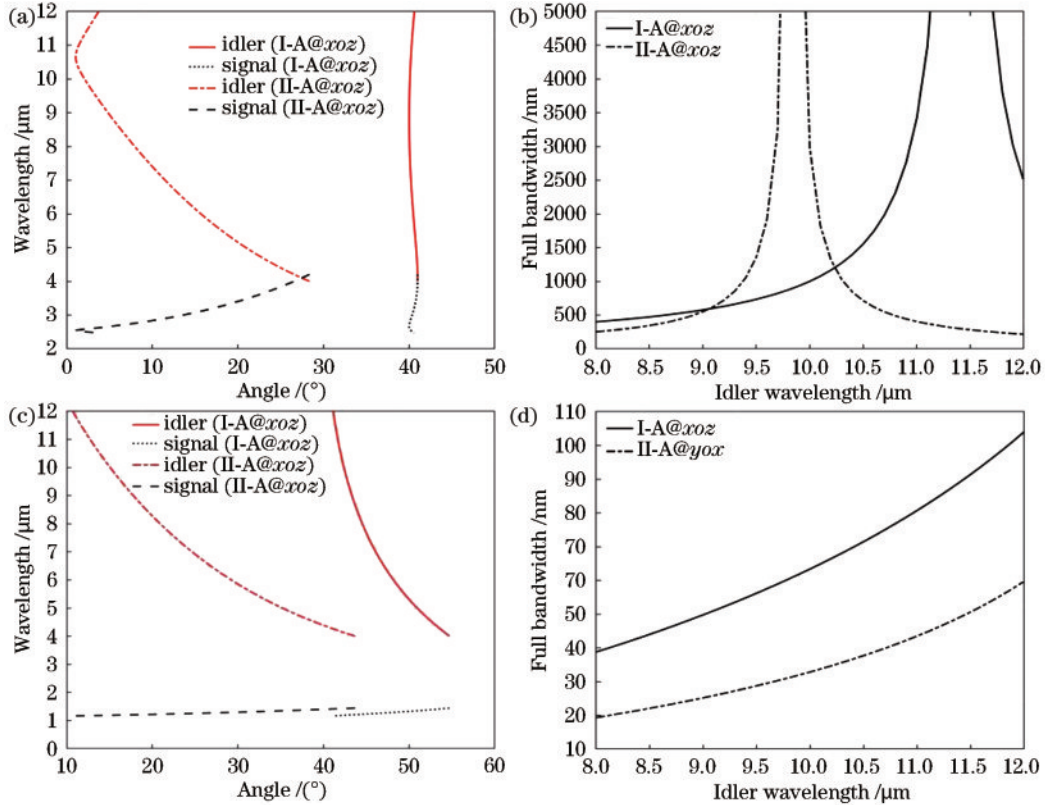


图 3 BGSe 晶体不同泵浦源下的输出波长及增益线宽。(a)(b) 2 μm 泵浦源, $\lambda_p=2.05 \mu\text{m}$; (c)(d) 1 μm 泵浦源, $\lambda_p=1.06 \mu\text{m}$
 Fig. 3 Wavelength and full bandwidth of ZGP crystal at different pump source. (a)(b) 2 μm pump source, $\lambda_p=2.05 \mu\text{m}$; (c)(d) 1 μm pump source, $\lambda_p=1.06 \mu\text{m}$

图 3 为 BGSe 晶体在不同泵浦源下的理论输出线宽特性,其中,图 3(a)、(c)分别为 2.05 μm 和 1.06 μm 泵浦下的调谐曲线,图 3(b)、(d)则对应两种泵源在不同相位匹配条件下的增益线宽。可以看到:在 2.05 μm 泵浦下,其理论增益线宽在数百纳米,且存在转折点 ($>5000 \text{ nm}$);当使用 1.06 μm 泵浦源时,在 8~12 μm 长波范围内其理论增益线宽均 $<110 \text{ nm}$ 。

综合以上计算和分析可以看到,不同晶体、不同泵浦源在不同相位匹配方式下的输出线宽特性均不同。对于多数非线性晶体,通常 II 类相位匹配更适用于窄线宽的输出;当使用 2 μm 泵浦源时,ZGP 晶体在窄线宽输出方面略优于 BGSe 晶体;当使用 1 μm 泵浦源时,BGSe OPO 输出线宽较窄,且在整个长波范围内无转折点,在获得窄线宽方面具有较大优势。

3 基于 OPO/OPA 的长波激光功率(能量)特性

3.1 ZGP OPO/OPA

当前,ZGP 晶体的生长、加工工艺逐步成熟,推进了其在基于 OPO/OPA 技术获得长波激光方面的发展。

2020 年,哈尔滨工业大学的 Liu 等^[28]报道了一个基于 I 类 ZGP 晶体的 9.8 μm 高功率长波光参量振荡器。其采用调 Q 的 2.091 μm Ho:YAG 激光器作为泵浦源,工作重复频率为 10 kHz,在 90 W 泵浦功率下获得了 3.51 W 的 9.8 μm 长波激光,脉冲宽度为 19.6 ns,线宽为 142 nm。并通过 II 类晶体角度旋转实

现了 9.2~11.0 μm 的长波可调谐输出。

2021 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的 Qian 等^[29]基于 ZGP 光参量振荡,提出了一种高能、窄脉宽、长波红外激光器。该 OPO 采用闲频光单谐振结构,以一个 2.1 μm 的三级 Ho:YAG MOPA 为泵浦源,最终输出了功率为 3.15 W 的 8.2 μm 和 11.4 W 的 2.8 μm 激光。输出峰值波长和线宽分别为 8156 nm 和 270 nm。

2022 年,中国科学院空天信息创新研究院的孟冬冬等^[30]报道了一种宽调谐长波红外光参量振荡器,其采用 1.064 μm 激光泵浦 II 类 KTP 晶体,产生 2107.13~2153.95 nm 激光,并用于泵浦 I 类 ZGP 晶体,获得了 7.94~9.07 μm 和 10.20~10.82 μm 的长波激光输出,当闲频光波长为 8.03 μm 时,能量为 0.8 mJ。

表 2 列出了近年来 ZGP OPO/OPA 获得长波输出的主要研究进展,可以看出,公开报道的 ZGP OPO 通常运转于高重复频率模式,且已普遍实现瓦级平均功率的长波激光输出。此外,2022 年,中国工程物理研究院的袁泽锐等^[21]采用超低梯度冷凝技术,生长了 3.8~5 cm 的大尺寸 ZGP 单晶,并获得了 30 mm \times 30 mm \times 40 mm 的 ZGP OPO 器件,表明该晶体在大尺寸生长技术方面已逐渐成熟。同时,基于改良生产工艺获得的新型 ZGP 晶体已有报道^[39],在 2 μm 附近以及 9~12 μm 波段范围的透过率得到了很大改善,提高了 ZGP 晶体的性能。上述研究表明,ZGP 晶体在获得高质量长波红外激光输出方面仍具有较大潜力。

表 2 ZGP OPO/OPA 技术研究进展
Table 2 Research of ZGP OPO/OPA technology

Year	Pump source	Method	Idler wavelength / μm	Output performance
2007 ^[31]	KTP OPO (@1.95-2.20 μm)	I-OPO	5.0-10.0	0.4 mJ (@9.0 μm)
2016 ^[32]	Ho:YAG (@2.09 μm)	I-OPO	8.0-8.3	3.2 W (@8.2 μm)
2017 ^[33]	Tm, Ho:GdVO ₄ (@2.05 μm)	I-OPO	7.8-9.9	1.71 W (@8.08 μm)
2018 ^[34]	Ho:YAG (@2.09 μm)	I-OPO+OPA	8.3	11.4 W (@20 kHz)
2019 ^[35]	Ho:YAG (@2.09 μm)	II-OPO+I-OPA	8.2	12.6 W (@10 kHz)
2020 ^[36]	Ho:YAG (@2.09 μm)	OPO+OPA	8.3	7.0 W
2020 ^[28]	Ho:YAG (@2.09 μm)	I/II-OPO	9.2-11.0	3.51 W (@9.8 μm)
2021 ^[29,37]	Ho:YAG (@2.09 μm)	OPO	8.2	3.15 W (@1 kHz, 8.1 ns) 5.48 W (@3 kHz, 9.45 ns)
2021 ^[38]	Ho:YLF (@2.05 μm)	I-OPO	8.1	3.2 W (@10 kHz, 27.11 ns)
2022 ^[30]	KTP OPO (@2.107-2.154 μm)	I-OPO	7.94-9.07, 10.2-10.82	0.8 mJ (@8.03 μm , 50 Hz)

3.2 其他 OPO/OPA

近年来,非线性晶体的研究日益深入,基于其他晶体的光参量振荡(放大)器也多有报道。

2017 年,俄罗斯的 Kolker 等^[40]报道了一种组合光参量振荡器,其光谱范围为 2.5~10.8 μm 连续可调谐。该系统分别由 MgO:PPLN OPO1(2.5~4.5 μm) 和 HgGa₂S₄ OPO2(4.18~10.8 μm) 组成,其中 OPO2

采用两个不同切割角的 II 类 HGS 晶体。并实验测量了 2.5~10.8 μm 范围内气体混合物的吸收光谱。

2020 年,中国科学院理化技术研究所的 Yang 等^[41]提出了一个基于 BGSe 晶体的光参量放大器。该 OPA 由皮秒 1064 nm 激光器在 10 Hz 重复频率下泵浦,通过晶体角度旋转实现了 8.0~14.0 μm 的长波输出。在 14 mJ 的泵浦下,获得了全调谐范围内 $>140 \mu\text{J}$

的闲频光输出, 9.5 μm 时输出脉冲能量达 230 μJ。

2022 年, 哈尔滨工业大学的 Yang 等^[42]分别搭建了线性和环形 CdSe OPO 谐振腔, 以 2.09 μm 调 Q Ho:YAG 激光器为泵浦源, 分别在 10.15 μm 和 11 μm 下获得了脉宽纳秒级、输出功率达 1.03 W 和 1.18 W 的长波红外激光。通过角度调谐方式, 在环形腔 OPO 中, 内部晶体角从 69.6°~70.39°, 闲频光输出从 10.9 μm (1.26 W)~11.2 μm (1.04 W)。

表 3 为基于其他晶体的长波 OPO/OPA 研究进

展, 可以看到, CdSe、BGSe 和 HGS 等新型晶体在长波红外激光输出方面具有较大发展前景。目前, 这些晶体的生长及加工仍具有一定难度, 相关研究主要集中于中波红外输出。通过 OPO 可实现调谐范围内百毫瓦级的长波激光输出。其中, CdSe OPO 获得了 >1 W 的长波输出, 然而输出光束质量较差。增强泵浦光特性, 提高输出闲频光光束质量, 搭建 OPO+OPA 结构, 将是提高长波红外激光性能的重要研究方向之一。

表 3 其他晶体的长波 OPO/OPA 技术研究进展

Table 3 Research of long-wave OPO/OPA technology of other crystals

Year	Pump source	Method	Idler wavelength / μm	Output performance
2017 ^[40]	Nd:YLF(@1.053 μm)	HGS(II-OPO)	4.18-10.8	1 μJ(@10-10.8 μm)
2018 ^[24]	Ho:YAG(@2.09 μm)	BGSe(II-OPO)	8.0-9.0	314 mW(@8.925 μm)
2018 ^[43]	Yb-fiber(@1.035 μm)	HGS(II-OPO)	4.4-12.0	-
2018 ^[44]	Nd:YLF(@1.053 μm)	BGSe(I-OPO)	2.6-10.4	14 μJ(@8.07 μm)
2019 ^[45]	Cr,Er:YSGG(@2.79 μm)	BGSe(I-OPO)	3.94-9.55	-
2020 ^[46]	Nd:YAG(@1.064 μm)	BGSe(I-OPO)	8.0-14.0	1.05 mJ(@11.0 μm, 10Hz)
2020 ^[41]	Nd:YAG(@1.064 μm)	BGSe(I-OPA)	8.0-14.0	230 μJ(@9.5 μm)
2020 ^[47]	Ho:YAG(@2.09 μm)	CdSe(II-OPO)	11.01	802 mW(@1 kHz)
2020 ^[48]	Ho:YAG(@2.09 μm)	CdSe(II-OPO)	10.1-10.8	1.05 W(@1 kHz)
2021 ^[49]	Ho:YLF(@2.05 μm)	CdSe(II-OPO)	12.5-12.8	526 mW(@12.5 μm, 5 kHz)
2022 ^[42]	Ho:YAG(@2.09 μm)	CdSe(II-OPO)	10.9-11.2	1.26 W(@10.9 μm)

4 基于 OPO/OPA 的长波激光谱宽特性

目前, 国内外在长波红外激光输出的研究主要集中在高功率和高重复频率方向, 对窄线宽的研究较少。

4.1 ZGP OPO/OPA

2019 年, 哈尔滨工业大学的 Liu 等^[35]具体研究了 ZGP 晶体在不同相位匹配条件下进行 OPO 及级联 OPA 的长波红外输出特性。图 4 为泵浦波长 2090.7 nm Ho:YAG

调 Q 激光器。分别就 I (II) 类相位匹配 OPO 和 I (II) 类级联相位匹配 OPA 四种组合情况进行了对比实验分析, 输出中心波长为 8.2 μm。最终在 II-I 级联 OPA 获得了 12.6 W 的平均输出功率, 在 II-II 级联 OPA 获得了 77 nm 的输出线宽。

2022 年, 中国科学院空天信息创新研究院的 Tian 等^[50]将谐振腔补偿技术应用于长波红外 OPO 中, 获得了 8.02~9.15 μm 的可调谐输出。如图 5 所示, 采用旋转电机控制 ZGP 晶体进行角度调谐, 并结合直线电机对谐振腔进行腔长补偿。泵浦源为工作重复频率 10 kHz 的 2.1 μm Ho:YAG 激光器, 当入射泵浦光功率为 23.03 W 时, 在 8.02 μm 处获得了功率 2.16 W 的闲频光输出, 脉冲宽度为 21.5 ns, 线宽为 29.5 nm。

同年, 田俊涛等^[51]还基于上述环形腔结构研究了 ZGP 晶体的温度调谐特性, 输出谱宽特性如图 6 所示。采用中心波长为 2097 nm 的 Ho:YAG 激光器作为泵浦源, 在 15~30 °C 温度范围内, 实现了 7.53~8.77 μm 可调谐长波激光输出, 输出功率均大于 1.503 W。此外, 当输出波长在 7.53~8.02 μm 范围内时, 闲频光谱宽度均小于 40.2 nm, 实验获得的最小输出线宽为 18.1 nm (@7.85 μm)。

2023 年, 中国科学院空天信息创新研究院的 Wang 等^[52]采用电光调 Q 的 Ho:YLF 激光器作为泵浦源, 对宽温度调谐范围的 ZGP OPO 的输出特性进行了研究,

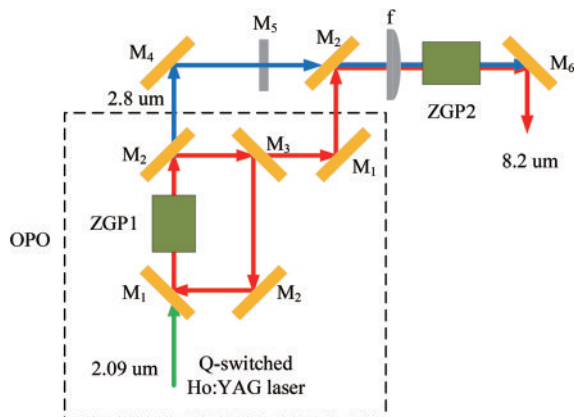


图 4 不同相位匹配条件下的 ZGP OPO+OPA^[35]
Fig. 4 ZGP OPO + OPA under different phase-matching conditions^[35]

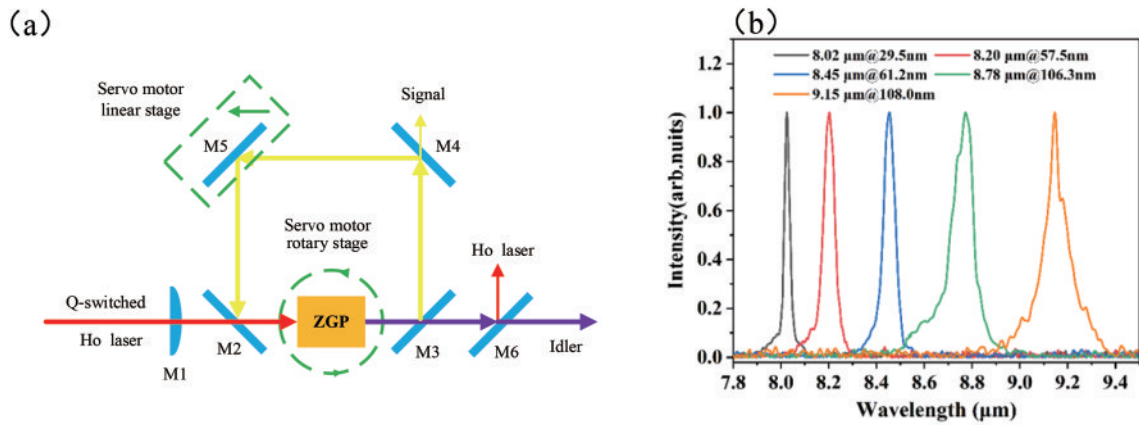


图 5 I 类 ZGP OPO 实现长波红外可调谐激光输出^[50]。(a) 装置示意图；(b) 输出闲频光特性

Fig. 5 ZGP OPO realizes the long-wave infrared tunable laser under class I phase matching^[50]. (a) Schematic diagram of the device; (b) idler output characteristics

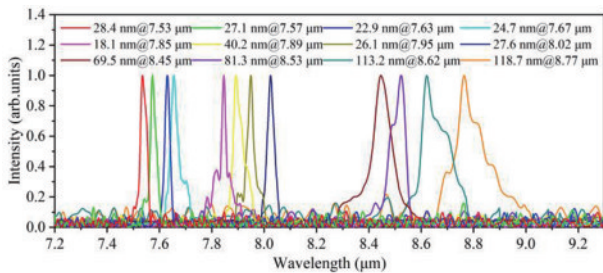


图 6 温度调谐 ZGP OPO 的输出闲频光特性^[51]

Fig. 6 Idler output characteristics of ZGP OPO under temperature tuning^[51]

完善了 ZGP 晶体温度相关的 Sellmeier 方程, 同时在 25~200 °C 的温度范围内, 当晶体相位匹配角为 51.3°、50.95° 和 50.6° 时, 分别获得了 7.08~7.50 μm、7.40~7.95 μm 和 7.79~8.47 μm 的可调谐长波激光输出, 输出线宽在 100 nm 左右 (@7.40~7.95 μm)。

实验结果表明: 两种调谐方式下, ZGP OPO 的输出线宽随闲频光波长变化趋势与理论计算基本相符, 采用 II 类相位匹配方式可以获得更窄的线宽; 当匹配角接近简并点时, 其输出线宽增长较快。此外, 根据 ZGP OPO 的温度调谐特性可以看出, 在同一匹配角度下, 晶体温度变化引起闲频光波长发生变化, 而输出线宽受温度变化影响较小, 通过结合角度调谐和温度调谐, 避免简并点附近的匹配角, 有望在全调谐范围内实现窄线宽输出。上述研究亦表明, 通过泵源优化与谐振腔设计难以实现更窄线宽的长波激光输出, 可通过频率选择元件对输出线宽进行压窄。

体布拉格光栅 (VBG) 和标准具是常用的线宽压窄元件, 具有结构简单、压窄效果明显等优点。其中 VBG 通过内部的折射率分布引起色散, 从而起到选频作用^[53-54], 然而目前成熟的技术通常将 VBG 刻划于光热敏玻璃上, 该玻璃的透射波段仅为 0.4~2.7 μm, 较难适用于长波红外 OPO。标准具则基于多光束干涉效应, 影响不同波长的激光通过标准具的透过率, 通过

对不同波长的振荡加强和抑制来实现选频^[55-56]。

2000 年, 美国的 Vodopyanov 等^[57] 报道了一种中红外可调谐的 ZGP 光参量振荡器。如图 7 所示, 其以 2.93 μm 的掺 Er 激光器作为泵浦源, 基于角度调谐获得了 3.0~12.4 μm (I 类相位匹配) 和 4.0~10.0 μm (II 类相位匹配) 的调谐输出, 并在 II 类 OPO 谐振腔中插入标准具 (未涂层硅板), 线宽被压至 0.5 cm⁻¹ (@8 μm)。

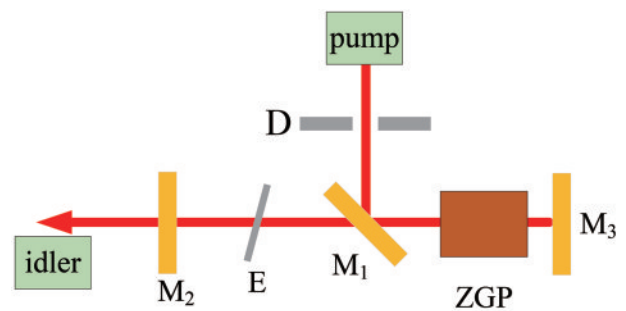


图 7 ZGP OPO 的线宽压窄示意图^[57]

Fig. 7 Schematic of linewidth narrowing for ZGP OPO^[57]

2022 年, 国防科技大学的 Bian 等^[58] 基于 I 类相位匹配的 BGSe 晶体, 使用腔内插入标准具的方法压窄输出线宽。采用 L 型谐振腔, 在未加标准具时获得了线宽为 4.53 nm 的闲频光输出 (@3529.4 nm)。选择插入厚度为 0.35 mm、R=70% 的标准具, 当标准具倾斜角从 0° 增加到 3.90° 时, 线宽压窄至 1.27~2.05 nm。研究结果还表明, 插入标准具会增加 OPO 的泵浦阈值, 而斜率效率基本一致, 且插入标准具后输出闲频光的光束质量有所改善。

由此可见, 标准具在中长波红外激光线宽的压窄方面均具有良好效果。随着长波激光在提高输出功率方向的不断突破, 目前 ZGP OPO 在瓦级输出功率方面不存在技术瓶颈, 通过内插标准具, 有望实现更窄线宽乃至单频的长波激光输出。

4.2 其他 OPO/OPA

近年来,针对不同的非线性晶体,通过 OPO/OPA 技术,已有较窄线宽乃至单频的长波激光器报道(表 4)。

2017 年,法国航空航天实验室的 Armougom 等^[59]报道了第一个在长波红外波段工作的单频光学参量振荡器。其采用单频的 Tm:YAP 微型激光器作为泵浦源,泵浦定向模式砷化镓(OP-GaAs)晶体,基于嵌套腔双共振 OPO 结构获得了单纵模输出。腔镜使用压电陶瓷固定,腔长改变可实现精细化波长调谐,结合温度调谐,在 10.4 μm 左右实现了大于 700 nm 的调谐范围。并利用该激光器通过差分光谱法对氨蒸气进行了检测。

2018 年,华北光电研究所的 Wang 等^[60]基于高压垂直梯度冷冻技术生长了一块直径为 54 mm、长为

25 mm 的 CdSe 单晶。其以 II 类相位匹配角切割,取 6 mm \times 10 mm \times 44 mm 单晶进行 OPO,泵浦源为工作在 5 kHz 重复频率下的 2.05 μm Ho:YLF 激光器,最终在 18.06 W 泵浦下,获得了 320 mW 的 10.20 μm 长波红外输出,闲频光线宽为 78 nm。

2018 年,哈尔滨工业大学的 Zhao 等^[24]采用 II 类相位匹配的 BGSe 晶体搭建了一个 8~9 μm 可调谐的高效 OPO。由声光调 Q 的 2090.7 nm Ho:YAG 激光器泵浦,采用短直腔结构,获得了最高功率 314 mW 的中心波长为 8925.7 nm 的闲频光,工作重复频率为 1 kHz,脉宽为 16 ns,线宽为 67.8 nm。理论计算并实际测量了调谐范围内不同闲频光的输出线宽,在 8672.0、8422.2、8244.0 nm 下的输出线宽均仅为 40 nm。

表 4 窄线宽长波固体激光技术研究进展

Table 4 Research of long-wave solid-state laser with narrow linewidth

Year	Pump source	Method	Idler wavelength / μm	Output linewidth
2014 ^[61]	Nd:YAG(@1.064 μm)	HGS(II-OPG)	3.85-10.0	83 nm(@6.1 μm)
		HGS(II-OPA)		9 nm(@6.1 μm)
2016 ^[62]	Nd:YAG(@1.064 μm)	BGSe(I-OPO)	2.7-17.0	9 nm(@7.2 μm)
2017 ^[59]	Tm:YAP(@1.938 μm)	OP-GaAs	10.4-11.1	<1.32 pm(@2.38 μm)
2018 ^[24]	Ho:YAG(@2.09 μm)	BGSe(II-OPO)	8.0-9.0	40.67 nm(@8.67 μm)
2018 ^[60]	Ho:YLF(@2.05 μm)	CdSe(II-OPO)	10.2	78 nm(@5 kHz)
		ZGP(II-OPO)		66 nm
2019 ^[35]	Ho:YAG(@2.09 μm)	(II+II-OPA)	8.2	77 nm
2019 ^[63]	Nd:YAG(@1.064 μm)	HGS(II-OPO)	5.0-9.0	1.45 nm(@5.39 μm)
2020 ^[47]	Ho:YAG(@2.09 μm)	CdSe(II-OPO)	11.01	7.3 nm
2022 ^[50]	Ho:YAG(@2.09 μm)	ZGP(I-OPO)	8.02-9.15	29.5 nm(@8.02 μm)
2022 ^[51]	Ho:YAG(@2.09 μm)	ZGP(I-OPO)	7.53-8.77	18.1 nm(@7.85 μm)

结合 2.2 节的线宽计算方法,上述研究表明:BGSe、HGS 等晶体在长波 OPO 中的输出线宽均较窄,特别在 1 μm 泵浦源下表现出了突出优势;CdSe 晶体在更长波段的窄线宽输出方面也表现出了较大潜力。

然而,当前新型晶体的研究主要集中于中波红外,长波红外的输出功率、脉冲能量仍较低。为兼顾输出功率及窄线宽,有学者针对中波红外提出不同晶体的 OPO+OPA 组合技术。2020 年,哈尔滨工业大学的 Liu 等^[64]采用 BGSe OPO 结合 ZGP OPA 的结构,获得了 4.35 W 的中红外输出,该种组合不仅改善了单 BGSe OPO 的光束质量,还获得了 7 nm 的线宽输出,相较全 ZGP 系统具有更窄的输出线宽。随着各种晶体在长波 OPO 技术的不断发展,这种思路亦可用于长波波段,在提高输出功率的同时,保持较窄的输出线宽。

5 结束语

近年来,我国在大气环境治理方面做出了诸多努力,然而有害气体排放问题仍然显著。自 1996 年起,

我国便发布了《大气污染排放标准》,突出强调了有害气体检测的重要性。多数的有害气体,在长波红外波段均具有较强的特征光谱,针对多组分有害气体高精度、高灵敏度的探测需求,研究窄线宽、单频长波红外激光输出,为 DIAL 提供高效优质激光源,具有重大的现实意义。

目前,随着晶体生长、加工工艺以及非线性频率转换技术的发展,长波红外光参量振荡器在高重复频率和高功率输出方面已取得一定成果,窄线宽、大能量方向的研究则相对空白。其中,ZGP OPO 已普遍实现瓦级平均功率输出,较大尺寸的 ZGP 晶体也已实现商业生产,在获得更高性能的长波输出方面仍具有较大潜力。根据增益线宽的理论计算,结合 ZGP OPO 的相关实验研究,结果表明:角度调谐下,通过谐振腔补偿难以获得更窄线宽的输出,且在简并点附近存在转折点;温度调谐下,虽然调谐范围小,但是输出线宽随温度变化较小。据此,可以使用角度结合温度的调谐方式,避开简并点所对应的匹配角,在较小的旋转角度下获得较宽的调谐范围的同时,保持较窄线宽的长波输出。而且,ZGP OPO 已可以实现较高功率的输出,将

频率选择元件应用于谐振腔中,也是未来长波 OPO 研究的一个重要方向。此外,基于 BGSe、HGS、CdSe 等晶体的光参量振荡器是当前研究的热点,在长波窄线宽输出方面表现出了较大优势,改善输出激光的光束质量,搭建 OPO+OPA 结构,提高窄线宽长波激光的输出功率,是目前需要攻克的主要问题。

综上所述可见,长波红外光参量技术普遍采用 1 μm 和 2 μm 波段泵浦源,随着高功率、高质量 1~2 μm 激光器技术的发展,将很大程度提高长波激光的输出特性。同时,各种非线性光学频率转换晶体生长工艺的改进以及性能良好的新型晶体的出现,将进一步推进长波 OPO/OPA 的快速发展。此外,角度结合温度的调谐控制、线宽压窄技术、多晶体 OPO+OPA 组合以及同步控制技术辅助技术的发展,也将给窄线宽长波激光领域带来突破性革新。

参 考 文 献

- [1] 徐飞,潘其坤,陈飞,等. 中红外 Fe^{2+} : 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 Fe^{2+} : ZnSe lasers[J]. Chinese Optics, 2021, 14(3): 458-469.
- [2] Boles G C, Coates R A, Berden G, et al. Experimental and theoretical investigations of infrared multiple photon dissociation spectra of asparagine complexes with Zn^{2+} and Cd^{2+} and their deamidation processes[J]. The Journal of Physical Chemistry. B, 2016, 120(49): 12486-12500.
- [3] Koch G J, Barnes B W, Petros M, et al. Coherent differential absorption lidar measurements of CO_2 [J]. Applied Optics, 2004, 43(26): 5092-5099.
- [4] Flannigan L, Yoell L, Xu C Q. Mid-wave and long-wave infrared transmitters and detectors for optical satellite communications: a review[J]. Journal of Optics, 2022, 24(4): 043002.
- [5] Gabrieli A, Wright R, Lucey P G, et al. Characterization and initial field test of an 8–14 μm thermal infrared hyperspectral imager for measuring SO_2 in volcanic plumes[J]. Bulletin of Volcanology, 2016, 78(10): 73.
- [6] Renz G, Bohn W. Two-micron thulium-pumped-holmium laser source for DIRCM applications[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6552: 655202.
- [7] Shayeganrad G. Single laser-based differential absorption lidar (DIAL) for remote profiling atmospheric oxygen[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 111: 80-85.
- [8] Johnson W, Repasky K S, Carlsten J L. Micropulse differential absorption lidar for identification of carbon sequestration site leakage[J]. Applied Optics, 2013, 52(13): 2994-3003.
- [9] 姚宝权,杨科,密淑一,等. 高功率 Ho: YAG 激光器及其泵浦的磷镉锌、硒镉钡和硒化镉中长波红外非线性光学频率转换研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101002.
Yao B Q, Yang K, Mi S Y, et al. Research progress of high-power Ho: YAG lasers and its application for pumping mid-far-infrared nonlinear frequency conversion in ZGP, BGSe and CdSe crystals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101002.
- [10] Polyanskiy M, Pogorelsky I, Babzien M, et al. High-peak-power long-wave infrared lasers with CO_2 amplifiers[J]. Photonics, 2021, 8(4): 101.
- [11] Lu Y, Zhu Z R, Bai J Z, et al. Generation of tail-free short pulses using high-pressure CO_2 laser[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(5): 051401.
- [12] Law K K. Monolithic QCL design approaches for improved reliability and affordability[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8993: 899307.
- [13] 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-Optic Technology Application, 2021, 36(5): 23-29, 35.
- [14] Xu D G, Zhang J X, Wang Y Y, et al. Widely-tuned longwave mid-infrared optical parametric oscillator based on BaGa_4Se_7 crystal[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11890: 1189014.
- [15] Qian C P, Yao B Q, Zhao B R, 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.
- [16] 杨雪梅,田坎,何林珍,等. 飞秒激光中脉冲内差频技术进展[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(11): 28-36.
Yang X M, Tian K, He L Z, et al. Progress on intra-pulse difference frequency generation in femtosecond laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(11): 28-36.
- [17] Chandra S, Allik T H, Catella G, et al. Continuously tunable, 6–14 μm silver-gallium selenide optical parametric oscillator pumped at 1.57 μm [J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(5): 584-586.
- [18] Haidar S, Nakamura K, Niwa E J, et al. Mid-infrared (5–12- μm) and limited (5.5–8.5- μm) single-knob tuning generated by difference-frequency mixing in single-crystal AgGaS_2 [J]. Applied Optics, 1999, 38(9): 1798-1801.
- [19] Schunermann P G. Recent advances in nonlinear materials for 5-20 μm wavelength generation[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000), May 7-12, 2000, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2002: 353-354.
- [20] Ni Y B, Wu H X, Mao M S, et al. Growth and characterization of mid-far infrared optical material CdSe crystal[J]. Optical Materials Express, 2018, 8(7): 1796-1805.
- [21] 袁泽锐,窦云巍,方潘,等. 大口径超低吸收系数中红外磷镉锌晶体与器件制备[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101023.
Yuan Z R, Dou Y W, Fang P, et al. Fabrication of mid-infrared ZnGeP_2 crystals and devices with large apertures and ultra-low absorption coefficients[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101023.
- [22] 孟祥鹤,李壮,姚吉勇. 新型红外非线性光学晶体硒镉

- 钼的性质与应用[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101005.
- Meng X H, Li Z, Yao J Y. Property and application of new infrared nonlinear optical crystal BaGa₄Se₇[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101005.
- [23] Li C X, Meng X H, Li Z, et al. Hg-based chalcogenides: an intriguing class of infrared nonlinear optical materials [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2022, 453: 214328.
- [24] Zhao B R, Chen Y, Yao B Q, et al. High-efficiency, tunable 8-9 μm BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped at 2.1 μm[J]. Optical Materials Express, 2018, 8 (11): 3332-3337.
- [25] Zelmon D E, Hanning E A, Schunemann P G. Refractive-index measurements and Sellmeier coefficients for zinc germanium phosphide from 2 to 9 μm with implications for phase matching in optical frequency-conversion devices[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2001, 18(9): 1307-1310.
- [26] Guha S. Updated temperature dependent Sellmeier equations for ZnGeP₂ crystals (Conference Presentation) [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10902: 1090210.
- [27] Kong H, Bian J T, Yao J Y, et al. Temperature tuning of BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(2): 021901.
- [28] Liu G Y, Chen Y, Yao B Q, et al. 3.5 W long-wave infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator at 9.8 μm[J]. Optics Letters, 2020, 45(8): 2347-2350.
- [29] Qian C P, Yu T, Liu J, et al. A high-energy, narrow-pulse-width, long-wave infrared laser based on ZGP crystal[J]. Crystals, 2021, 11(6): 656.
- [30] 孟冬冬, 乔占朵, 高宝光, 等. 基于 ZnGeP₂ 光参量振荡器的长波红外双波段调谐实验研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 2021G008.
- Meng D D, Qiao Z D, Gao B G, et al. Experimental study on tunable characteristics of optical parametric oscillator based on ZnGeP₂ in long-infrared dual-band [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 2021G008.
- [31] Miyamoto K, Ito H. Wavelength-agile mid-infrared (5-10 μm) generation using a galvano-controlled KTiOPO₄ optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 2007, 32 (3): 274-276.
- [32] Qian C P, Shen Y J, Dai T Y, et al. High power far-infrared optical parametric oscillator with high beam quality[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10016: 100160G.
- [33] Li L J, Yang X N, Yang Y Q, et al. A high-power, long-wavelength infrared ZnGeP₂ OPO pumped by a Q-switched Tm, Ho: GdVO₄ laser[J]. Journal of Russian Laser Research, 2017, 38(3): 305-310.
- [34] Qian C P, Duan X M, Yao B Q, et al. 11.4 W long-wave infrared source based on ZnGeP₂ optical parametric amplifier[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30195-30201.
- [35] Liu G Y, Chen Y, Yao B Q, et al. Study on long-wave infrared ZnGeP₂ subsequent optical parametric amplifiers with different types of phase matching of ZnGeP₂ crystals [J]. Applied Physics B, 2019, 125(12): 233.
- [36] Shen Y J, Qian C P, Duan X M, et al. High-power long-wave infrared laser based on polarization beam coupling technique[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2020, 8(2): e12.
- [37] Qian C P, Yu T, Liu J, et al. 5.4 W, 9.4 ns pulse width, long-wave infrared ZGP OPO pumped by Ho: YAG MOPA system[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(3): 3078131.
- [38] 魏磊, 吴德成, 刘东, 等. Ho:YLF 激光泵浦的长波红外 ZnGeP₂ 光参量振荡器[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0101002.
- Wei L, Wu D C, Liu D, et al. Long-wave infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by Ho:YLF laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0101002.
- [39] Cao L Q, Zhao B J, Zhu S F, et al. Annealing and optical homogeneity of large ZnGeP₂ single crystal[J]. Rare Metals, 2022, 41(9): 3214-3219.
- [40] Kolker D B, Sherstov I V, Kostyukova N Y, et al. Combined optical parametric oscillator with continuous tuning of radiation wavelength in the spectral range 2.5 - 10.8 μm[J]. Quantum Electronics, 2017, 47(1): 14-19.
- [41] Yang F, Yao J Y, Guo Y W, et al. High-energy continuously tunable 8 - 14 μm picosecond coherent radiation generation from BGSe-OPA pumped by 1064nm laser[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 125: 106040.
- [42] Yang K, Li J H, Gao Y Z, et al. Watt-level long-wave infrared CdSe pulsed-nanosecond optical parametric oscillator[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 145: 107491.
- [43] Popien S, Beutler M, Rimke I, et al. Femtosecond Yb-fiber laser synchronously pumped HgGa₂S₄ optical parametric oscillator tunable in the 4.4- to 12-μm range [J]. Optical Engineering, 2018, 57(11): 111802.
- [44] Kolker D B, Kostyukova N Y, Boyko A A, et al. Widely tunable (2.6-10.4 μm) BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped by a Q-switched Nd:YLiF₄ laser[J]. Journal of Physics Communications, 2018, 2(3): 2399-6528.
- [45] Hu S W, Wang L, Guo Y W, et al. High-conversion-efficiency tunable mid-infrared BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped by a 2.79- μm laser[J]. Optics Letters, 2019, 44(9): 2201-2203.
- [46] Xu D G, Zhang J X, He Y X, et al. High-energy, tunable, long-wave mid-infrared optical parametric oscillator based on BaGa₄Se₇ crystal[J]. Optics Letters, 2020, 45(18): 5287-5290.
- [47] Chen Y, Liu G Y, Yang C, et al. 1 W, 10.1 μm, CdSe optical parametric oscillator with continuous-wave seed injection[J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 2119-2122.
- [48] 倪友保, 韩卫民, 吴海信, 等. 大尺寸长波红外非线性晶体 CdSe 生长及应用[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(8): 1488-1489.
- Ni Y B, Han W M, Wu H X, et al. Growth and application of large size far infrared CdSe nonlinear crystal [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2020, 49(8): 1488-1489.
- [49] 魏磊, 李宝, 陈国, 等. 长波红外 CdSe 光参量振荡器

- [J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2401004.
- Wei L, Li B, Chen G, et al. Long-wave infrared CdSe optical parametric oscillator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2401004.
- [50] Tian J T, Li Z Y, Zhao L L, et al. Long-wave infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator with improved tunability by use of a cavity compensation technique[J]. Optical Engineering, 2022, 61(7): 076102.
- [51] 田俊涛, 李辉, 赵莉莉, 等. 温度调谐 ZnGeP₂ 长波红外光参量振荡器[J]. 中国光学, 2023, 16(4): 861-867
Tian J T, Li H, Zhao L L, et al. Tunable long-wave infrared optical parametric oscillator based on temperature-adjustable ZnGeP₂[J]. Chinese Journal of Optics, 2023, 16(4): 861-867
- [52] Wang H, Tian J T, Zhao L L, et al. ZnGeP₂ optical parametric oscillator with wide temperature tuning [J]. Optics Communications, 2023, 542: 129584.
- [53] Li D, Yu Y J, Li Y, et al. Narrow linewidth 2.1 μm optical parametric oscillator with intra-cavity configuration based on wavelength-locked 878.6 nm in-band pumping [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 131: 106412.
- [54] Bian Q, Bo Y, Zuo J W, et al. High-power wavelength-tunable and power-ratio-controllable dual-wavelength operation at 1319 nm and 1338 nm in a Q-switched Nd:YAG laser[J]. Photonics Research, 2022, 10(10): 2287-2292.
- [55] Han J L, Zhang J, Shan X N, et al. High-power narrow-linewidth diode laser pump source based on high-efficiency external cavity feedback technology[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(8): 081401.
- [56] Zhang Z L, Zhao Y F, Liu H, et al. Study on linewidth compression at 3.8 μm with multiple F-P etalon pumped by compound intra-cavity optical parametric oscillator[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 124: 104234.
- [57] Vodopyanov K L, Ganikhanov F, Maffetone J P, et al. ZnGeP₂ optical parametric oscillator with 3.8-12.4 μm tunability[J]. Optics Letters, 2000, 25(11): 841-843.
- [58] Bian J T, Kong H, Ye Q, et al. Narrow-linewidth BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(4): 041901.
- [59] Armougom J, Clément Q, Melkonian J M, et al. Single-frequency tunable long-wave infrared OP-GaAs OPO for gas sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10088: 100880Z.
- [60] Wang J, Yuan L G, Zhang Y W, et al. Generation of 320 mW at 10.20 μm based on CdSe long-wave infrared crystal[J]. Journal of Crystal Growth, 2018, 491: 16-19.
- [61] Piccoli R, Pirzio F, Agnesi A, et al. Narrow-bandwidth, picosecond, 1064-nm pumped optical parametric generator for the mid-IR based on HgGa₂S₄[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4895-4898.
- [62] Kostyukova N Y, Boyko A A, Badikov V, et al. Widely tunable in the mid-IR BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped at 1064 nm[J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3667-3670.
- [63] Hayrapetyan V S, Makeev A V, Shaburova A V. Optical parametric oscillator on HgS crystal with 5-9 μm frequency reset[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11208: 112081P.
- [64] Liu G Y, Chen Y, Li Z, et al. High-beam-quality 2.1 μm pumped mid-infrared type-II phase-matching BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator with a ZnGeP₂ amplifier[J]. Optics Letters, 2020, 45(13): 3805-3808.