

远红外固体激光器研究进展

温雅¹, 吴春婷¹, 袁泽锐², 龚亮宇¹, 金光勇^{1*}

(1. 吉林省固体激光技术与应用重点实验室 长春理工大学, 吉林 长春 130022;

2. 四川省新材料研究中心, 四川 成都 610000)

摘要: 8 ~ 12 μm 波段是大气的一个窗口, 被定义为长波红外波段。该波段激光对雾、烟尘等具有较强的穿透力, 在激光光电对抗、激光遥感、医疗、环境监测及光通讯领域具有重要的应用前景。本文调研了常用的 8 ~ 12 μm 非线性频率变换晶体, 以及基于非线性频率变换晶体的远红外光参量振荡器的研究进展, 对国内外能够实现 8 ~ 12 μm 波段激光输出的非线性晶体及激光系统进行了系统地归纳和总结, 通过分析比较得出在 8 ~ 12 μm 波段获得的最大输出能量为毫焦量级, 最大功率为瓦量级。国内该技术与国外有着不小的差距, 主要受制于高重复、高功率脉冲 1 ~ 3 μm 泵浦源技术不成熟及高性能非线性晶体材料研制基础薄弱, 我国在长波远红外固体激光器领域研究进展缓慢, 因此研制大尺寸、高质量远红外激光晶体及输出波长更长的远红外高功率激光器已经成为激光器未来发展方向之一。

关键词: 8 ~ 12 μm ; 远红外; 非线性晶体; 光参量振荡器; 固体激光器

中图分类号: TN247; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20181106.0889

Research progress of far-infrared solid-state lasers

WEN Ya¹, WU Chun-ting¹, YUAN Ze-rui², GONG Liang-yu¹, JIN Guang-yong^{1*}

(1. Changchun University of Science and Technology, Jilin Key Laboratory of Solid-state Laser Technology and Application, Changchun 130022, China;

2. SiChuan Research Center of New Materials, Chengdu 610000, Chian)

* Corresponding author, E-mail: jgycust@163.com

Abstract: The wavelength range of 8 – 12 μm is defined as the long-wave infrared band, which opens a window for atmospheric transmission. The laser band has strong penetrating power for fog, smoke etc., and has important application prospects in the fields of laser photoelectric countermeasures, laser remote sensing, medical treatment, environmental monitoring and optical communication. In this paper, the commonly used 8 – 12 μm nonlinear frequency conversion crystal, and the research progress of far-infrared optical parametric oscillator based on nonlinear frequency conversion crystal are investigated. The nonlinear crystal and laser sys-

收稿日期: 2018-01-19; 修订日期: 2018-02-28

基金项目: 吉林省科技厅自然科学基金 (No. 20160101331JC); 吉林省科技厅创新领军人才及团队项目 (No. 20170519007JH)

tem which can realize the laser output of 8 – 12 μm band at home and abroad are systematically summarize. Through analysis and comparison, it is concluded that the maximum output energy obtained in the 8 – 12 μm band is in the order of mJ and the maximum power is in the order of W. However, the technology in China is currently lagging behind in the world. The main reason is that the high-frequency, high-power pulse 1 – 3 μm pump source technology is immature and the development of high-performance nonlinear crystal materials is weak. Due to the slow research progress in the field of long-wave far-infrared solid-state lasers in China, the development of large-size, high-quality far-infrared laser crystals and far-infrared high-power lasers with longer output wavelengths has become one of the future development directions.

Key words: 8 – 12 μm ; far-infrared; nonlinear crystals; optical parametric oscillator; solid-state lasers

1 引言

8 ~ 12 μm 波段是大气的一个窗口,属于长波远红外范围,是常温条件下黑体或灰体辐射的峰值波长^[1-2],是 HgCdTe 或 GaAs/AlGaAs 量子阱等红外焦平面探测器的波长对应范围,对雾、烟尘等具有较强的穿透力,也是一些有毒气体和生物战剂分子的基频吸收带^[3-4]。因此该波长激光在红外光电对抗、差分雷达、激光主动成像雷达等领域具有重要的应用价值^[5-6]。由于传统的 CO₂ 气体激光器不能完全覆盖 8 ~ 12 μm 区域,其在 8 ~ 9 μm 、11 ~ 12 μm 波段存在空白。而从激光器应用角度考虑,固体激光器具有结构紧凑、稳定性高、可靠性好、便携等优势。因此研制 8 ~ 12 μm 波段固体激光器是固体激光器的发展方向之一。

目前,由于受到晶体材料的限制,固体激光器的输出波长大多在 1 ~ 3 μm 的近红外波段^[7],而采用频率变换(如差频、和频、光参量振荡等)技术是实现 8 ~ 12 μm 波长输出的最主要的方法^[8-10],远红外光参量振荡器因为泵浦光和参量光之间量子亏损大,光光转换效率只有中波的五分之一,因而发展高功率的长波红外固体激光器更难^[11-12]。

国内外研究已经取得了较为明显的进展,获得的最大输出能量为毫焦量级,最大功率为瓦级。而从国内外研究现状可以看出国内在该技术层面上与国外有着不小的差距。主要受制于高重频、高功率脉冲 1 ~ 3 μm 泵浦源技术不成熟及高性

能非线性晶体材料研制基础薄弱^[13-14]。

本文主要介绍普遍使用的 8 ~ 12 μm 非线性频率变换晶体,介绍晶体的光学特性,基于非线性晶体的非线性特性获得 8 ~ 12 μm 激光输出。

2 常用非线性频率变换晶体

由于目前并未有直接产生 8 ~ 12 μm 激光增益介质的报道,使得采用非线性频率变换技术实现 8 ~ 12 μm 中远红外激光输出成为主要研究方向^[15]。能够实现中远红外光参量振荡的非线性晶体有很多种,为了得到非线性光学效应获得中红外激光输出,非线性晶体需要必备以下条件:透光范围宽、热导率大、相位匹配范围宽、光学均匀性好、对光场的吸收损耗小、抗损伤阈值高、能承受较高的抽运功率、转换效率高、不潮解、不风化、不易分解^[16]、机械性能好等。实际上没有任何一种晶体同时具有上述所有优点,在选择晶体时都是按照实验的特定需求进行权衡,选择合适的晶体。

要实现 8 ~ 12 μm 远红外波段激光输出,则对晶体的透光范围以及相位匹配范围的要求会更加严苛^[17-18],也使得 8 ~ 12 μm 激光输出更加困难,但也更具有实际意义。

常用的 8 ~ 12 μm 非线性频率变化晶体有硒化镉(CdSe)、硒化镓(GaSe)、磷锗锌(ZnGeP₂)、硒镓银(AgGaSe₂)、硫镓银(AgGaS₂)以及硒铟镓银(AgGa_{1-x}In_xSe₂)等^[19-21],它们的光学特性见表 1。

表1 常见红外非线性晶体的物理光学特性

Tab.1 Physical and optical properties of the common infrared nonlinear crystals

物理与 光学特性	晶体					
	CdSe	GaSe	ZnGeP ₂	AgGaSe ₂	AgGaS ₂	AgGa _{1-x} In _x Se ₂
晶系	六方	六方	四方	四方	四方	四方
点群	$\bar{6}2m$	$\bar{4}3m$	$\bar{4}2m$	$\bar{4}2m$	$\bar{4}2m$	$\bar{4}2m$
热导率/(W/cm·K)	0.06	0.162	0.36	0.11	0.015	0.33~0.44
透光范围/ μm	0.75~20	0.65~18	0.74~12	0.7~18	0.5~13	0.7~20
光学对称性	正单轴	负单轴	正单轴	负单轴	负单轴	负单轴
折射率(2.05 μm) n_o	2.467 7	2.744 9	3.146 4	2.636 6	2.708 6	随 x 的变
n_e	2.487 4	2.415 9	3.186 5	2.605 6	2.690 4	化而变化
损伤阈值/(MW/cm ²)	60	28	60-65	25	10	37±4
损伤脉冲宽度/ns	-	150	100	50	20	-
损伤测试波长/ μm	-	9.3	10.6	2.05	1.06	-
非线性系数 d_{eff} (pm/V)	18	54.4	75	33	13.4	41
非线性品质因数 d^2/n^3 (pm ² /V ²)	22	127.8	247.8	59.5	13.2	119
最短泵浦波长/ μm	2.37	1.3	1.7	1.27	1.06	1.06

表1中所列的这几种晶体在8~12 μm 都具有透过性,由表中可以看出 CdSe 和 AgGaS₂非线性系数较小,可推断其走离效应较严重;ZGP 晶体的有效非线性系数达到 75 pm/V,但目前应用 ZGP 获得 3~5 μm 激光输出是主流,获得 8~12 μm 也有一些报道。AgGaSe₂和 AgGaS₂热导率相对较小,在高功率运转时会有严重的热效应;AgGa_{1-x}In_xSe₂是在 AgGaSe₂晶体中掺入 In,随着铟含量的增加,AgGa_{1-x}In_xSe₂晶体具有更高的热导系数,从而拥有更高的抗损伤阈值,有利于高功率中远红外激光输出。本课题组采用单温区机械振荡的方法合成出高纯单相 AgGa_{0.2}In_{0.8}Se₂晶体,生产出尺寸为 $\Phi 25 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 大尺寸晶体,为实现 8~12 μm 中远红外激光输出奠定坚实的基础。下面将介绍这几种非线性晶体在长波远红外方面的发展现状。

3 长波远红外激光器国内外研究现状

3.1 CdSe 长波红外光学参量振荡器

CdSe 晶体的透光范围很宽,为 0.75~20 μm ,在 2.45 μm 以后的吸收系数也非常小,仅为 0.002 cm^{-1} ,同时可实现非临界相位匹配。但晶体的有效非线性系数较小,为 18 pm/V,通常可以采用长度较大(50 mm)的器件,来弥补其有效非线性系数小的缺点^[22]。

1997年,Allik等人^[23]用 2.79 μm 灯泵的 Cr,Er:YSGG激光抽运 CdSe-OPO,获得波长在 8.5~12.3 μm 可调谐闲频光输出,获得的信号光和闲频光总斜效率高达 59%,其中闲频光输出功率范围为 12~24 mW,输出能量范围为 1.2~2.4 mJ。

1999年,Isyanova等人^[24]用 KTA-OPO 产生的闲频光(3.18~3.45 μm)抽运 CdSe-OPO,获得 8.31~10.58 μm 内可调谐的闲频光。当采用的抽运光波长为 3.45 μm 时,获得的 CdSe-OPO 的信号光和闲频光的总输出能量为 4.5 mJ,斜率效率为 20%。

2002年,Carrig等人^[25]利用 Cr:ZnSe 2.45 μm 激光器抽运 CdSe-OPO,采用重频为 1 kHz 脉冲泵浦光,获得信号光与闲频光的输出功率为 250 mW,获得输出波长为 8 μm 的闲频光,光光转换效率达到 45%。

2002年,Watson等人^[26]报道了第一台锁模 CdSe-OPO 激光器,CdSe 选用非临界相位匹配切割方式,获得的闲频光范围为 9.1~9.7 μm 。

2003年,Watson等人^[27]报道了使用一个连续锁模的 Nd:YLF 抽运 PPLN-OPO 的光参量振荡器抽运 CdSe-OPO 获得 70 mW 9~10 μm 的激光输出。

2004年,Mani等人^[28]使用 KTP-OPO 做抽运源抽运 CdSe 获得 10~21 μm 的激光输出。

2004 年,美国加利福尼亚大学洛杉矶分校^[29]报道了采用输出能量大于 100 mJ 的 2.94 μm 脉冲激光器抽运 ZGP、CdSe 和 AgGaSe₂ 等 OPO,获得 3.5 ~ 12 μm 参量光输出。

2005 年,法国国家航空航天研究所 Antoine Godard 等^[30]报道了使用 1.064 μm 脉冲光抽运 KTP-OPO,在 CdSe 晶体上用交叉谐振的 OPO 混合信号光和闲频光的光束在 CdSe 晶体上进行差频,产生的中红外辐射范围超过 8 ~ 12 μm 。

2005 年,奥地利维也纳^[31]举行的高级固体光子学会议上,Zakel 和 Andrew 等人报道了利用 Cr:ZnSe 激光器腔内泵浦 CdSe-OPO 的实验结果,实验装置如图 1 所示。

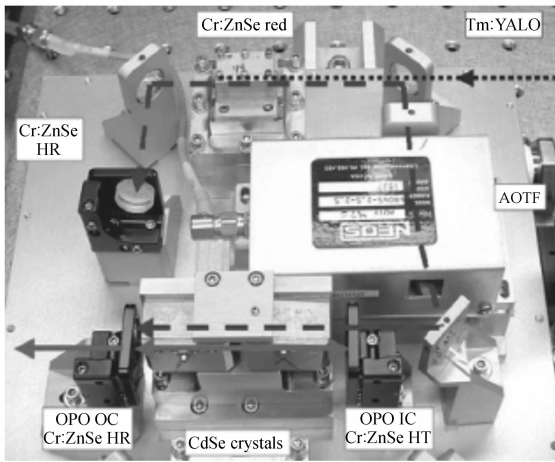


图 1 Cr:ZnSe 腔内泵浦 CdSe-OPO 试验装置图^[31]

Fig. 1 Cr:ZnSe cavity pumped CdSe-OPO experimental setup diagram^[12]

CdSe-OPO 采用放置两块 CdSe 晶体的方式,获得输出信号光为 2.8 ~ 3.7 μm ,闲频光调谐波长为 8.2 ~ 8.8 μm 。Cr:ZnSe 激光器采用 Tm:YAP 激光器泵浦,当 CdSe-OPO 信号光输出波长为 3.6 μm 时,闲频光波长为 8.2 μm ,获得平均输出功率达到 3 W,其中闲频光功率接近 1 W,相应的 Tm:YAP 到 CdSe-OPO 的转换效率为 18%。

2012 年,哈尔滨工业大学的姚保全等人^[32]报道了使用 2.05 μm Tm, Ho:GdVO₄ 激光器抽运 CdSe-OPO,在泵浦光重频为 12 kHz 时,获得了 64 mW 的 8.9 μm 的激光输出,谱线宽度近似为 30 nm。

2016 年,哈尔滨工业大学的鞠有伦等人^[33]

报道了使用 2.09 μm 声光调 Q Ho:YAG 激光器做抽运源,抽运 CdSe-OPO,获得 10.07 ~ 11.11 μm 的激光输出。抽运功率为 7 W 时,获得 140 mW 的 10.28 μm 闲频光输出。

GdSe 在 8 ~ 12 μm OPO 上已取得一定的实验效果,而且 GdSe 晶体在生长方面也比较成熟。从上述研究现状可以看出;其具有临界相位匹配的特点,可以部分弥补其有效非线性系数小 (18 pm/V) 的缺点。从研究现状可以看出,CdSe-OPO 对泵浦源的要求较为严格,不仅对功率有要求,波长也至少在 2.0 μm 以上,而且获得 10 μm 以上波长输出的实验结果还不算令人满意,未达到瓦量级。

3.2 ZnGeP₂ 长波红外光学参量振荡器

ZnGeP₂ 晶体透光范围为 0.74 ~ 12 μm ,热导率较大为 0.36 W/cm · K,可以采用高功率的抽运源;非线性系数为 75 pm/V。但是 ZnGeP₂ 晶体在输出波长达到 8.8 μm 之后,由于多光子吸收比较严重,会影响其在 9 μm 以后长波的光参量输出性能^[22]。

1995 年,Vodopyanov KL^[34]使用输出波长为 2.8 μm 锁模 Er:Cr:YSGG 100 ps 脉冲激光器泵浦 ZnGeP₂-OPO,获得在 I 类和 II 类匹配情况下,ZnGeP₂ 输出波长在 3.9 ~ 10 μm 可调谐,ZnGeP₂ 晶体长度为 11 mm,抽运阈值 0.25 GW/cm²,II 类相位匹配时,获得激光输出的谱线宽度在 30 ~ 40 cm⁻¹,转换效率为 18%,输出峰值功率可达兆瓦;I 类相位匹配的谱线宽度更宽,接近兼并点。

1997 年,美国科学应用公司的 Allik 等人^[23]用 25 mJ、50 ns 输出波长是 2.79 μm Cr,Er:YSGG 激光器抽运 ZnGeP₂-OPO,信号光输出波长在 3.6 ~ 4.7 μm 可调,闲频光的输出波长在 6.9 ~ 12.7 μm 可调,ZnGeP₂-OPO 以较低的阈值运行,斜率效率是 29%,在 6.9 ~ 9.9 μm 产生了 0.7 ~ 2.4 mJ 闲频光能量的输出。

2000 年,Inrad 公司 Vodopyanov 等人^[35]研究了利用 2.93 μm 的 Er, Cr, Tm:YSGG 激光器泵浦 ZnGeP₂-OPO 获得 8 ~ 10 μm 可调谐激光器实验研究。ZnGeP₂ 采用 I 类相位匹配时,获得的激光输出波长在 3.8 ~ 12.4 μm 内可调谐,II 类相位匹配时,获得的输出波长在 4 ~ 10 μm 内可调谐

(输出波长包括信号光与闲频光)。在 10 mJ 能量抽运条件下,第 I 类相位匹配下当闲频光为 $8.1 \mu\text{m}$ 参量光产生 1 mJ,大于 $10 \mu\text{m}$ 参量光不大于 0.1 mJ。

2000 年,美国 VODOPYANOV 等人^[36]利用 $2.79 \mu\text{m}$ Cr,Er:YSGG 激光器抽运 ZnGeP₂-OPO,获得波长为 $6.9 \sim 9.6 \mu\text{m}$ 内可调谐激光器,输出能量为 $0.72 \sim 2.4 \text{ mJ}$,转换效率 29%。

2003 年,Vodopyanov 和 Schunemann 报道了^[37]采用 Nd:YAG ($1.064 \mu\text{m}$) 泵浦 PPLN-OPO ($2.3 \sim 3.7 \mu\text{m}$) 再泵浦 ZnGeP₂-OPO ($3.7 \sim 10.2 \mu\text{m}$) 的三阶段泵浦方式,获得 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 可调谐激光输出。采用非临界相位匹配的 ZnGeP₂ 晶体,通过计算得到最佳晶体长度以及泵浦的光斑,获得 ZnGeP₂-OPO 的阈值为 $2 \mu\text{J}$ 。

2003 年,Bai YX 等人^[38]利用输出波长是 $2.05 \mu\text{m}$ 的 Tm:Ho:YLF 激光器抽运 PPLN-OPO,应用到种子 ZnGeP₂-OPO,ZnGeP₂-OPO 在 $3 \sim 10.5 \mu\text{m}$ 可调。把 PPLN-OPO 和 ZnGeP₂-OPO 结合到一起,获得中红外波长为 $3.4 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 的激光输出。

2004 年,S Haidar 等人^[39]采用 Nd:YAG ($1.064 \mu\text{m}$) KTP-OPO ($2.02 \mu\text{m}$) 泵浦 ZnGeP₂-OPO 的三阶段泵浦方式来获得 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 可调谐输出。ZnGeP₂ 晶体选用 I 类相位匹配,体积为

$10 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,ZnGeP₂-OPO 输出波长在 $5.5 \sim 9.3 \mu\text{m}$ 范围内可调谐,当闲频光波长为 $8 \mu\text{m}$ 时,输出能量为 1.3 mJ,从 $2.02 \mu\text{m}$ 泵浦光到 $8 \mu\text{m}$ 闲频光的转换效率达到 8.25%。

2004 年,S Haidar 等人^[40]证实了中红外可调谐的 ZnGeP₂-OPO。采用 $2.02 \mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光器抽运 KTP-OPO,抽运角度调谐的 ZnGeP₂-OPO,获得的输出波长在 $5.5 \sim 9.3 \mu\text{m}$ 可调谐,获得的闲频光在 $5.5 \sim 9.3 \mu\text{m}$ 范围内可调谐,从 $2.02 \mu\text{m}$ 泵浦光到 $8 \mu\text{m}$ 闲频光的转换效率为 8.25%,量子效率为 32%。

2004 年,S. Haidar 等人^[41] Nd:YAG 激光器泵浦 KTP-OPO,采用 KTP-OPO 泵浦 ZnGeP₂-OPO 获得中远红外激光输出,将 KTP-OPO 输出波长分别为 $1.76 \sim 2.36 \mu\text{m}$ 和 $2.61 \sim 1.90 \mu\text{m}$ 的光线混合抽运到 ZnGeP₂ 晶体中,产生的中红外输出为 $5 \sim 12 \mu\text{m}$ 可调。

2008 年,Lippert 等人^[42]报导了泵浦源为 Ho:YAG 激光器抽运 ZnGeP₂-OPO 获得参量光为 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 可调谐激光器,采用的实验器材如图 2 所示。采用一类相位匹配的 ZnGeP₂ 晶体,采用两块 ZnGeP₂ 晶体进行走离补偿。当泵浦光的重频为 20 kHz 时,ZnGeP₂-OPO 最大输出功率达为 0.95 W,输出波长为 $8 \mu\text{m}$,从基频光到参量光的转换效率为 10.7%, M^2 为 2.7。

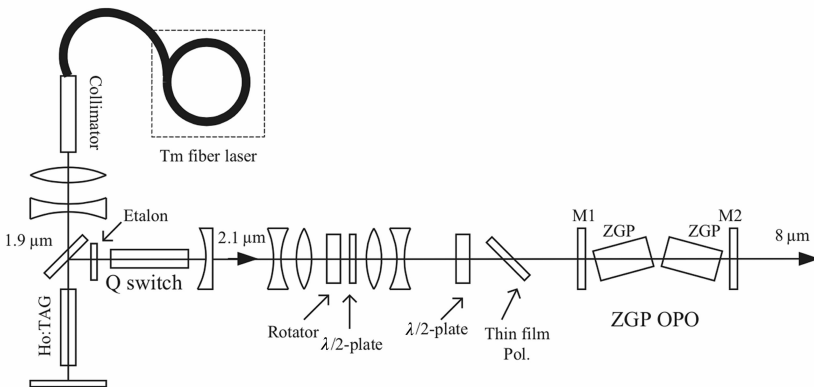


图 2 ZnGeP₂-OPO 实验装置图^[42]

Fig. 2 Schematic of ZnGeP₂-OPO experimental setup^[42]

2008 年,Espen Lippert 等人^[43]用 15 W Tm 光纤激光器泵浦 Ho:YAG 激光器,获得 8.9 W 的 $2.1 \mu\text{m}$ 激光,抽运两块采用走离补偿放置

ZnGeP₂ 晶体,获得 0.95 W 的 $8.0 \mu\text{m}$ 闲频光激光输出。光束质量因子 M^2 为 2.7。

2010 年,Lippert 等人^[44]采用三镜环形腔结

构使得泵浦光两次通过 ZGP 晶体以降低 OPO 振荡阈值的方式(如图 3 所示),最终获得了 1.5 W 的 $8.05 \mu\text{m}$ 闲频光输出,水平方向和垂直方向的 M^2 因子分别为 1.9 和 1.5。

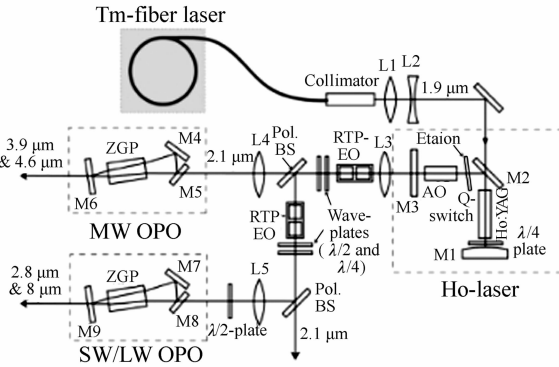


图 3 Ho:YAG 泵浦的多波段三镜环形腔 ZnGeP₂ OPO 试验装置图^[44]

Fig. 3 Ho:YAG pumped three-mirror ring cavity ZnGeP₂ OPO experimental setup diagram^[44]

2010 年,天津大学钟凯等人^[45]报道了采用脉冲 Nd:YAG 激光器抽运 KTP-OPO 获得 $2 \mu\text{m}$ 的激光作为 ZnGeP₂ 的抽运源,获得波长在 $7.2 \sim 12.2 \mu\text{m}$ 范围内可调谐的激光输出,在 $9.22 \mu\text{m}$ 处获得最大输出能量 $10 \mu\text{J}$,峰值功率为 2.2 kW 。

2012 年,法国圣路易斯 ISL 研究所的 Georg Stoeppler 等人^[46]报道了采用脉冲 $1.064 \mu\text{m}$ 激光器泵浦 PPRKTP 获得窄线宽的 $2 \mu\text{m}$ 主振荡功率放大器作为 ZnGeP₂-OPO 的泵浦源,获得脉冲宽度为 5 ns ,高光束质量可调谐的 $6.27 \sim 8.12 \mu\text{m}$ 激光输出。

2016 年,河北三河的光电信息安全控制实验室^[47]报道了采用 $2.09 \mu\text{m}$ 的泵浦 ZnGeP₂-OPO 获得 $8 \mu\text{m}$ 的激光输出,谐振腔长度为 120 mm ,ZnGeP₂ 晶体采用 I 类相位匹配方式,光束质量因子 M^2 为 $1.2 \sim 1.22$ 。

2016 年,哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室^[48]报道了采用 32.7 W 的 $2.09 \mu\text{m}$ 调 Q Ho:YAG 激光器泵浦 ZnGeP₂-OPO 获得 8.2 W 的 $8.3 \mu\text{m}$ 激光输出,斜率效率为 35.1% ,光束质量因子 M^2 为 2.94 。

ZnGeP₂ 晶体的透光性($0.72 \sim 12.3 \mu\text{m}$)与机械性能较好,具有较高的热导率,可采用高功率的

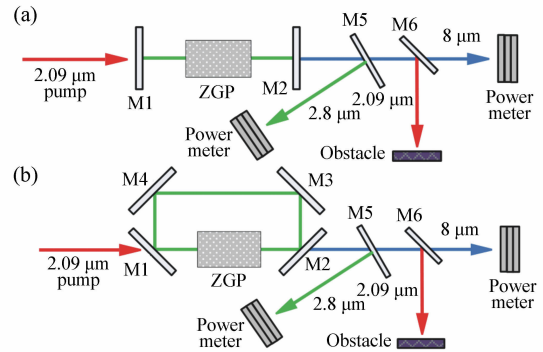


图 4 ZnGeP₂ OPO 试验装置原理图^[47]

Fig. 4 ZnGeP₂ OPO experimental setup principle^[47]

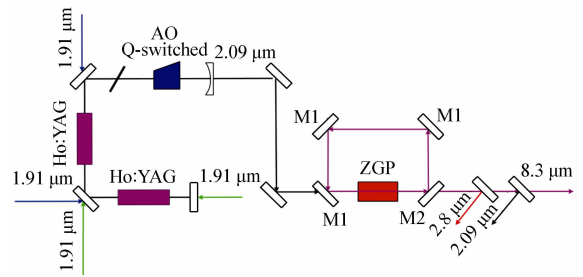


图 5 ZnGeP₂-OPO 试验装置图^[48]

Fig. 5 Diagram of ZnGeP₂-OPO experimental setup^[48]

泵浦光抽运^[49],综合考虑 ZnGeP₂ 晶体的物理光学性能、机械性能等条件,以及对国内外研究现状的分析,可以得出:ZnGeP₂ 晶体在实现 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ OPO 运转有较好的成果,但在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段稍逊色些,也很少有大于 $10 \mu\text{m}$ 波段的激光输出,ZnGeP₂-OPO 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的发展前景会更好些^[50]。

3.3 AgGaSe₂、AgGa_{1-x}In_xSe₂、AgGaS₂ 长波红外光学参量振荡器

AgGaSe₂ 晶体有很强的双折射,大的非线性系数,透明范围宽 $0.73 \sim 20 \mu\text{m}$,对 $3 \sim 18 \mu\text{m}$ 的谐波能实现相位匹配,还可进行混频和光参量振荡。AgGa_{1-x}In_xSe₂ 晶体可以通过非线性频率变化产生 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 参量光的新型晶体,通过 In 的含量的不同可以实现非临界相位匹配,从而消除了走离效应对光参量振荡的影响。AgGaSe₂ 晶体透光范围为 $0.53 \sim 13 \mu\text{m}$,有效非线性系数较小为 13.4 pm/V ,抗损伤阈值低^[22]。

1986 年,西南技术物理研究所^[51]进行了以

1.064 μm 的 Nd:YAG 激光作为泵浦源,与 10.6 μm 的 CO_2 激光器进行和频,在 0.5 cm 长的 AgGaS_2 非线性晶体中实现了 10.6 μm 光至 0.967 μm 光的频率转换,在未聚焦时,获得转换功率大于 7%。

1993 年, Ockceed Martin 的 Sanders 公司^[52] 利用 Tm, Ho: YLF 激光泵浦 AgGaSe_2 -OPO, 抽运功率 10 W 时, 4.1 μm 最高功率输出 0.76 W。

1993 年, 美国 Wright-Patterson 空军基地的 P. A. Budnietal^[53] 采用重频为 2.5 ~ 5 kHz 的 Tm, Ho: YLF 2 μm 激光器泵浦 AgGaS_2 晶体实现抽运功率 56 W 时, 输出最大功率为 0.74 W 的 3.3 ~ 10 μm 的参量振荡光。

1997 年, 美国科学应用公司^[54] 利用 1.57 μm KTP-OPO AgGaSe_2 晶体, 获得 6 ~ 14 μm 连续可调谐参量光输出, 获得的输出能量 1.2 mJ, 斜率效率 3.6%, 量子效率 20.5%。当采用 2.088 μm Ho: YAG 激光器抽运 AgGaSe_2 -OPO 时, 获得 7.9 ~ 12.6 μm 连续可调谐参量光输出, 采用 II 类相位匹配 AgGaSe_2 晶体, 输出能量为 0.05 ~ 0.4 mJ。

1997 年, Allik. T. H 等人^[55] 用非临界相位匹配的波长稳定为 1.57 μm 的 KTP-OPO 激光器, 抽运 I 型 AgGaSe_2 -OPO, 在 6 ~ 14 μm 可调产生的输出能量高达 1.2 mJ/pulse, 带宽 -5 cm^{-1} 。

2000 年, 美国公布了用 2.936 μm Er: YAG 激光器泵 AgGaSe_2 和 ZnGeP_2 -OPO, 在 5 ~ 7 μm 产生有效输出, 获得了斜率效率 15% 及能量超过 2 mJ/pulse 的雷达波长能量^[56]。

2000 年, 日本的 K. Kato 等^[57] 在 CLEO 会议上报导, 采用 3 W 的 2.1 μm 激光泵浦非临界相位匹配 $\text{AgGa}_{0.711}\text{In}_{0.289}\text{Se}_2$ -OPO, 参量光 (3.9 & 4.6 μm) 输出功率达到 1.5 W, 重复频率 5 kHz, 转换效率为 50%, 为目前为止报道的 2 μm 抽运 AgGaInSe_2 -OPO 获得的最佳转换效率。

2001 年, Ehrlich Y 等人^[58], 用 Nd:YAG 输出的 1.064 μm 激光泵浦 KTP-OPO; 采用 KTP-OPO 泵浦 AgGaSe_2 -OPO, AgGaSe_2 采用 I 型相位匹配。获得信号光为 1.94 μm , 闲频光波长在 8 ~ 11 μm 范围内可调。获得 6.5 mJ、1.574 μm 激光输出, AgGaSe_2 -OPO 在 8.5 μm 产生高达 0.5 mJ 的能量, 其光束质量是 $M^2 = 4 \sim 5$, 光谱宽度是 4 ~

5 cm^{-1} 。

2003 年, 日本 Tohoku 大学的 S Haidar^[59] 报告了在温度可调的情况下, 采用输出波长为 1.846 ~ 2.353 μm 的 PPLN-OPO 泵浦 AgGaS_2 晶体, 获得 5 ~ 12 μm 可调谐激光输出。

2003 年, 俄罗斯的 Badiko Valery 等人^[60] 对 $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 晶体进行了报道, 报道指出其获得了可实现非临界相位匹配的 $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 晶体, 得到的晶体具有极低的吸收系数, 为 0.002 cm^{-1} , 在短脉冲激光泵浦下转换效率最高可达到 50%, 是近些年最有优势的非线性晶体。

2004 年, 日本 Tohoku 大学的 S Haidar^[61] 报告了采用输出信号光为 1.932 ~ 1.912 μm , 输出闲频光为 2.368 ~ 2.4 μm 的电光调 Q 的 PPLN-OPO 做 AgGaS_2 的泵浦源, 获得可调谐的 9.4 ~ 10.5 μm 的中红外激光输出, 单脉冲能量为 120 ~ 150 μJ , 用光栅单色仪测得线宽为 $30 \sim 27 \text{ cm}^{-1}$ 。

2005 年, 俄罗斯的 Badiko Valery 等人^[62] 报道了在 x 的参数为 0.25 ~ 0.34 之间晶体性质与非临界波长的实验研究, 并采用 CO_2 激光器作为泵浦源, 采用 SHG 技术, 测量 $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 晶体的抗损伤阈值, 结果为 $(37 \pm 4) \text{ MW/cm}^2$ 。并证明 $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 在非线性频率变化性能上可以媲美 AgGaSe_2 晶体, 同时 $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 中由于有 In 的掺杂, 使 $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 晶体相位匹配角可以达到 90° , 这也是 $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 的优势。

2005 年, 中国科学院安徽光学精密机械研究所的吴海信等人^[63] 用布里奇曼方法生长出 $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 晶体, 并对晶体的吸收系数、反射损耗、光学透过率进行了仿真与实验研究。仿真得到 I 型相位匹配 CO_2 激光二次谐波产生的调谐曲面采用 TEA 波长为 10.6 μm CO_2 激光器在 $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 中的倍频实验研究, 相位匹配角 θ 为 88.2° 。实验获得在非临界相位匹配条件下, $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 可获得 3 ~ 12 μm 高功率红外激光。该所同年生长获得了 $\Phi 35 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的 $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 单晶棒。

2006 年, Vaicikauskas V 等人^[64] 用商业调 Q Nd:YAG 激光泵浦 KTP-OPO, 获得 45 mJ 的 1.57 μm 激光输出, 再抽运 AgGaSe_2 -OPO, 获得波长在 6 ~ 12 μm 可调谐激光输出, 输出能量为

1 mJ。

AgGaSe₂晶体的非线性系数为 33 pm/V,透光性很好,近些年 AgGaSe₂晶体的生长工艺成熟,但晶体的热导率小,走离效应严重,在高功率泵浦时会产生严重的热效应^[22],在 8 ~ 12 μm 波段的高功率 OPO 运转受到了限制。相比 AgGaSe₂ 晶体,AgGaS₂这种非线性晶体就显得更加没有优势,有效非线性系数仅为 13.4 pm/V,且抗损伤阈值与热导率低,导致晶体热效应严重,不能在高功率条件下稳定工作,而且在波长大于 10.5 μm 以后会产生双光子吸收,不利于长波激光的产生,故对 8 ~ 12 μm OPO 的研究价值不是很大。

AgGa_{1-x}In_xSe₂四元黄铜结构掺杂晶体硒铟镓银是由父辈晶体硒镓银(AgGaSe₂)和硒铟银(AgInSe₂)通过适当比例的混合发展而成的性能更加优异的中远红外非线性光学晶体。与 AgGaSe₂相比,AgGa_{1-x}In_xSe₂的变频效率可提高 2 倍以上,AgGa_{1-x}In_xSe₂非线性系数比 AgGaSe₂高 10%,适宜于高功率泵浦源抽运。

稀有金属 In 的掺入,降低了 AgGaSe₂的双折射作用,通过计算获得 In 的掺杂浓度时,理论上可以得到泵浦光、信号光、闲频光三光束共线传播,离散角为零,实现非临界相位匹配^[66]。由于 In 的掺入,也获得了较大的非线性系数 deff,晶体的光谱带宽和温度带宽也会发生变化。

AgGa_{1-x}In_xSe₂晶体^[67]的机械性能、热学性能以及双折射等均随 x 的改变而连续变化,当 In 的含量为 0.288 时,其热导率比 AgGaSe₂可提高 3 倍。AgGa_{1-x}In_xSe₂晶体的双折射随 x 的改变可从

AgGaSe₂晶体的 0.053 8 变化到 AgInSe₂晶体的 0.003。在实现非临界相位匹配的三波混频等方面也有广阔的应用前景。

4 结束语

本文介绍了硒化镉(CdSe)、磷锗锌(ZnGeP₂)、硒镓银(AgGaSe₂)、硫镓银(AgGaS₂)、以及硒铟镓银(AgGa_{1-x}In_xSe₂)非线性晶体的输出特性,CdSe、AgGaSe₂和 ZnGeP₂均能够在 8 ~ 12 μm 波长范围产生能量大于 1 mJ 的参量光输出。CdSe 对泵浦源的要求较为严格,此外,要求波长也至少在 2.0 μm 以上;ZnGeP₂晶体在输出波长达到 8.8 μm 之后,由于多光子吸收比较严重^[68],会影响其在 9 μm 以后长波光参量的输出性能,并且 10 ~ 12 μm 波段的输出未见报道,但其是产生 3 ~ 5 μm 波段输出的重要材料;AgGaSe₂在 8 ~ 12 μm 吸收系数小,且该晶体对 2 μm 具有偏振吸收,在较大功率抽运时会产生严重的热,容易造成晶体和光学元件损伤,因而限制了抽运功率和输出功率^[69],不能获得高能量的激光输出。在 8 ~ 12 μm 波段获得的最大输出能量为毫焦量级,最大功率为瓦量级。在 AgGaSe₂掺入 In 后,可以获得 AgGa_{1-x}In_xSe₂晶体,实现非临界相位匹配,热导率可提高 3 倍。因此 AgGa_{1-x}In_xSe₂晶体在 8 ~ 12 μm 波段有更好的发展前景^[70]。下一步将采用研制的 AgGa_{1-x}In_xSe₂晶体实现 8 ~ 12 μm 激光输出。

参考文献:

- [1] HERBST R L, BYER R L. Efficient parametric mixing in CdSe[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, 19(12): 527-530.
- [2] DAS S, BHAR G C, GANGOPADHYAY S, et al.. Linear and nonlinear optical properties of ZnGeP₂ crystal for infrared laser device applications: revisited[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(21): 4335-4340.
- [3] 李海速, 刘在洲, 郑建奎, 等. 高功率中红外 MgO:PPLN 光参量振荡器[J]. *光学与光电技术*, 2015, 13(1): 64-67.
LIU H S, LIU Z Z, ZHENG J K, et al.. High power mid-infrared MgO:PPLN optical parametric oscillator[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(1): 64-67. (in Chinese)
- [4] 王岩, 杨小虎, 王金玲, 等. 空间遥感光谱仪器光学性能地面检测系统[J]. *液晶与显示*, 2017, 32(3): 206-212.
WANG Y, YANG X H, WANG J L, et al.. Ground testing system for detecting optical performance of space remote sensing spectrometer[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(3): 206-212. (in Chinese)
- [5] BJORKHOLM J E. Some effects of spatially nonuniform pumping in pulsed optical parametric oscillators[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1971, 7(3): 109-118.

- [6] 王君立,尹福昌,宋正勋,等. 高稳定输出功率的全固态激光器[J]. 发光学报,2011,32(8):830-833.
WANG J L, YIN F CH, SONG ZH X, *et al.*. An all-solid-state laser with high stability output power[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(8): 830-833. (in Chinese)
- [7] 肖庆华,林家娟,刘强,等. 914 nm LD 泵浦的基模振荡器设计[J]. 光学与光电技术,2015,13(5):38-40.
XIAO Q H, LIN J J, LIU Q, *et al.*. Design of a fundamental mode oscillator pumped by 914 nm LD[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(5): 38-40. (in Chinese)
- [8] YAO B Q, LI G, MENG P B, *et al.*. High power diode-pumped continuous wave and Q-switch operation of Tm, Ho: YVO₄ laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(12): 857-861.
- [9] FUKUMOTO J M. Three-stage optical parametric oscillator conversion from 1 μm to the 8-10 μm region[J]. *Proc. of ASSL*, 2002, 68: 558-562.
- [10] ABDI F, AILLERIE M, FONTANA M D, *et al.*. Study of contributions to temperature dependence of the phase shift in an electro-optic crystal[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1997, 29(4): 441-450. (in Chinese)
- [11] 岱钦,毛有明,吴凯旋,等. 脉冲激光测距中高速精密时间间隔测量研究[J]. 液晶与显示,2015,30(1):83-87.
DAI Q, MAO Y M, WU K X, *et al.*. High speed and high precision time-interval measurement system in pulsed laser ranging[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 83-87. (in Chinese)
- [12] 李玉瑶,王菲,焦正超,等. 高效率 LD 端面抽运连续 355 nm 激光器[J]. 发光学报,2014,35(3):332-336.
LI Y Y, WANG F, JIAO ZH CH, *et al.*. High efficient LD end-pumped QCW 355 nm laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(3): 332-336. (in Chinese)
- [13] 岱钦,史瑞新,崔建丰,等. 脉冲 LD 泵浦电光调 Q 深紫外激光器[J]. 发光学报,2016,37(4):463-466.
DAI Q, SHI R X, CUI J F, *et al.*. Pulse LD pumped EO-Q switched DUV laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(4): 463-466. (in Chinese)
- [14] 彭超,刘学胜,司汉英,等. 多波长半导体激光阵列端泵 Nd:YAG 脉冲激光器[J]. 发光学报,2018,39(2):162-168.
PENG CH, LIU X SH, SI H Y, *et al.*. Multi-color laser diode array end-pump Nd:YAG pulsed laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(2): 162-168. (in Chinese)
- [15] 刘学胜,董剑,徐爱东,等. 双程放大 740 mJ TEC 冷却 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器[J]. 发光学报,2018,39(7):991-996.
LIU X SH, DONG J, XU A D. Two-pass amplifier 740 mJ diode-pumped Nd:YAG laser with thermoelectric cooler[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(7): 991-996. (in Chinese)
- [16] 欧阳爱国,张宇,程梦杰,等. 中红外光谱技术对乙醇汽油乙醇含量的检测[J]. 中国光学,2017,10(6):752-759.
OUYANG A G, ZHANG Y, CHENG M J, *et al.*. Determination of the content of ethanol in ethanol gasoline using mid-infrared spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10(6): 752-759. (in Chinese)
- [17] ELSAESSER T, SEILMEIER A, KAISER W, *et al.*. Parametric generation of tunable picosecond pulses in the medium infrared using AgGaS₂ crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 1984, 44(4): 383-385.
- [18] FUKUMOTO J M. Three-stage optical parametric oscillator conversion from 1 μm to the 8-12 μm Region[C]. *Trends in Optics and Photonics Series*, 2002.
- [19] ALLIK T H. Recent advances in continuously tunable 8-12 μm radiation using optical parametric oscillators[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3082: 54-64.
- [20] SNELL K J. Efficient optical parametric oscillator with photon recycling:EP, US6985282[P]. 2006.
- [21] FINSTERBUSCH K, BAYER A, ZACHARIAS H. Tunable, narrow-band picosecond radiation in the mid-infrared by difference frequency mixing in GaSe and CdSe[J]. *Applied Physics B*, 2004, 79(4): 457-462.
- [22] DAVID N N P D. *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey*[M]. Springer New York, 2005.
- [23] ALLIK T H, CHANDRA S, RINES D M, *et al.*. Tunable 7-12 μm optical parametric oscillator using a Cr, Er: YSGG laser to pump CdSe and ZnGeP₂ crystals[J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(9): 597-599.
- [24] ISYANOVA Y, DERGACHEV A, WELFORD D, *et al.*. Multi-wavelength, 1.5-10 μm tunable, tandem OPO[C]. *Proc. of ASSL*, 1999, 26: WB4.

- [25] CARRIG T, RAWLE C B, MCKINNIE I T, *et al.*. Dual-band Cr: ZnSe laser pump-tuned OPOs [C]. *Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications*, OSA Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America, 2002).
- [26] WATSON M A, OCONNOR M V, LLOYD P S, *et al.*. Extended operation of synchronously pumped optical parametric oscillators to longer idler wavelengths [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(23): 2106-2108.
- [27] WATSON M A, OCONNOR M V, SHEPHERD D P, *et al.*. Synchronously pumped CdSe optical parametric oscillator in the 9 – 10 microm region. [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(20): 1957-1959.
- [28] MANI A A, PEREMANS A, GEWIRTH A A, *et al.*. Picosecond laser for performance of efficient nonlinear spectroscopy from 10 – 21 μm [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(29): 274-276.
- [29] SHORI R K. Recent developments in scaling output energy from erbium-based lasers and their uses as pump sources for NMR & LWIR OPOs [C]. 17th Annual Meeting of the IEEE-lasers-and-Electro-Optics-Society, Rio Grande, PR, 2004: 805-806.
- [30] GODARD A, RAYBAUT M, LAMBERT O, *et al.*. Cross-resonant optical parametric oscillators: study of and application to difference-frequency generation [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, 22(9): 1966-1978.
- [31] ZAKEL A, WAGNER G J, ALFORD W J, *et al.*. High-power, rapidly-tunable dual-band CdSe optical parametric oscillator [C]. *Proc. of ASSP*, 2005: 433-437.
- [32] YAO B Q, LI G, ZHU G L, *et al.*. Comparative investigation of long-wave infrared generation based on ZnGeP₂ and CdSe optical parametric oscillators [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(3): 262-267.
- [33] YUAN J H, DUAN X M, YAO B Q, *et al.*. Tunable 10 – 11 μm CdSe optical parametric oscillator pumped by a 2.1- μm Ho: YAG laser [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(7): 1-4.
- [34] VODOPYANOV K L. Traveling wave mid-IR ZnGeP₂ and GaSe optical parametric generators and their spectroscopic applications [C]. *Photonics West. International Society for Optics and Photonics*, 1995.
- [35] VODOPYANOV K L, GANIKHANOV F, MAFFETONE J P, *et al.*. ZnGeP₂ optical parametric oscillator with 3.8-12.4 μm tunability [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(11): 841-843.
- [36] VODOPYANOV K L, GANIKHANOV F, MAFFETONE J P, *et al.*. ZGP OPO with a 3.8-12.4 μm tunability [C]. *Lasers and Electro-Optics. IEEE Xplore*, 2000: 14-15.
- [37] VODOPYANOV K L, SCHUNEMANN P G. Broadly tunable noncritically phase-matched ZnGeP₂ optical parametric oscillator with a 2- μJ pump threshold [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(6): 441-443.
- [38] BAI Y, YU J, BARNES N P, *et al.*. Tunable mid-infrared coherent source for lidar: CW OPO [J]. *Proc Spie*, 2003, 5154: 46-51.
- [39] HAIDAR S, NIWA E, MASUMOTO K, *et al.*. Temperature tuning of 5-12 μm by difference frequency mixing of OPO outputs in a AgGaS₂ crystal [J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2003, 36(9): 1071-1074.
- [40] HAIDAR S, MIYAMOTO K, ITO H. Generation of tunable Mid-IR (5.5-9.3 μm) from a 2- μm pumped ZnGeP₂ optical parametric oscillator [J]. *Optics Communications*, 2004, 241(1-3): 173-178.
- [41] HAIDAR S, SASAKI Y, ITO H, *et al.*. Electro-optic tuning of a periodically poled LiNbO₃ optical parametric oscillator and mixing its output waves to generate mid-IR tunable from 9.4-10.5 μm [J]. *Optics Communications*, 2004, 229(1 – 6): 325-330.
- [42] LIPPERT E, RUSTAD G, ARISHOLM G, *et al.*. High power and efficient long wave IR ZnGeP₂ parametric oscillator [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 13878-13884.
- [43] LIPPERT E, FONNUM H, STENERSEN K. High power multi-wavelength infrared source [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, 7836: 78360D-1.
- [44] 巩马理, 韩凯. 10.6 微米激光频率上转换研究 [J]. *激光杂志*, 1986(1): 8-10.
GONG M L, HAN K. Investigation on the frequency up-conversion of 10.6 μm laser [J]. *Laser Journal*, 1986(1): 8-10. (in Chinese)
- [45] KAI Z, J S L, D G X, *et al.*. Tunable and coherent nanosecond 7.2 – 12.2 μm mid-infrared generation based on difference frequency mixing in ZnGeP₂ crystal [J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, 6(3): 179-182.

- [46] STOEPLER G, THILMANN N, EICHHORN M, *et al.*. Mid-infrared cascaded parametric source in 6 μm region for medical applications[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics. IEEE, 2013:1-2.
- [47] YU K, LIANG Z, YAN X. Experimental studies on beam quality-improving of 8 μm ZGP optical parametric oscillator[C]. International Conference on Optoelectronics and Microelectronics. IEEE, 2016:34-37.
- [48] QIAN C P, SHEN Y J, YAO B Q, *et al.*. High power far-infrared ZGP OPO laser[C]. Lasers and Electro-Optics. IEEE, 2016:ATH3J. 6.
- [49] 马力, 李勇, 左腾, 等. 1.3 ~ 5 μm 宽波段红外成像光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(6):73-76.
MA L, LI Y, ZUO T, *et al.*. Design of 1.3 ~ 5 μm wide band infrared imaging optical system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(6):73-76. (in Chinese)
- [50] 刘峰奇. 量子级联激光器:从中红外到太赫兹[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(5):1-5.
LIU F Q. Quantum cascade lasers: from mid-infrared to terahertz[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(5):1-5. (in Chinese)
- [51] RAFFY J, DEBUSSCHERT T, POCHOLLE J P, *et al.*. AgGaSe₂ OPO pumped by a LiNbO₃ OPO[C]. Optical Society of America Advanced Solid State Lasers, 1993.
- [52] BUDNI P A, KNIGHTS M G, SCHEPLER K L, *et al.*. Kiloherz AgGaSe₂ optical parametric oscillator pumped at 2 μm [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(13):1068-1070.
- [53] 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.
- [54] ALLIK T H, CHANDRA S, RINES D M, *et al.*. Tunable 7-12 μm optical parametric oscillator using a Cr, Er:YSGG laser to pump CdSe and ZnGeP₂ crystals[J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(9):597-599.
- [55] SCHUNERMANN P G. Recent advances in nonlinear materials for 5-20 μm wavelength generation[C]. Lasers and Electro-Optics, IEEE, 2000:353-354.
- [56] KATO K, TAKAOKA E, UMEMURA N, *et al.*. Temperature-tuned type-2 90° phase-matched SHG of CO₂ laser radiation at 9.2714-10.5910 μm in CdGe(As_{1-x}P_x)₂[J]. *Filtration Industry Analyst*, 2000.
- [57] EHRlich Y, FASTIG S, PEARL S. Compact high-performance tandem optical parametric oscillator for the 8-12 μm band [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4484:311-317.
- [58] HAIDAR, NIWA E, MASUMOTO K, ITO H. Temperature tuning of 5-12 μm by difference frequency mixing of OPO outputs in a AgGaS₂ crystal[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, 36(9):1071-1074
- [59] BADIKOV V V. Nonlinear frequency generation and conversion; materials, devices, and Applications II [C]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4972:139-144
- [60] HAIDAR S, SASAKI Y, NIWA E, *et al.* Electro-optic tuning of a periodically poled LiNbO₃ optical parametric oscillator and mixing its output waves to generate mid-IR tunable from 9.4-10.5 μm [J]. *Optics Communications*, 2004, 229(1-6):325-330
- [61] BADIKOV V V. Study of nonlinear-optical characteristics of AgGa_{1-x}In_xSe₂ crystals[J]. *Quantum Electronics*, 2005, 35(3):263-267.
- [62] 吴海信, 张维, 石奇, 等. 红外非线性晶体材料 AgGa_{1-x}In_xSe₂ 的生长和性能表征[J]. 人工晶体学报, 2005, 34(3):408-411.
WU H X, ZHANG W, SHI Q, *et al.*. Growth and characterization of IR nonlinear AgGa_{1-x}In_xSe₂ crystals[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2005, 34(3):408-411. (in Chinese)
- [63] VAICIKASKAS V, KUPRIONIS Z, KAUCIKAS M, *et al.*. Mid-infrared all solid state DIAL for remote sensing of hazardous chemical agents[C]. Conference on Laser Radar Technology and Applications XI, SPIE, 2006, 6214: E2140 ~ E2140.
- [64] 吴海信, 石奇, 张维, 等. 新型 AgGa_{1-x}In_xSe₂ 晶体用于 CO₂ 激光倍频研究[J]. 人工晶体学报, 2006, 35(1):85-90.
WU H X, SHI Q, ZHANG W, *et al.*. Study on frequency doubling of CO₂ laser radiation in new AgGa_{1-x}In_xSe₂ crystals [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2006, 35(1):85-90. (in Chinese)

- [65] BAI Y, YU J, BARNES N P, *et al.* Synthesis of $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ polycrystalline materials[J]. *Journal of Rare Earth*, 2006, 24(z1):269-271.
- [66] VIJAYAKUMAR P, BABU G A, RAMASAMY P. Growth and physical characterization of $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$, ($x=0.5$) single crystals grown by modified vertical Bridgman method[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2014, 389(3):139-143.
- [67] 姬广举, 齐迹, 靳添博, 等. 掺杂晶体 $\text{AgGa}_{(1-x)}\text{In}_x\text{Se}_2$ 的群速失配对频率转换的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2008, 13(2):112-115.
JI G J, QI J, JIN T B, *et al.*. Influence of group velocity mismatch on the frequency conversion of $\text{AgGa}_{(1-x)}\text{In}_x\text{Se}_2$ [J]. *Journal Harbin Univ. Sci&Tech.*, 2008, 13(2):112-115. (in Chinese)
- [68] 白云昌, 孙峰, 刘在洲, 等. Ho: YAG 激光泵浦的磷锗锌光参量振荡器[J]. 光学与光电技术, 2016, 14(4):44-47.
BAI Y CH, SUN F, LIU Z ZH, *et al.*. ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by Ho: YAG laser[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2016, 14(4):44-47. (in Chinese)
- [69] 王玉坤, 贾娜, 张锐. 激光通信成像光斑处理方法研究[J]. 液晶与显示, 2017, 32(9):736-740.
WANG Y K, JIA N, ZHANG R, *et al.*. Laser communication spots imaging process method[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(9):736-740. (in Chinese)
- [70] 杨成龙, 颜昌翔, 杨宇飞. 星间激光通信终端光学天线的隔离度[J]. 中国光学, 2017, 10(4):462-468.
YANG CH L, YAN CH X, YANG Y F, *et al.*. Isolation of optical antenna of inter-satellites laser communication terminals [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4):462-468. (in Chinese)

作者简介:



温 雅(1990—),女,河北石家庄人,博士研究生,2015 年于长春理工大学获得理学硕士学位,主要从事激光物理与新型固体激光器的研究。E-mail:winvene@163.com



金光勇(1971—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,2003 年于长春理工大学获得工学博士学位,主要从事激光及其与物质相互作用、激光物理与新型固体激光器的研究。E-mail:jgycust@163.com



吴春婷(1982—),女,吉林长春人,教授,博士生导师,2011 年于哈尔滨工业大学获得工学博士学位,主要从事激光物理与新型激光器的研究。E-mail:big-snow1@163.com