

文章编号: 1001-3806(2011)04-0433-07

## 中红外光参变振荡非线性晶体及器件研究进展

王礼, 吴先友, 李哲, 江海河\*

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 评述了近年中红外光参变振荡器(OPO)的研究进展, 主要包括 OPO 非线性晶体的特性及 OPO 技术参量与器件系统, 给出中红外 OPO 目前存在的关键问题和今后的发展方向, 提出了进一步改善器件性能的可能途径。

**关键词:** 非线性光学; 光参变振荡器; 非线性晶体; 中红外激光

**中图分类号:** O437.4      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.001

### Progress of the nonlinear crystal and device of the mid-infrared optical parametric oscillator

WANG Li, WU Xian-you, LI Zhe, JIANG Hai-he

(Anhui Institution of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The progress of mid-infrared optical parametric oscillators (OPO) was reviewed, including the properties of the nonlinear crystals, technical parameters and OPO device. The key issues and the development direction of the mid-infrared OPO were pointed out, and possible measures for performance development were put forward.

**Key words:** nonlinear optics; optical parametric oscillator; nonlinear crystal; mid-infrared laser

#### 引言

中红外激光在军事、环境、医疗和科研等领域有着广泛的应用。中红外激光的2个波段处于大气传输的窗口, 对大雾、烟尘具有较强的穿透力, 在军事应用中, 中红外激光在激光制导、红外干扰、生化战剂探测、伪装识别、遥感探测、激光雷达等方面都有重要的应用。由于多数碳氢化合物气体及有毒有害气体分子在中红外波段存在较强的吸收特征谱线, 在民用领域中, 中红外激光在天然气管道泄露探测、煤矿瓦斯气体探测、大气中温室气体探测、空气与水和土壤中污染物检测、食品和农产品检测、爆炸物与毒品稽查、生物医药检测与呼出气体医学诊断等方面也有重要的应用。

目前, 能够实现  $3\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$  中、远红外输出的激光器有: 气体激光器、化学激光器、自由电子激光器、半导体激光器、固体激光器、光纤激光器和光参变振荡器(optical parametric oscillator, OPO)。相对于普通激光

器, OPO 不仅具有宽调谐、高功率、窄线宽、小型化的优点, 而且可以利用非线性增益的瞬时性, 选择合适的抽运源实现从飞秒最短脉冲到连续光的输出, 而不受激光跃迁寿命的限制<sup>[1-2]</sup>。

近10年来, 随着物化性能好、非线性系数大、透明范围宽、吸收系数小、损伤阈值高等优质中红外非线性晶体的改进, 以及新的抽运光源的出现和质量与性能的提高, 中红外 OPO 技术得到了迅速发展, 出现了一些新波段、光束质量和功率抽运源, 科学家发明设计了几类新的谐振腔类型, 出现了非常规折射率相位匹配的方式和调谐技术, 增大了 OPO 输出光波长范围和转化效率, 改善了稳定性和可靠性, 一些器件系统已实用化。中红外 OPO 已成为可调谐相干光源的主流, 不断开拓着新的应用领域。

作者针对近年来中红外 OPO 在非线性晶体、技术与器件中国内外新的发展状况, 特别是磷锗锌 OPO ( $\text{ZnGeP}_2$ -OPO, ZGP-OPO)、周期极化晶体准相位匹配 OPO、非临界相位匹配 OPO (non-critical phase-matching optical parametric oscillator, NCPM-OPO)、光纤激光器抽运 OPO、OPO-光参变放大器等新型中红外 OPO 的新的进展, 给出中红外 OPO 目前存在的关键问题和今后的发展方向, 提出了进一步改善器件性能的可能途径, 为该领域研究提供参考。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90922003); 国家八六三高技术研究发展计划资助项目(2008AA05Z422)

作者简介: 王礼(1986-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: hjiang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2010-10-29; 收到修改稿日期: 2010-12-07

## 1 OPO 工作模式、腔型与相位匹配

### 1.1 OPO 基本原理

OPO 是产生可调谐激光的重要手段之一。OPO 的理论最早是 KORLL 在 1962 年提出的,美国贝尔实验室的 GIORDMAINE 和 MILLER 于 1965 年首先在脉冲激光器上实现了光学参变振荡。OPO 发生于激光与非线性晶体相互作用的 2 阶非线性光学效应,由频率为  $\omega_p$  的抽运光在非线性晶体中产生频率为  $\omega_s, \omega_i$  的信号光和闲频光,并满足能量守恒和动量守恒(共线相位匹配)条件, $k$  为波数,即:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

$$k_p = k_s + k_i \quad (2)$$

OPO 的结构与激光谐振腔类似,但 OPO 需要采用激光抽运,信号光或闲频光在谐振腔内形成振荡,并不断从抽运光中获得能量而得到放大,当信号光或闲频光增益超过阈值时就会产生激光输出。

### 1.2 OPO 工作模式与腔型

OPO 主要有两种工作模式:当谐振腔内只有信号光或闲频光振荡时,称为单谐振振荡器(singly resonant oscillation, SRO);当谐振腔内信号光和闲频光同时振荡时,称为双谐振振荡器(doubly resonant oscillation, DRO)。两种谐振方式的阈值抽运光强由下式给出,即:

$$I_{s,th} = \frac{2}{1 - R_i} I_{D,th} = \frac{4n_p n_s n_i c^3 \epsilon_0 (1 - R_s)}{\omega_s \omega_i d_{eff}^2 L^2} \quad (3)$$

式中, $I_{s,th}$  和  $I_{D,th}$  分别为 SRO 和 DRO 的阈值抽运光强, $d_{eff}$  为有效非线性系数, $n$  为折射率, $c$  为光速, $\omega$  为圆频率, $\epsilon_0$  为真空中的介电常数, $R$  为反射率, $L$  为谐振腔长。DRO 抽运阈值较低,多用于连续光抽运输出;SRO 因反射镜与谐振腔设计容易、转换效率高、输出稳定而被广泛采用。

OPO 采用的谐振腔腔型主要有直腔和环形腔。直腔又分为内腔和外腔,内腔抽运功率密度高、抽运阈值低、转换效率高、结构紧凑,但高功率密度容易损伤非线性晶体。环形腔的光路是单向通过非线性晶体的,避免了被输出镜反射的信号光和闲频光产生和频效应,使能量回到抽运光,从而提高了转换效率,故 DRO 宜采用环形腔抽运。

### 1.3 OPO 相位匹配

OPO 主要用于频率可调谐的激光输出,由(1)式、(2)式和  $k = \frac{\omega n}{c}$ , 消去  $\omega_p$  可得:

$$\omega_s (n_p - n_s) = \omega_i (n_i - n_p) \quad (4)$$

当折射率变化时,根据(4)式, $\omega_s$  和  $\omega_i$  将产生相应的

变化,以满足相位匹配条件,从而实现频率调谐。目前主要的相位匹配方式包括:双折射相位匹配(birefringent phase-matching, BPM)、准相位匹配(quasi-phase-matching, QPM)和非临界相位匹配(non-critical phase-matching, NCPM),其中 QPM 是通过电极化区域的周期性反转,在光的传播方向上实现相位匹配。该方法对偏振方向和波矢方向没有限制,其最大的优点是可以将光的传播方向选择为晶体非线性系数最大的方向,使转换效率达到最大。NCPM 是使抽运光沿垂直于光轴的方向入射,通过改变晶体温度实现相位匹配,该方法能有效地避免走离效应。

## 2 中红外 OPO 研究现状

### 2.1 OPO 非线性晶体

OPO 的发展主要依赖于非线性晶体的发展。早期主要采用  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (KDP),  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (ADP),  $\text{LiNbO}_3$  (LN) 及  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  (BNN) 晶体,这些晶体非线性系数小、损伤阈值低、透光范围小、物化性能不稳定,限制了 OPO 的发展。新的非线性晶体出现,如  $\text{KTiOPO}_4$  (KTP)、周期极化铌酸锂(periodically poled  $\text{LiNbO}_3$ , PPLN)、掺镁 PPLN (PPMgLN),  $\text{AgGaS}_2$ ,  $\text{AgGaSe}_2$ ,  $\text{CdGeAs}_2$ ,  $\text{CdSe}$ ,  $\text{ZnGeP}_2$  (ZGP), 将其透光范围扩展至中红外波段,增大了非线性系数和损伤阈值,促进了 OPO 的发展。由(3)式可知,抽运阈值与有效非线性系数的 2 次方成反比,大的非线性系数有利于降低抽运阈值并获得高的增益。常用的非线性晶体及主要性质如表 1 所示。

表 1 几种非线性晶体的性质

晶体名称	非线性系数/( $\text{pm} \cdot \text{V}^{-1}$ )	透光范围/ $\mu\text{m}$	损伤阈值(1.064 $\mu\text{m}$ , 10ns)/( $\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
ZGP	$d_{36} = 75$	0.7 ~ 12	> 30000
PPMgLN	$d_{33} = 27.4$	0.33 ~ 5.5	460
KTA	$d_{24} = 3.2$	0.35 ~ 5.3	> 600
KTP	$d_{33} = 10.7$	0.35 ~ 4.5	> 500
$\text{AgGaS}_2$	$d_{36} = 13$	0.5 ~ 13	> 25
$\text{AgGaSe}_2$	$d_{36} = 33$	0.7 ~ 18	> 25
$\text{GaSe}$	$d_{22} = 54$	0.62 ~ 20	30
$\text{GaAs}$	$d_{14} = 94$	0.9 ~ 17	34
LN	$d_{33} = 27.4$	0.35 ~ 4.3	> 60

ZGP 因大的非线性系数、宽的透光范围,特别是高的损伤阈值,成为 OPO 研究和应用的热点。在红外非线性晶体的生长方面,20 世纪 80 年代初,中国科学院安徽光学精密机械研究所就开展了  $\text{AgGaS}_2$ ,  $\text{AgGaSe}_2$  晶体的研制,生长出品质优良的晶体,并研制了  $\text{AgInGaSe}_2$ ,  $\text{CdSe}$ ,  $\text{AgGaGeS}_4$  (AGGS), ZGP 等晶体(见图 1),提高了红外非线性晶体的效率和损伤阈值。



图1 安徽光学精密机械研究所生长的  $\text{AgGaSe}_2$ ,  $\text{AgGaS}_2$ ,  $\text{AgInGaSe}_2$ , ZGP, CdSe,  $\text{AgGaGeS}_4$  红外非线性晶体

## 2.2 GaSe-OPO, GaAs-OPO

硒化镓(GaSe)是双折射晶体,具有很大的非线性系数和极宽的透光范围( $0.62\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ ), GaSe-OPO能够用  $1.064\mu\text{m}$  激光抽运,该晶体具有很大的双折射( $\Delta n \approx 0.35$ ),在其透光范围内能实现任何3波相互作用的相位匹配<sup>[3]</sup>。但由于GaSe质地柔软,在垂直于光轴的方向上为层状结构,很难对晶体进行切割和抛光,而且对于GaSe没有理想的增透膜材料,将其用作OPO晶体时会由于端面菲涅耳反射造成很大的光损耗。掺铟GaSe的研制<sup>[4]</sup>,标志着掺杂GaSe工艺的成熟,这使晶体的硬度大大提高,使GaSe加工为品质优良的器件成为可能。1997年,斯坦福大学的VODOPYANOV等人<sup>[5]</sup>利用波长  $2.8\mu\text{m}$  的Er,Cr:YSGG激光器抽运GaSe-OPG,获得了  $3.3\mu\text{m} \sim 19\mu\text{m}$  的连续可调谐中红外输出,成为采用光参变产生或光参变振荡技术获得的最宽调谐范围。1997年,VANYAKIN等人<sup>[6]</sup>对GaSe晶体端面在  $3.7\mu\text{m} \sim 4.45\mu\text{m}$  镀增透膜,采用  $2.12\mu\text{m}$  的Ho,Tm,Cr:YAG激光器抽运,获得  $4.2\mu\text{m}$  的GaSe-OPO输出。1998年,据KULEVSKY<sup>[7]</sup>报道,采用Er,Cr:YSGG抽运GaSe-OPO,获得了  $4\mu\text{m} \sim 8\mu\text{m}$  的调谐输出;采用  $2\mu\text{m}$  的钛激光抽运GaSe-OPO,获得了  $3.5\mu\text{m} \sim 4.5\mu\text{m}$  的调谐输出,由于没有找到如此宽范围内的增透膜材料,光损耗很大。目前,GaSe研究热点主要用于差频产生太赫兹波长。如果GaSe在宽透光范围内镀增透膜的问题得以解决,采用  $1.064\mu\text{m}$  抽运的GaSe-OPO便能实现  $1\mu\text{m} \sim 18\mu\text{m}$  的连续可调谐输出。

砷化镓(GaAs)具有宽透光区域( $0.9\mu\text{m} \sim 17\mu\text{m}$ )和高非线性系数,使其成为覆盖这个光谱范围的最有希望的候选材料。由于该晶体是光学各向同性的,需要采用QPM,研制出的定向图案砷化镓(orientation-patterned GaAs,OPGaAs)是QPM材料,具有NCPM的优点且相互作用长度长。由于受截止波长的限制,与ZGP晶体相同,需要采用  $2\mu\text{m}$  以上的激光抽运,但OPGaAs低损耗的透光区域可达到  $12\mu\text{m}$ ,远大于ZGP

晶体的低损耗透光范围( $3\mu\text{m} \sim 8\mu\text{m}$ )。

2005年,斯坦福大学的VODOPYANOV等人<sup>[8]</sup>已经实现了脉冲OPGaAs-OPO的中红外输出,其调谐波长可以覆盖  $2\mu\text{m} \sim 11\mu\text{m}$ (见图2)。目前,限制OPGaAs-OPO发展的主要因素是样品的厚度,薄的样品限制了功率的提高。进一步研制的更短周期、较厚、低损耗( $0.005\text{cm}^{-1}$ )样品有望在不久的将来获得连续光振荡。

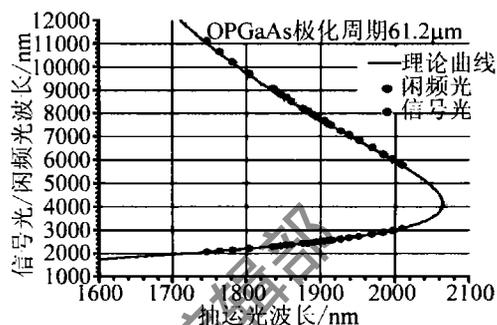


图2 OPGaAs-OPO 波长调谐范围曲线<sup>[8]</sup>

## 2.3 KTP-OPO,KTA-OPO

磷酸钛氧钾( $\text{KTiOPO}_4$ ,KTP)是双轴晶体,物化性能稳定,不易潮解,能生长出大尺寸的晶体。在  $700\text{nm} \sim 4000\text{nm}$  波长范围内,KTP晶体的双折射率差别较大,利用角度调谐能实现可调谐的参变光输出。KTP晶体对  $450\text{nm} \sim 2800\text{nm}$  波段的激光具有较高的透过率(大于85%),但它对  $3500\text{nm} \sim 4000\text{nm}$  波段的激光透过率较低,尤其在  $2838.8\text{nm}$  和  $3485.4\text{nm}$  处还存在两个吸收峰,对这两波长的激光具有很强的吸收,这限制了KTP-OPO在中红外波段的调谐应用。

砷酸钛氧钾( $\text{KTiOAsO}_4$ ,KTA)的物化性能稳定、损伤阈值高、生长技术成熟,在  $1\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$  波长范围内,晶体的双折射率差别较大,易于用角度调谐实现参变光的调谐输出。表2为KTA-OPO激光输出的情况。

表2 KTA-OPO 参量

光源	KTA-OPO 中红外输出				
	抽运源 波长/ $\mu\text{m}$	波长范 围/ $\mu\text{m}$	功率/ 能量	光光转 换效率	时间,参 考文献
Nd:YAG	1.064	3.47	3W		2009,[9]
Nd:GdVO <sub>4</sub>	1.064	3.47	356mW	12%	2008,[10]
Nd:YAG	1.064	2.3~4.5	20mJ		2006,[11]
Nd:YALO	1.064	3.5	4.1W		2001,[12]

2001年,新加坡WU等人<sup>[12]</sup>采用半导体激光器(laser diode,LD)侧面抽运调Q的Nd:YALO激光器作为抽运源,利用NCPM技术,在  $3.5\mu\text{m}$  获得4.1W的中红外输出,但光光转换效率低于1%,实验装置如图3所示。

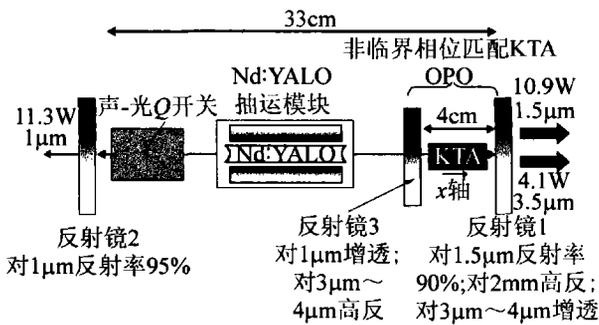


图3 内腔式非临界相位匹配 KTA-OPO 装置图

KTA 虽然在中红外区域的透射性比 KTP 的透射性好,但对大于  $3.6\mu\text{m}$  的波长无有利的匹配角,且走离效应较明显。由于该晶体有效非线性系数小,导致 OPO 的起振阈值较高、转换效率低,中红外波段输出功率较低,并且不能实现连续的调谐输出,因而仅限于近红外较窄的调谐应用。KTA 较 KTP 更适合于高功率激光抽运或飞秒激光同步抽运。2007 年,西南技术物理研究所 WANG 等人<sup>[13]</sup>利用复合腔技术,采用电光调 Q 灯抽运 Nd:YAG 激光为抽运源,实现了 KTA-OPO 的 5Hz ~ 40Hz 工作,OPO 输出单脉冲能量 36mJ,脉宽 10ns,其中,闲频光波长  $3.407\mu\text{m}$ ,能量 11mJ。2009 年,天津大学 ZHONG 等人<sup>[14]</sup>利用 LD 端面抽运主动调 Q 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作为抽运源,采用内腔式抽运技术,将 KTA-OPO 的阈值降低到 0.825W,在  $3.47\mu\text{m}$  处获得最大功率 435mW@30kHz 的激光输出,光光转换效率 4.4%。

## 2.4 LN-OPO, PPLN-OPO 及 PPMgLN-OPO

铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$ , LN) 是负单轴晶体,物化性能稳定,能生长大尺寸、高光学质量的晶体。LN 由于损伤阈值较低,限制了其在高能量输出的应用,且非线性系数小,抽运阈值较高,适用于脉冲抽运方式。在 LN 的基础上研制出周期极化铌酸锂 (PPLN),随着 PPLN 制备技术和 QPM 技术的发展,采用 QPM 的 PPLN-OPO 得到了广泛的应用。PPLN 的损伤阈值约为普通 LN 的 10 倍,由于非线性系数大 ( $d_{33} = 42\text{pm/V}$ ),能够获得大的增益且无走离效应,可以使振荡阈值降低一个数量级。采用不同的周期和温度调谐可以产生不同波长的参量输出。表 3 为 PPLN-OPO 自 2000 年以来产生  $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$  中红外输出的进展。

与 PPLN 相比,掺镁 PPLN (PPMgLN) 具有更高的损伤阈值,这有利于增大输出功率,并能在室温下工作,而 PPLN 需要工作在  $150^\circ\text{C}$ 。近几年,由于高品质 PPMgLN 的出现,PPMgLN-OPO 获得了较大的发展,主要表现在输出功率和转换效率上,如表 4 所示。

2005 年,西南技术物理研究所 WAN 等人<sup>[19]</sup>采用复合腔技术,利用 Nd:YAG 激光抽运 LN,获得了 OPO

表3 PPLN-OPO 参量

抽运源		PPLN-OPO 中红外输出			
光源	波长/ $\mu\text{m}$	波长范围/ $\mu\text{m}$	功率	光光转换效率	时间,参考文献
Tm, Ho: GdVO <sub>4</sub>	2.048	3.87 ~ 4.43	< 195mW	6.5%	2007, [15]
Nd: YLF	1.064	3 ~ 5	4W	斜效率 15%	2004, [16]
Nd: YVO <sub>4</sub>	1.064	3.41	466mW		2004, [17]
Nd: YAG	1.064	3 ~ 3.8	2.2W		2002, [18]

表4 PPMgLN-OPO 参量

抽运源		PPMgLN-OPO 中红外输出			
光源	波长/ $\mu\text{m}$	波长范围/ $\mu\text{m}$	功率/W	光光转换效率	时间,参考文献
掺镱光纤激光器	1.064	3.614	2.75		2010, [23]
Nd: YAG	1.064	3.84	16.7		2010, [20]
Nd: YAG	1.064	3.78 ~ 4.58	< 1.65		2010, [24]
Nd: YVO <sub>4</sub>	1.064	3.82	9.23	19.2%	2010, [25]
Nd: YAG	1.064	3.84	8.3	14.1%	2009, [26]
Nd: YVO <sub>4</sub>	1.064	2.7 ~ 4.4	4.8	44%	2006, [27]

输出单脉冲平均能量 56.4mJ,闲频光 ( $3.097\mu\text{m}$ ) 脉冲平均能量 22.8mJ,脉宽 8ns,光光转换效率 46% (重复频率 1Hz ~ 10Hz)。2010 年,中国工程物理研究院 PENG 等人<sup>[20-22]</sup>使用 LD 连续抽运声光调 Q 的 Nd:YAG 激光器作为抽运源,利用 QPM 技术消除了光束走离效应,实现 OPO 输出总的平均功率为 62.7W,斜效率为 71.7%;在  $2.7\mu\text{m}$  激光输出功率约 40W,斜效率为 23.7%,光束质量  $\beta < 4$ ;在  $3.8\mu\text{m}$  处获得了 22W 的高功率输出,斜效率为 16.9%,光束质量  $\beta < 4$ ,波长调谐范围  $3.7\mu\text{m} \sim 4.0\mu\text{m}$ 。

LN, PPLN 及 PPMgLN-OPO 三者相比较,PPMgLN-OPO 的输出功率和转换效率有了明显的提高,输出功率可以达到近百瓦,并能在常温下工作,这得益于高品质 PPMgLN 晶体的研制和发展,使得其损伤阈值大大提高。PPMgLN-OPO 克服了 LN, PPLN-OPO 损伤阈值低、输出功率小及不能在常温下工作的不足,而且,所采用的抽运源是波长  $1.064\mu\text{m}$  的 Nd:YAG 激光器。抽运源输出功率的提高对 OPO 输出功率的提高有着直接影响,日趋成熟的商用 Nd:YAG 激光器所提供的高质量抽运光束,为 OPO 产生高质量的中红外输出光束提供了保障。但 PPLN-OPO 系统的实用化还需要生长出大尺寸、光学质量均匀的 PPMgLN 晶体,其工艺还有待进一步提高。

## 2.5 AgGaS<sub>2</sub>-OPO, AgGaSe<sub>2</sub>-OPO

硒镓银 ( $\text{AgGaS}_2$ )、碲镓银 ( $\text{AgGaSe}_2$ ) 是早期用于 OPO 的主要的非线性材料。 $\text{AgGaS}_2$  是负单轴晶体,不易潮解,在某些波长处的吸收引起的折射率热效应及晶体表面低的损伤阈值 ( $0.35\text{J}/\text{cm}^2$ ) 限制了它在高率

OPO 方面的应用。AgGaSe<sub>2</sub> 是目前能和 ZGP 竞争的采用 2μm 抽运的非线性晶体,但 AgGaSe<sub>2</sub> 由于热导率较差,在功率较高时,会由于晶体中产生的热透镜效应损伤晶体端面。AgGaS<sub>2</sub>, AgGaSe<sub>2</sub> 两者在 3μm ~ 5μm 范围的发展状况见表 5 和表 6。

表 5 AgGaS<sub>2</sub>-OPO 参量

抽运源		AgGaS <sub>2</sub> -OPO 中红外输出			
光源	波长/μm	波长范围/μm	能量/mJ	光光转换效率	时间,参考文献
Nd: YAG	1.064	2.35 ~ 5.27	<0.58		2009, [28]
Nd: YAG	1.064	3.9 ~ 11.3		22%	2000, [29]
Nd: YAG	1.064	2.8 ~ 4.2		斜效率 16%	1997, [30]

表 6 AgGaSe<sub>2</sub>-OPO 参量

抽运源		AgGaSe <sub>2</sub> -OPO 中红外输出			
光源	波长/μm	波长范围/μm	功率/mW	光光转换效率	时间,参考文献
CTA-OPO	1.55	4.1 ~ 7.9	<67		1999, [31]
LN-OPO	1.82	2.15 ~ 12		1.75%	1995, [32]
Ho: YLF	2	2.65 ~ 9.02		18%	1986, [33]

2000 年, VODOPYANOV 等人<sup>[29]</sup> 使用 Nd: YAG 抽运 AgGaS<sub>2</sub>-OPO, 实现了 3.9μm ~ 11.3μm 连续可调谐输出, 这是目前采用 1.064μm 抽运所获得的最宽的调谐范围, 光光转换效率达到 22%。1995 年, RAFFY<sup>[32]</sup> 等人使用 LN-OPO 抽运 AgGaSe<sub>2</sub>-OPO, 在抽运波长为 1.82μm 时获得了 2.15μm ~ 12μm 的调谐输出, 这也是一个很宽的调谐范围。

AgGaS<sub>2</sub> 需要采用 1μm 激光抽运, 而 AgGaSe<sub>2</sub> 由于相位匹配条件的限制, 需要采用 1.3μm ~ 3μm 激光抽运。两者都具有很宽的透光范围, 最大的缺陷是损伤阈值较低, 不能满足高重频、大能量输出的需要, 多用于差频产生中远红外激光输出。近年来, 在该方向的发展很少有报道出现, 主要还是因为其低的损伤阈值限制了二者在 OPO 中的发展, 但 AgGaS<sub>2</sub>, AgGaSe<sub>2</sub> 宽的调谐范围和适合 1μm 激光抽运的 AgGaS<sub>2</sub> 以及低抽运阈值的 AgGaSe<sub>2</sub> 在一些研究场合还是有应用的。

### 2.6 ZGP-OPO

磷锗锌(ZnGeP<sub>2</sub>, ZGP)是正单轴晶体, 损伤阈值高、非线性系数大、热导率高、物化性能稳定。2μm 激光抽运的 ZGP-OPO 的特点是参变激光输出都在 3μm ~ 5μm 内, 具有很高的转换效率(约为 50%)和大的平均输出功率(约为 100W)。ZGP 是高功率中红外 OPO 首选材料, 目前已成为 OPO 研究的热点。但是, 在 1μm ~ 3μm 波长范围, 早期的 ZGP 存在光学衰减。随着晶体生长技术的不断提高, 在 2.05μm 波长处的吸收系数已降到 0.1cm<sup>-1</sup>, 使得 ZGP-OPO 的高功率输出才得以实现。掺钕或掺钕的固体激光器(2μm ~ 3μm)是

ZGP-OPO 的理想抽运光源<sup>[34]</sup>, 采用调 Q 方式的脉冲激光器能产生较高的输出功率以达到其抽运阈值, 抽运光源光束质量的提高会进一步促进 ZGP-OPO 的发展和應用。ZGP-OPO 近年来发展很快, 其发展状况见表 7。

表 7 ZGP-OPO 参量

抽运源		ZGP-OPO 中红外输出			
光源	波长/μm	波长范围/μm	功率/W	光光转换效率	时间,参考文献
Tm, Ho: GdVO <sub>4</sub>	2.048	3.8, 4.45	<14.1	斜效率 41.8%	2009, [35]
Tm, Ho: GdVO <sub>4</sub>	2.048	3 ~ 6.5			2008, [36]
Cr, Tm, Ho: YAG	2.09	4.7 ~ 7.8		56%	2008, [37]
Tm-fiber laser	2	3.4 ~ 3.9, 4.1 ~ 4.7	0.658	斜效率 35%	2008, [38]
KTP OPO	1.95 ~ 2.2	5.0 ~ 10			2007, [39]
Ho: YAG	2	3 ~ 5	12.6		2007, [40]
PPLN	2.3 ~ 3.7	3.7 ~ 10.2			2003, [41]

2003 年, VODOPYANOV 使用调 Q 的 Nd: YAG 激光器抽运的 PPLN-OPO 再抽运 ZGP-OPO, 利用 PPLN-OPO 输出波长可调节的特性, 通过改变抽运波长的方法, 使 ZGP-OPO 获得了 3.7μm ~ 10.2μm 的宽调谐中红外输出, 抽运阈值仅 2μJ<sup>[41]</sup>。其实验装置如图 4 所示, 该装置采用了常用的 OPO 串联抽运方式, 并在

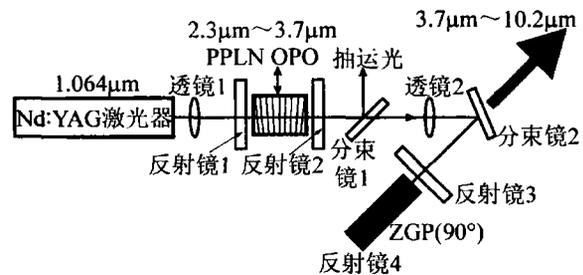


图 4 宽调谐 ZGP-OPO 装置图

ZGP 晶体端面上镀金作为 OPO 的后腔镜 M<sub>4</sub>, 减少了光学器件的损耗。2008 年, NIEUWENHUIS<sup>[37]</sup> 采用调 Q 的 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器抽运 ZGP-OPO, 将抽运激光限制为单模线偏振输出, 提高了抽运光源的光束质量(M<sup>2</sup> = 1.25), 在 4.7μm ~ 7.8μm 内, 光光转换效率达到 56%, 这是目前最高的光光转换效率, OPO 的输出也得到了很好的光束质量(M<sup>2</sup> = 1.38)。2009 年, 哈尔滨工业大学 ZHU 等人<sup>[35]</sup> 使用 LD 抽运的 Tm, Ho: GdVO<sub>4</sub> 激光器抽运 ZGP-OPO, 当 LD 抽运功率为 66W 时, 2.049μm 的抽运输出功率提高到 28.7W, 并采用双谐振 ZGP-OPO 降低了抽运阈值, 在 3.8μm 处获得 14.1W 的高功率输出。

虽然, 近年来 ZGP-OPO 的最大输出功率不断提升, 但 ZGP-OPO 的最大输出功率仍然远低于其损伤阈

值,输出功率还可以进一步提高。ZGP-OPO 要获得高功率和高光束质量的输出的关键在于提高 ZGP 的品质和抽运源光束功率与质量,高性能 ZGP 和抽运源已成为限制其发展的两个主要因素。目前,只有美国和俄罗斯掌握了高品质 ZGP 晶体生长技术,国内中国科学院安徽光学精密机械研究所依靠自己在中红外非线性晶体生长方面的技术积累,近来也自主生长出 ZGP 晶体,并实现了激光输出,但其质量与国外的产品仍然有差距,生长工艺还需进一步提高。在 ZGP-OPO 固体激光抽运源方面,中国科学院安徽光学精密机械研究所近来已研制出高能量脉冲 Cr, Tm, Ho:YAG 和 Er:YAG 激光器,采用波片-PORRO 棱镜组合修正 Cr, Tm, Ho:YAG 晶体的热退偏效应,图 5 为实验结构图,在 20℃ 常温下实现了重复频率 3Hz 的电光调 Q 脉冲运转,最大激光脉冲能量达到 480mJ,脉冲宽度 80ns,为下一步开展 2 $\mu$ m ~ 3 $\mu$ m 高能脉冲固体激光抽运 OPO 研究打下了基础。

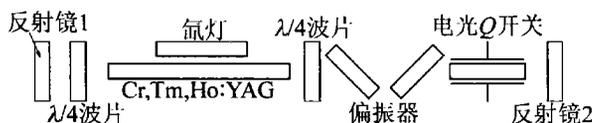


图5 电光调Q Cr, Tm, Ho:YAG 激光实验结构图

### 3 中红外 OPO 关键问题与发展趋势

近年来,由于非线性晶体和抽运光源的质量不断提高,OPO 获得了更大的输出功率和能量,转换效率也不断提高,中红外 OPO 获得了较大的发展,特别是 PPMgLN-OPO 和 ZGP-OPO,已成为中红外可调谐输出的主要器件。虽然目前实用化 OPO 的输出功率能够达到几十瓦,但仍然有较大的提升空间,输出光束质量、频宽和工作模式等还需要改善。

(1) 高质量非线性晶体是 OPO 发展的关键。加强国内非线性晶体生长研究,提高 ZGP 的品质,研发大孔径准相位匹配等新型晶体;加强中红外波段镀膜工艺研究;缩短材料及器件上与国外的差距,为发展自主 OPO 产品奠定基础。

(2) 确立结构紧凑的全固态 OPO 下一步的发展目标,这有利于降低抽运阈值、提高转换效率,获得好的系统稳定性和可靠性,拓展新的应用范围。

(3) 目前已有近红外波段的商用 OPO 产品,但更长波长的中红外 OPO 商用产品很少,这是由于目前可用商用抽运光源多在 1 $\mu$ m 波段和非线性晶体的限制。因此,需要发展其它波长范围内输出的装置,以拓展中红外可调谐范围。

(4) 光纤激光抽运的、半导体抽运的 2 $\mu$ m ~ 3 $\mu$ m 固体激光抽运 OPO 技术还需要深入研究,特别是高重

复频率、高能量脉冲抽运 OPO 技术,拓展 OPO 的远程作用能力。

(5) 单频 OPO 不仅具有激光输出,而且具有优异的光束质量、高功率(数瓦)和连续调谐等性能的 OPO,将成为下一步努力的方向,提高 OPO 应用系统的分辨率和灵敏度。

(6) 设计新型双共振谐振腔,发展闭环伺服锁定技术,降低震动、温度的影响,实现双共振信号光和闲频光的同时振荡稳定工作和快调谐。

(7) 发展飞秒超短脉冲 OPO 中红外宽调谐输出,为研究材料能带跃迁、光动力学、能量转移等动力学问题提供重要手段。

### 参 考 文 献

- [1] TITTLE F K, RICHTER D, FRIED A. Mid-infrared laser applications in spectroscopy [C]//Solid-state Mid-infrared Laser Sources. Berlin: Springer-Verlag Berlin, 2003:445-510.
- [2] EBRAHIM-ZADEH M. Mid-infrared optical parametric oscillators and applications [C]//Mid-infrared Coherent Sources and Applications. Dordrecht, Holland, Springer, 2008:347-375.
- [3] VODOPYANOV K L. Pulsed mid-IR optical parametric oscillators [C]//Solid-state Mid-infrared Laser Sources. Berlin, Holland: Springer-Verlag Berlin, 2003:144-183.
- [4] SUHRE D R, SINGH N B, BALAKRISHNA V, *et al.* Improved crystal quality and harmonic generation in GaSe doped with indium [J]. Optics Letters, 1997, 22(11):775-777.
- [5] VODOPYANOV K L, CHAZAPIS V. Extra-wide tuning range optical parametric generator [J]. Optics Communications, 1997, 135(1/3):98-102.
- [6] VANYAKIN A V, ZHELEZNOV V I, KULEVSKII L A, *et al.* Interference optics for lasers and parametric oscillators emitting in the middle-IR range [J]. Quantum Electronics, 1997, 27(2):137-139.
- [7] KULEVSKY L. Optical parametric oscillator on GaSe crystal pumped by a 3 micron erbium laser [R]. Moscow: General Physics Institute, 1998:1-19.
- [8] VODOPYANOV K L, LEVI O, KUO P S, *et al.* Optical parametric oscillator based on orientation-patterned GaAs [C]//Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies IX. Bellingham, USA: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2005:129-135.
- [9] DONG X L, ZHANG B T, HE J L, *et al.* High-power 1.5 and 3.4  $\mu$ m intracavity KTA OPO driven by a diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. Optics Communications, 2009, 282(8):1668-1670.
- [10] MIAO J G, PENG J Y, WANG B S, *et al.* Compact KTA-based intracavity optical parametric oscillator driven by a passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. Applied Optics, 2008, 47(23):4287-4291.
- [11] REGHUNATH A T, PURNIMA M, YOGESH K, *et al.* Design of a tunable mid-IR OPO source for DIAL detection of trace gases [C]//Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XII. Bellingham, USA: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2006: 64091B/1-64091B/11.
- [12] WU R F, LAI K S, WONG H F, *et al.* Multiwatt mid-IR output from a Nd:YALO laser pumped intracavity KTA OPO [J]. Optics Express, 2001, 8(13):694-698.
- [13] WANG B, REN G, LI T, *et al.* Experimental study of a kalium tita-

- nyl arsenate optical parametric oscillator in the mid-infrared band [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3):225-227 (in Chinese).
- [14] ZHONG K, LI J S, CUI H X, *et al.* Low threshold and high conversion efficiency nanosecond mid-infrared KTA OPO [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(12):124213/1-124213/4.
- [15] ZHANG X B, YAO B Q, JU Y L, *et al.* A 2.048 $\mu\text{m}$  Tm, Ho:GdVO<sub>4</sub> laser pumped doubly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(7):1953-1954.
- [16] MASON P D, WOOD N J. A high repetition-rate PPLN mid-infrared optical parametric oscillator source [C]//*Solid State Laser Technologies and Femtosecond Phenomena*. Bellingham, USA: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2004:308-317.
- [17] LIN X C, KONG Y P, ZHANG Y, *et al.* Mid-infrared generation based on a periodically poled LiNbO<sub>3</sub> optical parametric oscillator [J]. *Chinese Physics*, 2004, 13(7):1042-1045 (in Chinese).
- [18] HERPEN M VAN, LI S, BISSON S E, *et al.* Tuning and stability of a continuous-wave mid-infrared high-power single resonant optical parametric oscillator [J]. *Applied Physics*, 2002, B75(2/3):329-333.
- [19] WAN Y, LAN G, SU X Zh, *et al.* High energy output complex cavity pump optical parametric oscillator in the mid infrared [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4):340-342 (in Chinese).
- [20] PENG Y F, WANG W M, LIU D, *et al.* High efficiency PPMgLN optical parametric oscillator infrared laser with 62W output power [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3):613-616 (in Chinese).
- [21] WEI X B, PENG Y F, WANG W M, *et al.* High-power MgO:PPLN optical parametric oscillator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5):1447-1450 (in Chinese).
- [22] PENG Y F. High-efficiency mid-infrared tunable laser [J]. *Annual Report of China Academy of Engineering Physics*, 2009(1):153-154 (in Chinese).
- [23] YANG D Zh, JIANG P P, CHEN T, *et al.* PPMgLN-based high power optical parametric oscillator pumped by a pulsed fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1):34-37 (in Chinese).
- [24] XIONG B, ZHANG S B, GUO L, *et al.* Period continuous tuning of an efficient mid-infrared optical parametric oscillator based on a fan-out periodically poled MgO-doped lithium niobate [J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27(1):1-4.
- [25] WU B, KONG J, SHEN Y H. High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN-based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2W at 3.82 $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8):1118-1120.
- [26] XIE G, PENG Y F, WANG W M, *et al.* High-power mid-infrared 3.8 $\mu\text{m}$  laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(7):970-972 (in Chinese).
- [27] CAI Sh Sh, WU B, SHEN Y H. Tunable mid-infrared parametric oscillator based on PPMgLN [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2):160-162 (in Chinese).
- [28] WANG T J, ZHANG H Z, WU F G, *et al.* 3 $\mu\text{m}$  ~ 5 $\mu\text{m}$  AgGaS<sub>2</sub> optical parametric oscillator with prism cavity [J]. *Laser Physics*, 2009, 19(3):377-380.
- [29] VODOPYANOV K L, MAFFETONE J, ZWIEBACK I, *et al.* The longest wavelength OPO pumped by a 1 $\mu\text{m}$  laser [C]//*Infrared Applications of Semiconductors III*. Warrendale, USA: Materials Research Society, 2000:165-168.
- [30] BOON P P, FEN W R, CHONG C T, *et al.* Nanosecond AgGaS<sub>2</sub> optical parametric oscillator with more than 4 micron output [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1997, 36(12B):L1661-L1664.
- [31] MARZENELL S, BEIGANG R, WALLENSTEIN R. Synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator based on AgGaSe<sub>2</sub> tunable from 2 $\mu\text{m}$  to 8 $\mu\text{m}$  [J]. *Applied Physics*, 1999, B69(5/6):423-428.
- [32] RAFFY J, DEBUISSCHERT T, POCHOLLE J P, *et al.* An AgGaSe<sub>2</sub> optical parametric oscillator pumped by an LiNbO<sub>3</sub> OPO [J]. *Annales De Physique*, 1995, 20(2):75-76.
- [33] ECKARDT R C, FAN Y X, BYER R L, *et al.* Broadly tunable infrared parametric oscillator using AgGaSe<sub>2</sub> [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(11):608-610.
- [34] TIAN W, REN G, CAI B W, *et al.* Calculation and analysis of ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1):104-106 (in Chinese).
- [35] ZHU G L, JU Y L, WANG T H, *et al.* A mid-IR 14.1W ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator pumped by a Tm, Ho:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(3):034208/1-034218/2.
- [36] YAO B Q, JU Y L, WANG Y Z, *et al.* Performance evaluation of ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator pumped by a Q-switched Tm, Ho:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(1):68-70.
- [37] NIEUWENHUIS A F, LEE C J, VANDERSLOT P J M, *et al.* A Cr, Tm, Ho:YAG laser pumped ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator for mid-infrared spectroscopy [C]//*Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications VI*. Bellingham, USA: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2008:G8751.
- [38] CREEDEN D, KETTERIDGE P A, BUDNI P A, *et al.* Mid-infrared ZnGeP<sub>2</sub> parametric oscillator directly pumped by a pulsed 2 $\mu\text{m}$  Tm-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4):315-317.
- [39] MIYAMOTO K, ITO H. Wavelength-agile mid-infrared (5 $\mu\text{m}$  ~ 10 $\mu\text{m}$ ) generation using a galvano-controlled KTiOPO<sub>4</sub> optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(3):274-276.
- [40] ELDER I. High average power thulium fibre laser pumped mid-IR source [C]//*Technologies for Optical Countermeasures IV*. Bellingham, USA: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2007:73804.
- [41] VODOPYANOV K L, SCHUNEMANN P G. Broadly tunable non-critically phase-matched ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator with a 2 $\mu\text{J}$  pump threshold [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(6):441-443.