

# 基于 PPLN 的中红外 CW QPM - OPO 技术发展综述

张兴宝, 王月珠, 姚宝权, 鞠有伦, 陈德应

(哈尔滨工业大学光电子研究所, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 光学参量振荡器(OPO)是利用非线性晶体的混频特性实现频率变换器件,是获得可调谐相干光的有效途径之一。准相位匹配(QPM)OPO产生的红外波段光在红外军事对抗、大气环境监测、医学、特殊环境远距离监控以及光谱学研究等诸多领域有重要的应用价值。而连续(CW)周期性极化铌酸锂(PPLN)OPO是3—5 $\mu\text{m}$ 中红外大功率连续激光源的最佳选择。本文阐述了QPM技术的原理和特点,综述了中红外CW OPO的发展状况,重点放在CW PPLN OPO技术的发展上,并指出了其发展趋势及应用前景。

**关键词:** CW OPO; 准相位匹配(QPM); 周期性极化铌酸锂(PPLN); 中红外激光

**中图分类号:** TN21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253 - 2743(2005)06 - 0007 - 03

## Development of mid - infrared CW QPM - OPO based on PPLN

ZHANG Xing - bao, WANG Yue - zhu, YAO Bao - quan, JU You - lun, CHENG De - yin

(Institute of Opto - Electronics, Harbin University of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Optical parametric oscillators(OPO) can realize frequency transformation with its mixing frequency properly of nonlinear crystal, which is one of available effective approach to obtain tuned coherent light. Infrared light generated by QPM OPO has significant application in infrared military countermeasures, atmospheric environment detection, medicine, spectroscopy, laser radar and remote sensing. Moreover CW PPLN OPO is the best choice for high power mid - infrared CW laser sources in the range of 3 - 5 $\mu\text{m}$ . In the paper, principles and characteristic of QPM are introduced and discussed, important recent advances of CW OPO are summarized, with emphasis on CW PPLN OPO and its application prospect.

**Key words:** CW OPO; quasi - phase matching(QPM); periodically polarization lithium niobate(PPLN); mid - infrared laser

## 1 引言

光学参量振荡器(OPO)作为一种可调谐、高相干光源能实现传统激光所达不到的光波辐射而引起人们广泛的兴趣。OPO以其宽调谐范围、高效率、高功率、高重复频率及小型固体化等特点在激光雷达、激光测距、大气污染检测及光电对抗等领域中显示出越来越广泛的应用前景。在近四十年发展中,随着一些新型而高效的非线性晶体的出现及发展,OPO相继实现了从紫外到远红外的全波段调谐、从连续(CW)到超快飞秒的整个时间谱范围运转。

OPO有效运转,不仅取决于泵浦光的光束质量及光谱特性,而且也和非线性晶体材料有关。从1965年Gordmaine和Miller设计出第一个OPO原型以来<sup>[1]</sup>,由于缺少合适泵浦光源和良好光学特性及高损伤阈值的非线性晶体材料而阻止了OPO实际应用的发展。1965—1975年是可调谐相干辐射源的重要发展阶段。结果,OPO研究长期停滞了近20年,直到1980年,新出现的非线性光学晶体如,BBO、LBO、KTP、KTA、Mg:LiNbO<sub>3</sub>、AgGaSe、AgGaS、CdSe、ZnGeP<sub>2</sub><sup>[2]</sup>等,其中高损伤阈值和较高的非线性光学特性,促使OPO进入实用阶段。光谱和空间特性改善了的高功率泵浦的大功率输出的OPO器件得到成功验证。最近,新发展起来的周期极化晶体材料,如PPLN<sup>[3,4]</sup>,使OPO实现低阈值运转,具有可充分利用商业化的激光泵浦源的优势,为OPO的发展提供了更广阔的应用前景。准相位匹配(QPM)技术理论的出现使OPO进入了全新的发展阶段。

## 2 中红外 CW OPO 技术

由于连续波泵浦时的非线性增益非常低,所以不同类型的OPO设计证明: CW OPO发展比脉冲和同步泵浦OPO发展

更困难,当然,在纳秒和超快OPO中,已经很容易达到泵浦阈值实现单共振(SRO)运转。利用传统的双折射材料和CW激光光源不能实现CW SRO OPO低阈值运转。为克服高的CW SRO阈值,基于谐振设计的CW OPO的多种技术得到了发展<sup>[6]</sup>,包括传统的双共振(DRO)和其他新颖的谐振腔设计如内腔单共振(IC-SRO)、泵浦增强单共振(PE-SRO)和三共振(TRO)。图1所示。这些技术成功地降低了CW OPO的阈值,从SRO的几十瓦到TRO的几十毫瓦。所以可用于CW OPO的非线性晶体材料和泵浦源范围得以拓宽。另外,多程谐振对OPO机械稳定性和泵浦源频率稳定性提出了更高的要求。所以实用化的CW OPO一般要求主动稳频技术、光谱可调谐和功率稳定性控制技术,以及单频激光源。

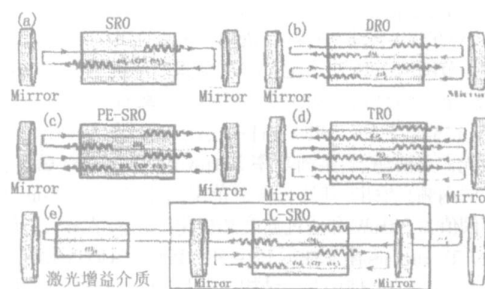


图1 多种谐振形式

### 2.1 CW KTP OPO

随着新的双折射和周期极化非线性材料的发展以及谐振腔和泵浦技术上的创新和高功率稳定的固体激光器的出现,CW OPO在过去几十年得到了实质性的发展。结合非临界相位匹配(NCPM)技术,透射窗口达到5 $\mu\text{m}$ 的晶体材料和适宜的非线性系数,实现大于2 $\mu\text{m}$ 的红外光谱范围的OPO设计。KTP双折射材料和它的同形体KTA及RTA是很有前途的中红外CW OPO材料。利用IC-SRO谐振类型和Ti:sapphire激光泵浦,基于KTP和KTA的CW OPO实现中红外1.46W总功率输出,2.4—2.9 $\mu\text{m}$ 的闲频光输出功率为

收稿日期:2004 - 04 - 05

作者简介:张兴宝,女,哈尔滨工业大学物理电子学博士研究生。

840mW<sup>[7]</sup>。采用 TRO 和 PE-SRO 形式,利用半导体 LD 为泵浦源,CW KTP OPO 实现低阈值运转<sup>[8]</sup>。在 800nm GaAlAs LD 泵浦时,基于 NCPM 的 KTP 和 RTA OPO 泵浦功率阈值小于 200mW 和通过 LD 的调谐实现中红外 2.1 - 2.7 $\mu$ m 调谐。由于缺少 KTP、RTA、KTA 重要的温度调谐,基于这些材料的 CW OPO 在 NCPM 时波长调谐主要通过静态泵浦调谐获得。所以 KTP CW OPO 的中红外光谱覆盖范围只能达到 3.5 $\mu$ m。

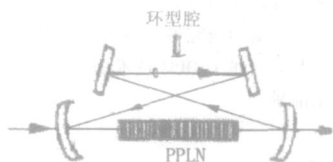


图2 OPO 环形腔和输出特性

## 2.2 CW PNLN OPO

中红外 CW OPO 更重要的进展,体现在周期极化材料的发展上。尤其,高非线性系数的 PNLN 晶体和长的相互作用长度的出现,使 OPO 利用传统的连续固体激光源达到 CW SRO 阈值,获得前所未有的功率水平和转换效率。Bosenberg 于 96 年首次报道了大功率中红外 PNLN OPO,实验装置如图 2。高功率 LD 泵浦的 Nd:YAG 激光抽运 50mm 长的 PNLN 晶体,在泵浦功率 13.5W 时,中红外 3.25 - 3.95 $\mu$ m CW SRO 输出功率达到 3.6W<sup>[9]</sup>。通过温度调谐或晶体不同的极化周期进行波长调谐,还可选择扇形极化 PNLN 晶体来调谐<sup>[10]</sup>。Van Herpen 也使用环形腔结构实现了 2.9 $\mu$ m 最大 3W 和 3.9 $\mu$ m 的 1.2W 输出<sup>[11,14]</sup>。随着 PNLN 的出现,外腔泵浦形式的 CW SRO OPO 也扩展到被高功率 LD 直接泵浦<sup>[13]</sup>。925nm InGaAs 振-放激光系统抽运 38mm 长的 PNLN 晶体,在泵浦功率 2.5W 时,实现 1.7W 的 SRO 阈值和在 2.03 - 2.29 $\mu$ m 波段 480mW 的功率输出,同步泵浦调谐和腔长扫描实现连续单频宽调谐。最近,高功率光纤激光器被成功的应用到 SRO CW PNLN 中<sup>[15]</sup>。在 1.031 - 1.11 $\mu$ m 可调谐 8.3W 的 Yb 掺杂 CW 光纤激光泵浦 40mm 长的 PNLN 晶体,实现中红外闲频光 1.9W 功率输出,2.98 - 3.7 $\mu$ m 光谱覆盖范围 3.5W 的 SRO 阈值。

同时,结合 PNLN 使用内腔泵浦设计,利用商用的低功率二极管泵浦的固体激光器(DPSSL),首次实现 CW SRO 低阈值运转<sup>[16]</sup>。1W 的 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 实现 70mW 的中红外输出功率,光谱覆盖范围从 3.16 到 4.02 $\mu$ m,LD 泵浦功率阈值为 310mW,简单、紧凑、全固态的 IC-SRO 设计得到成功验证。基于 PNLN 的 CW OPO 也能够 PE-SRO 设计中实现。LD 泵浦单频微型 Nd:YAG 激光作泵浦源,当泵浦功率 800mW 时,PE-SRO OPO 获得 140mW 的闲频光输出,其波长覆盖范围从 2.29 到 2.96 $\mu$ m,外泵浦功率阈值为 250mW 和通过温度和极化周期调谐波长。最近,CW 单频 Ti:sapphire 激光抽运 PE-SRO PNLN OPO 调谐范围从 4.07 到 5.26 $\mu$ m<sup>[17]</sup>。使用双腔结构,证明了单频闲频光模跳自由调谐范围为 10.8G,泵浦光精细调谐范围为 12.3GHz。

利用 PNLN 高的非线性系数和大尺寸特性,单管半导体 LD 可以直接泵浦 PE-SRO OPO。810nm 单模扩展腔 AlGaAs 激光泵浦 50mm 长的晶体,获得 OPO 功率阈值仅仅为 25 ~ 30mW,该设计能够提供单向的 4mW 闲频光功率,调谐范围从 2.58 到 3.44 $\mu$ m。文献<sup>[18]</sup>使用 DRO 腔,类似的证明了 CW PNLN OPO 被单管 LD 泵浦。这些文献给出泵浦功率低于 20mW 和产生中红外输出达到 5mW,光谱覆盖从 2.2 到 3.7 $\mu$ m。值得注意的是,Ti:sapphire、Nd:YAG 和 LD 直接泵浦的 CW PNLN OPO 连续调谐范围从 1.5 到 5 $\mu$ m。材料对超过 5 $\mu$ m 光吸收增强。所以选择合适的 OPO 腔镜和晶体膜系,结合单极化周期 PNLN 晶体,使用一种设计就可实现整个投射窗范围内调谐。

目前,PNLN OPO 发展到能够产生实用化的中红外功率水平的宽调谐,稳定的,单频辐射。但是,PNLN 的有效频率控制和功率稳定性和在 SRO 腔中的高强度泵浦机制都受到光折变效应、热相位失配以及绿光吸收的影响,所以设计 PNLN OPO 时要考虑这些效应。周期极化 KTP,由于没有上述效应或者很弱,其透过范围大于 5 $\mu$ m 和低的极化矫顽电场等特点使其成为中红外 CW OPO 最佳候选材料,然而,短的相互作用长度(小于 20mm)和低的有效非线性系数使他的功率阈值比 PNLN 高。以至于采用外腔泵浦形式甚至于使用高功率激光泵浦源也不能实现其 SRO OPO 运转,所以适于这些材料的中红外 CW OPO 发展的更可行的方案是采用 DRO、PE-SRO 和 IC-SRO 谐振形式<sup>[19]</sup>。目前,由于缺少重要的温度调节和不同光栅周期有限的数值孔径,所以与 PNLN 相比,周期极化 KTP 材料的调谐能力有限。但是,极化和微机械加工技术的不断进步为基于这些材料的稳定宽调谐 CW OPO 的发展铺平了道路。CW OPO 产生平均输出功率达到 4W 和波长大于 5 $\mu$ m。同时,更新的泵浦设计,新颖的腔设计和谐振结构使阈值大大降低,使得在二极管泵浦的固体激光器(DPSSL)、半导体和光纤激光等泵浦源范围内的 CW OPO 运转更可行。

商品化的 PNLN OPO。97 年美国 Aculight 公司首次推出脉冲 PNLN-OPO 产品<sup>[20]</sup>。德国 ELS 公司于 2004 年最新报道了关于高功率连续单频中红外 OPO (2 - 5 $\mu$ m) (Spectro Star),在 2.954 $\mu$ m 最大输出功率达 3W<sup>[21]</sup>。

在国内,南京大学最早开展光学超晶格材料 PNLN、PLT 的研究,也开展了 PNLN 准相位匹配用于倍频、OPO 方面的研究工作。南京大学也利用 QPM 技术在准周期极化晶体 LiTaO<sub>3</sub> 上实现 SHG 和 SFG 的耦合,获得高次谐波输出。准周期极化材料的采用使操作和调试过程简化。南京大学闵乃本等人利用厚度 1.5mm、极化周期为 8.3 $\mu$ m 的 PNLN 晶体,将室温下输出波长为 810nm 的多模激光二极管的红光直接倍频为蓝光,实现三阶准相位匹配,转换效率为 0.14%。他们还在输出波长为 826.3nm,脉宽为 8ns,重复频率为 10Hz 的脉冲染料激光为基波光源,在周期为 10.5 $\mu$ m 的 PLT 中实现了三阶准相位匹配,获得了 431.3nm 的蓝光倍频输出,转换效率达到 5.7%。天津大学采用准连续泵浦(QCW)的全固态 YAG 激光器泵浦 PNLN OPO,获得调谐输出波长为 1.48 - 1.54 $\mu$ m,输出波长线宽为 0.8nm,重复频率为 1 - 19kHz,平均输出功率大于 140mW<sup>[22]</sup>。山西大学对脉冲 QPM OPO 的输出光波的强度噪声进行了研究<sup>[23]</sup>。2004 年中科院物理所使用 LD 泵浦的调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光作泵浦源,PNLN OPO 获得 6.5mW 低阈值,3.14 $\mu$ m 最大输出功率为 466mW<sup>[24]</sup>。而有关 CW PNLN OPO 研究未见报道。

## 3 准相位匹配(QPM)<sup>[5,6]</sup>与双折射相位匹配(BPM)相比较

双折射相位匹配(BPM)是利用非线性晶体的双折射和色散特性,通过选择光波波矢方向和偏振方向来使相位失配量为零。而 QPM 就是通过调节晶体的极化周期来补偿由于折射率色散而产生的波矢失配。一维极化铁电晶体即周期极化晶体结构。PNLN 的相邻两片畴结构的自发极化矢量是反向平行,所以与一阶张量相联系的铁电畴物理性质,如非线性系数不再是常数而是周期变化的。正负畴的厚度为超晶格的周期。人为的改变 PNLN 的自发极化方向来补偿相位失配可以实现整个晶体内的转换效率持续增长。BPM 只能实现波矢垂直的相位匹配方式,如  $e+e \rightarrow o, e+o \rightarrow e$ 。与 BPM 相比,QPM 没有 BPM 中的关于波矢方向和偏振方向的限制,通过选择合适的极化周期,就可以实

现 BPM 不能实现的相位匹配,如波矢平行的相位匹配方式  $\mathbf{e} + \mathbf{e} = \mathbf{e}_p + \mathbf{e}_o$ 。进而可以充分利用 PNLN 最大有效非线性系数  $d_{33} = 27.2 \text{ pm/V}$ 。而且利用三波矢平行匹配方式,可以使走离角为零。不存在走离效应就降低了对入射角的要求,泵光和参量光能有效匹配,可以使用大尺寸的晶体,获得大的转换效率。另外,QPM 是人为的周期调制晶体结构,不改变材料的内在属性。所以理论上不能实现 BPM 的晶体也可在其整个透射窗内实现 QPM。除了上述优点,QPM 还能设计为非临界相位匹配(NCPM)方式;具有调谐方式简单、灵活多样;非线性转换效率高特点。QPM 技术拓宽了非线性晶体的应用范围,增加了调谐方式,在宽调谐相干光源的研究中显示了广泛的应用前景。所以采用 QPM 技术的 PNLN OPO 相对传统的 BPM 的 OPO 有诸多优点:(1)相互作用距离超过 50mm,提高了转换效率;(2)低阈值运转;(3)温度和极化周期相结合的调谐方式;(4)无双折射走离效应,无须调整腔内光学元件,因而操作简便;(5)适合连续和脉冲 DPSSL 激光泵浦,OPO 器件可小型化。基于上述特点可知,PNLN OPO 是频率变换的理想的方法。

## 4 结束语

中红外 CW OPO 快速发展的关键在于最新的非线性材料的发展( $\text{GaAs}$ ,  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{AgGaSe}_2$ ,  $\text{ZnGeP}_2$ ),其替代了传统的非线性晶体。尤其是 PNLN、PPRTA 和其他的周期极化材料的出现以及双折射材料例如 KTP 和它的同形异构体对 CW OPO 的前进也有大的帮助;另一方面,由于材料存在吸收肩,因此研制中红外波长超过  $5 \mu\text{m}$  的 CW OPO 是很困难的,CW OPO 更进一步的发展取决于材料科学的新进展。一种实际重要的途径就是发展 QPM 技术和透明范围超过  $5 \mu\text{m}$  的好的非线性晶体,希望进一步提高非线性系数和 NCPM 能力,开发波长覆盖  $5 - 20 \mu\text{m}$  光谱区域的其他新的周期极化材料。其他最近研制出的中红外材料如  $\text{LiInS}_2$ ,其截止短波低于  $500 \text{ nm}$ ,为 Ti:sapphire 泵浦的  $5 - 10 \mu\text{m}$  飞秒脉冲的产生提供了可能的途径;另一个重要的因素是波长大于  $1 \mu\text{m}$  ( $\text{Cr:YAG}$   $\text{Cr:ZnSe}$ )的可调谐 CW 和锁模激光源的进展。这将通过消除泵浦吸收,结合更灵活 NCPM 设计,来实现几种现有材料( $\text{ZnGeP}_2$ ,  $\text{AgGaSe}_2$ )的双折射相位匹配的 CW OPO 和超快中红外 OPO。加上温度调谐或泵浦调谐,能够使 OPO 调谐波长大于  $5 \mu\text{m}$ 。通过降低泵浦光和产生的参量光子间的量子缺陷,使用长的泵浦波长可以获得更高的中红外输出功率效率;另一个很有潜力的方法是使用双 OPO 技术,即使用两个 OPO 串联。第一个 OPO 产生的可调谐输出被使用到第二个基于传统材料的 OPO 相位匹配上以实现波长超过  $5 \mu\text{m}$ 。尽管这种技术利用高功率纳秒和飞秒泵浦源已经被证明,但是由于可利用的峰值强度太低,所以在皮秒和 CW OPO 中还没被实现;为了在 CW、皮秒和飞秒机制中获得一定的泵浦强度,一个办法就是使用内腔泵浦设计。为达到高临界泵浦强度,第二个 OPO 晶体放在第一个 OPO 腔内;其他的新涌现的中红外 OPO 器件包括基于传统的非线性晶体波导器件以及使用新颖的相位匹配技术的基于 GaAs 工艺的各项异性半导体。中红外 CW 和超快 OPO 的发展潜力很大,上述的不同技术和技巧的发展将继续为 OPO 进一步的发展铺平了道路。

目前,为获得  $3 - 5 \mu\text{m}$  中红外大功率激光,除了  $\text{ZnGeP}_2$  OPO 和  $\text{AgGaSe}_2$  OPO 外,PNLN OPO 是中红外 CW 大功率激光的最佳选择,而其他方法获得还很困难。在大气检测方面,

需要连续输出功率达到几百微瓦的窄线宽中红外稳定光源( $3 \mu\text{m}$  附近)。利用 PNLN 制成的红外 OPO 激光探测器,在室温下,产生  $2.16 - 2.32 \mu\text{m}$  连续可调谐红外激光,用以探测大气中的  $\text{CO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  等有毒、有害气体的含量,灵敏度非常高。在军事应用中 PNLN OPO 主要用于红外光电对抗干扰源,由高功率 LD 或 DPSSL 泵浦产生的中红外连续光是理想的中红外干扰源<sup>[25]</sup>。综上所述,CW PNLN OPO 具有大的军事和民用需求,已成为国内外研究的热点。如果能生长出大孔径的 PNLN 晶体,满足高功率泵浦的要求,CW PNLN OPO 将会在实用化、商品化等方面有大的飞跃。

## 参考文献

- [1] Gordmaine J A, Miller R C. *J. Phys. Rev. Lett.*, 1965, 14: 973 - 976.
- [2] Fernelius N C, Hopkins F K, Ohmer M. C. *J. SPIE*, 1999, 3793: 2 - 8.
- [3] Bosenberg W R, Drobshoff A, Alexander J I et al. *J. Opt. Lett.*, 1996, 21: 1336 - 1338.
- [4] Bosenberg W R, Drobshoff A, Alexander J I et al. *J. Opt. Lett.*, 1996, 21: 713 - 715.
- [5] Myer L E, Eckardt R C, Fejer M M et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, 12(11): 2102 - 2166.
- [6] Myer L E. *J. Proceeding of the IEEE*, 1996(2): 733 - 739.
- [7] Edwards T J, Turnbull G A, Dunn M H. *J. Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72: 1527 - 1529.
- [8] Scheidt M, Beier B, Boller K J et al. *J. Opt. Lett.*, 1997, 22: 1287 - 1289.
- [9] Bosenberg W R, Drobshoff A, Alexander J I et al. *J. Opt. Lett.*, 1996, 21: 1336 - 1338.
- [10] Powers P E, Kulp T J, Bisson S E. *J. Opt. Lett.*, 1998, 23: 159 - 161.
- [11] van Herpen M. M. J. W, Bisson S. E, Harren F. J. M. *J. Opt. Lett.*, 2003, 24: 2497 - 2499.
- [12] van Herpen M. M. J. W, S. te Lintel Hekkert, S. E. Bisson, F. J. M. Harren *J. Opt. Lett.*, 2002, 27: 640 - 642.
- [13] van Herpen M. M. J. W, Li S., Bisson S. E, S. te Lintel hekkert et al. *J. Appl. Phys.*, 2002, 93: 329 - 333.
- [14] van Herpen M. M. J. W, Bisson S. E, Ngai A. K. Y et al. *J. Applied Physics B: Laser and Optics*, 2004.
- [15] Gross P, Klein M E, Walde T et al. *J. Opt. Lett.*, 2002, 27: 418 - 420.
- [16] Stothard D J M, Ebrahinzadeh M, Dunn M H *J. Opt. Lett.*, 1998, 23: 1895 - 1897.
- [17] Turnbull G A, McGloin D, Lindsay I D et al. *Opt. Lett.*, 2000, 25: 341 - 343.
- [18] Henderson A J, Roper P M, Borschowa L A et al. *J. Opt. Lett.*, 2000, 25: 1264 - 1266.
- [19] Edwards T J, Turnbull G A, M. H. Dunn et al. *J. Opt. Exp.*, 2000, 6: 58 - 63.
- [20] Colville F G, McGuckin B T *J. Laser Focus World*, 1998, 34(11): 22 - 28.
- [21] <http://www.els.de/Products/SpectroStar.Html>.
- [22] Zhang Bai - Gang *J. Chin. Phys. Lett.*, 2003, 20(7): 1077 - 1080.
- [23] 李永民, 吴迎瑞, 张宽收等 *J. 物理学报*, 2003, 52(4): 849 - 852.
- [24] LIN Xue - Chun *J. Chin. Phys. Lett.*, 2004, 21(1): 98 - 100.
- [25] Myers L E, Bosenberg W R *J. IEEE J. Quantum Electron*, 1997, 33: 1663 - 1672.