

文章编号: 1001-3806(2013)02-0198-06

基于 PPLN 的中红外连续光学参变振荡器研究进展

秦雪飞 周卫东*

(浙江师范大学 信息光学研究所, 金华 321004)

摘要: 基于周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体和准相位匹配连续波光学参变振荡器可以在 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 中红外波段产生连续可调谐相干辐射,在大气环境污染监测、遥感、激光雷达、光谱分析以及军事红外对抗等领域具有很高的应用价值。介绍了基于 PPLN 晶体的中红外连续波光学参变振荡器近年来在高功率、低抽运阈值、宽调谐、窄线宽等方面的研究进展,并对基于 PPLN 晶体的连续波光学参变振荡器的优势特点及其涉及的一些技术方法展开讨论。目前基于 PPLN 的中红外连续波光学参变振荡器的研究主要集中在上述 4 个领域,随着抽运光源性能及非线性晶体制备水平不断提高,将向着更高功率、更低阈值、更宽调谐范围、更窄线宽的方向迈进。

关键词: 光学器件;非线性光学;中红外连续波;光学参变振荡器;周期性极化铌酸锂晶体;准相位匹配

中图分类号: TN21 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.015

Progress of mid-infrared continuous wave optical parameter oscillator technique based on PPLN crystal

QIN Xue-fei, ZHOU Wei-dong

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: Optical parameter oscillator (OPO) based on periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal and quasi phase matching (QPM) are suitable for generating continuous wave (CW) and tunable coherent radiation in mid-infrared wavelength range $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$, which has important applications in atmosphere pollution monitoring, remote sensing, laser radar, spectroscopy analysis, and military infrared countermeasure. The recent development and advantages of CW mid-infrared optical parameter oscillator based on PPLN crystal was introduced. Specifically, the progress of techniques to increase the output power, lower the pump threshold, widen the tunable range and narrow the linewidth was addressed. Currently, the researches of optical parameter oscillator based on PPLN crystal are focus on the four areas mentioned above. Along with the development of the pump laser and nonlinear crystal, it will make further progresses toward the direction of higher power, lower threshold, wider tuning range, and the narrower line width as well.

Key words: optical devices; nonlinear optics; mid-infrared continuous wave; optical parameter oscillator; periodically poled lithium niobate crystal; quasi phase matching

引言

波长为 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 的激光通常称为中红外激光,该激光波段位于大气的窗口波段,对大雾、粉尘等具有较强的穿透力,受气体分子吸收和悬浮颗粒散射影响小,在大气环境污染监测、遥感、激光雷达、光谱分析以及军事红外对抗等领域具有很高的应用

价值。光参变振荡(optical parametric oscillator, OPO)产生的中红外波段激光,具有调谐范围宽、效率高、结构简单紧凑及低阈值等优点,可以有效地将激光拓宽到新的中红外波段。近年来,随着非线性光学材料和激光技术的飞速发展,出现了许多新型优质非线性光学晶体和抽运光源。中红外波段镀膜技术日趋成熟,对光参变振荡器的研究越来越深入,也开始出现了商品化的可调谐 OPO 激光。通过光参变振荡和差频等非线性频率变换技术实现中红外相干辐射,在各领域具有广泛的应用前景,展现出了越来越重要的研究价值。

光参变振荡器是一种利用非线性晶体的混频特性实现光学频率变换的器件。光参变振荡器中,频率为 ω_p 的激光抽运非线性晶体,由于晶体中的光学非线性

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61178034);浙江省自然科学基金资助项目(Y1100268);浙江省高校重大科技攻关资助项目(ZD2009006);浙江师范大学创新团队资助项目

作者简介: 秦雪飞(1984-),男,硕士研究生,主要从事中红外激光技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wdzhou@zjnu.edu.cn

收稿日期: 2012-07-23; 收到修改稿日期: 2012-08-02

效应 抽运光被转换成两个新的低频光波,其中较高频率(ω_s)的光被称为信号光,而另一频率(ω_i)的光则被称为闲置抽运光。抽运光、信号光与闲置光的频率满足能量守恒条件: $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ 。与此同时,为了获得高的非线性频率转换效率,在非线晶体内,三波之间还需要符合特定的相位匹配条件,即三波之间的相位失配量 $\Delta k = n_p \omega_p - n_s \omega_s - n_i \omega_i = 0$,这里 n_p 、 n_s 和 n_i 分别为抽运光、信号光和闲置光的折射率。相位匹配条件的实现最初都是利用非线性晶体的双折射和色散特性,通过选择不同组合的光波波矢方向和偏振方向来使相位失配量为 0,常称为双折射相位匹配(birefringent phase matching, BPM)或角度匹配。另一种实现相位匹配的方式——准相位匹配(quasi phase matching, QPM)则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。

伴随着激光器的出现,很快就有了采用 BPM 方式运行的脉冲和连续 OPO。1965 年,GIORDMAINE 和 MILLER^[1]成功研制出了世界上第 1 台基于 LiNbO₃ 晶体、波长 529nm 的 CaWO₄:Nd³⁺ 脉冲激光器抽运的 OPO。SMITH^[2]和 BYER^[3]等人在 1968 年成功地获得连续运转的 OPO。尽管早在 1962 年,ARMSTRONG 与 BLOEMBERGEN 等人^[4]在建立非线性光学理论基础的同时,就已经提出了准相位匹配的概念,但受到非线性光学材料性能和材料制备的制约,直到 1996 年,世界上才首次出现了周期性极化的(periodically poled lithium niobate, PPLN)晶体以及以其为工作介质的准相位匹配光参变振荡器。基于周期性极化非线性晶体和准相位匹配的光参变振荡器可利用材料较大的非线性系数,且没有光走离效应和匹配角限制,参变光相互作用距离长,具有低阈值、高转换效率等优点,非常有利于连续波光参变振荡器的运行。在 PPLN 晶体研制后,很快出现了采用工作介质的连续光参变振荡器。它的出现,立即引起了广泛的关注和重视,相关研究得到了快速发展。图 1 和图 2 为两种最典型的中红外光学参变振荡器光路图:一种为结构简单的两镜驻波腔结构;另一种为四镜环形行波腔结构。抽运激光经光隔离器,然后通过半波片调整抽运光偏振方向,再经过两反镜及透镜聚焦到腔中,产生的闲频光经锗片滤波后通过红外光功率计探测。行波腔较驻波腔稳定性好,且环形腔容易引入标准具或注入种子信号光,达到稳频和降低阈值的目的。本文中详细介绍基于 PPLN 晶体的连续波(continuous wave, CW)中红外光参变振荡器在高功率、窄线宽、低阈值、宽调谐方面的最新研究进展。

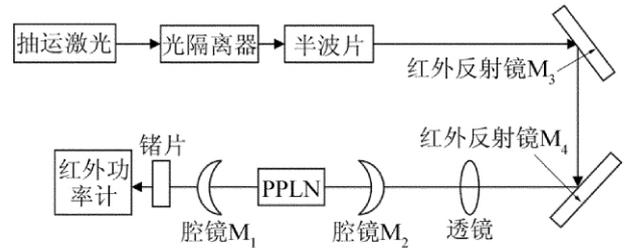


图 1 中红外光学参变振荡器典型两镜腔结构

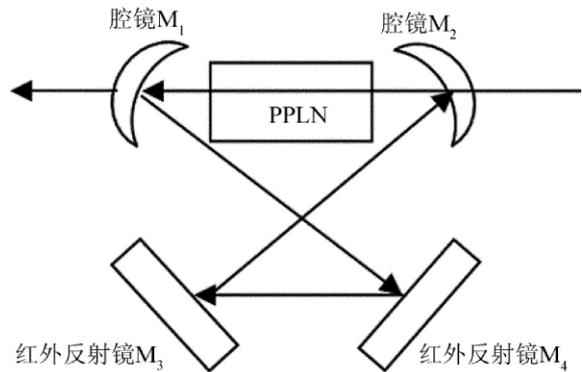


图 2 中红外光学参变振荡器典型的四镜环形腔结构

1 高功率 PPLN 光参变振荡器

与脉冲光方式运行的光参变振荡器相比,连续波光参变振荡器的振荡阈值更高、转换效率低,一直发展缓慢。高效率低阈值的 PPLN 晶体的出现,极大地促进了高功率中红外连续 OPO 激光技术的发展。1996 年出现了第 1 台以 PPLN 晶体为工作介质的 QPM CW OPO, MYERS 和 BYER^[5]用四镜 OPO 的腔结构,采用 1064nm 的 Nd:YAG 抽运激光器,在波长 3.3 μm ~ 3.9 μm 范围内,获得功率大于 1W 的连续输出。

实现 CW OPO 高功率输出通常的做法是提高抽运功率,并采用较长的非线性晶体。受制备工艺的限制,晶体不可能做得很长,同时晶体长度越长对光路调整精度要求很高,选用大功率激光作为抽运源成为主要手段,特别是采用大功率光纤激光器。

由于有些非线性晶体内部存在大量的本征缺陷,在强光作用下,本征缺陷对电荷输运过程的促进作用,使得非线性晶体具有较强的光折变效应。降低非线性晶体光折变效应的方法主要以高温法与掺杂法为主。高温法是将晶体工作温度控制在 120 $^{\circ}\text{C}$ 以上,使晶体的光折变效应得到有效降低,缺点是加热会改变之前的相位匹配点,对输出稳定性也有一定影响。掺杂法是在非线性晶体生长过程中掺入适量特定的金属阳离子,来提高晶体的抗光损伤阈值,典型如掺 Mg²⁺ 的 LiNbO₃ 晶体(MgO:PPLN),目前在 CW OPO 中得到了普遍使用。采用透镜或透镜组合聚焦的方法增加抽运光的功率密度,也可以获得较强的参量光输出,但是如

果聚焦的光斑面积过小,会增大光束的发散角,超出相位匹配角所允许的范围,导致转换效率降低。此外,聚焦过强容易损伤晶体本身以及腔镜的镀膜。所以,需要结合共聚焦条件数值计算,选择合适腔长和透镜焦距,使得抽运光与腔的最佳模式匹配,从而获得最佳的高功率输出。在第1台连续波PPLN OPO出现不久后,MYERS等人^[6]使PPLN晶体温度工作在120℃,以克服光折变效应的影响,在空闲光波长 $3.3\mu\text{m}$ 处把光的输出功率提高到大于2.5W,阈值小于3W,采用晶格周期 $28\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$ 的PPLN晶体,并通过调谐温度和晶格周期达到准相位匹配,获得 $1.46\mu\text{m}\sim 1.62\mu\text{m}$ 的信号光和 $3.11\mu\text{m}\sim 3.95\mu\text{m}$ 的空闲光连续单模宽调谐红外光输出。

为获得高功率输出,还需考虑热效应影响。轻微的空闲光吸收,会在非线性晶体MgO:PPLN中产生热透镜效应,引起相位失配,降低了CW OPO参量光输出性能,因此高功率中红外CW OPO大都采用单谐振腔。此外,在单谐振稳定激光腔长和腔模频率,有利于改善热效应的影响^[7]。2005年,CHEN等人^[8]采用四镜单谐振腔和掺杂MgO质量分数为0.05的PPLN晶体,通过如图3所示50W的光纤激光抽运获得空闲波长 $3\mu\text{m}$ 功率10W(接近衍射极限)的稳定连续输出。2007年,SAMANTA等人^[9]用简单的单谐振腔(singly resonant oscillator, SRO)和掺杂MgO周期性极化化学计量比钽酸锂晶体,获得连续波高功率宽调谐输出,激光波长 $848\text{nm}\sim 1430\text{nm}$ 范围的连续波输出,实验抽运阈值为2.88W,在6W抽运功率下获得1.51W单频空闲抽运光输出。2009年,DAS等人^[10]用单谐振腔结构,通过波长为1060nm、带宽较宽的连续掺镱光纤激光抽运,长度50mm的MgO:PPLN非线性晶体,在抽运功率为25.5W的时候获得了5.3W的空闲光输出,且输出的参量光呈高斯分布。这里的信号光振荡在SRO的腔模频率,线宽较宽的抽运源通过能量守恒直接转换产生宽带空闲光,缺点是需要很高的抽运增益和克服窄相位匹配限制。2010年,ZHAO等人^[11]报道的连续波外腔单谐振光参变振荡器,采用掺杂质量分数为0.05MgO的MgO:PPLN晶体,以及中心波长1064.7nm的掺镱光纤激光器做抽运源,获得了 $2.9\mu\text{m}\sim 4.1\mu\text{m}$ 宽范围的空闲抽运光输出,当抽运功率为15W时,获得空闲波长 $3.03\mu\text{m}$ 时的功率为7.54W(抽运阈值2W)和空闲波长 $4.05\mu\text{m}$ 时的功率为1.04W(抽运阈值7W)。2010年,HENDERSON等人^[12]使用了功率更高的30W光纤激光抽运,结合高损伤阈值的MgO:PPLN晶体,获得了16.8W波长

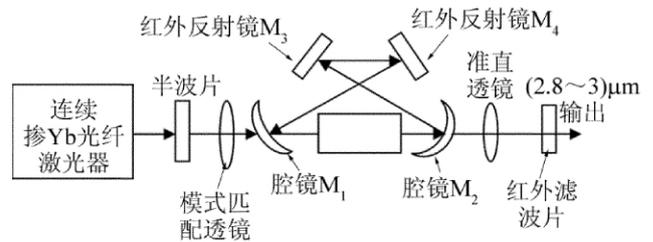


图3 CW Yb 光纤激光抽运的 OPO^[8]

1.5 μm 6.2W 波长 $3.6\mu\text{m}$,10W 波长 $1.96\mu\text{m}$,以及8W 波长 $2.34\mu\text{m}$ 的高功率输出。

近年来,采用PPLN晶体的高功率中红外激光取得了很大的进展,但由于PPLN晶体存在光折变效应,损伤阈值偏低,同时由于受电场击穿阈值的限制,晶体厚度只能做到1mm左右,这些因素一定程度上制约着PPLN OPO大功率的激光输出。

2 PPLN 光参变振荡器的宽调谐特性

PPLN晶体的通光范围在 $0.35\mu\text{m}\sim 5.3\mu\text{m}$,由于其对波长大于 $4.5\mu\text{m}$ 的光有较强的吸收,光折变效应显著,目前其参量光调谐范围大多在 $0.35\mu\text{m}\sim 4.2\mu\text{m}$ 。为实现CW OPO宽调谐输出,一般采用具有较大极化周期范围的PPLN以及波长可调谐的抽运源。2002年,GROSS等人^[13]首次报道了基于抽运可调谐光纤激光器的连续波单谐振光参变振荡器,实验中采用40mm长的PPLN晶体,四镜环形腔结构,在波长可调谐的掺镱光纤激光器($1032\text{nm}\sim 1095\text{nm}$)抽运功率为8.3W情况下获得1.9W波长 $3.2\mu\text{m}$ 连续空闲光输出,同时通过改变晶体温度、极化周期和抽运波长获得 $2.98\mu\text{m}\sim 3.7\mu\text{m}$ 范围内连续宽调谐空闲光输出。2009年,LIN等人^[14]用基于镁掺杂的周期性极化铌酸锂(PPMgLN)晶体的连续波单谐振光参变振荡器,采用波长808nm的二极管激光阵列做抽运源,通过改变晶体周期,获得波长范围为 $1.395\mu\text{m}\sim 1.641\mu\text{m}$ 和 $3.026\mu\text{m}\sim 4.485\mu\text{m}$ 参量光输出。2003年,van HERPEN等人^[15]用连续Nd:YAG激光器抽运,CW SRO腔设计,获得连续单频窄线宽(大于24GHz)高功率宽调谐($3.7\mu\text{m}\sim 4.7\mu\text{m}$)输出,这是迄今为止基于PPLN的连续波OPO扩展而获得最长的中红外波长。

此外,还可以在PPLN OPO的基础上,同步抽运通光范围更宽的非线性晶体等来实现更宽范围的调谐输出(如CdSe)。至于波长宽调谐范围方面,2003年,WATSON等人^[16]通过连续单谐振腔,在PPLN OPO的基础上,同步抽运CdSe OPO,获得了调谐范围为 $9.1\mu\text{m}\sim 9.7\mu\text{m}$ 的中红外光输出。通过衍射周期光栅调节,使CdSe晶体无热效应现象,空闲光输出范围可进一步扩展到 $8\mu\text{m}\sim 12\mu\text{m}$ 。

3 连续、低阈值 PPLN 光参变振荡器

为实现 CW OPO 低阈值振荡,须选择最佳的激光在腔内振荡形式,常用的 OPO 谐振腔分为单谐振腔及双谐振腔(double resonant oscillator, DRO)两种,还有一种比较少见的三谐振腔(three resonant oscillator, TRO)。DRO 的阈值比 SRO 低很多, DRO 结构多用于连续 OPO 系统,但是稳定性与可调谐性比 SRO 降低了,需要考虑腔的机械稳定性。CW SRO 优点可以实现连续稳定宽调谐,缺点是阈值普遍大于 1W,采用反向抽运的 SRO 需考虑晶体的损伤阈值。三谐振腔阈值是最低的(微瓦量级),但是对腔长微变化、频率微漂移以及环境扰动相当敏感,所以连续调谐较难,通常需要引入主动稳频装置。1993 年, YANG 等人^[17]第 1 次演示了 CW SRO,晶体采用磷酸氧钛钾,单频 Nd:YAG 激光抽运,最小阈值为 1.4W,当 3.2W 抽运功率时获得功率最大为 1.07W 的连续单模空闲光输出,实验中腔长和抽运频率跳动比双谐振平稳。1994 年, COLVILLE 等人^[18]报道了一种双腔双谐振连续光参变振荡器,他们采用三镜腔结构, II 类相位匹配,克服了模式和跳频影响,阈值低至 200mW。同年, SERKLAND 等人^[19]首次设计了应用晶体内部反射的 CW DRO 光参变振荡器,如图 4 所示,阈值仅 130mW,同时采用了被动热反馈机制,使 CW DRO 单模稳定振荡超过 30min。1998 年, LINDSAY 等人^[20]用信号光和空闲光的连续双谐振腔,通过波长为 810nm 单模二极管激光器抽运 PPLN 晶体,抽运阈值低至 16mW,通过晶体温度、抽运波长、晶格周期调谐获得 1.15 μm ~ 1.25 μm 信号光范围和 2.31 μm ~ 2.66 μm 空闲光范围调谐输出;为了获得稳定的单模输出,实验中采用了简单的条纹锁定(side-of-fringe locking, SFL)稳频技术。2001 年, MARTINELLI 等人^[21]使用了三重共振 CW TRO 设计,采用波长为 1.06 μm 的 Nd:YAG 激光器抽运 PPLN

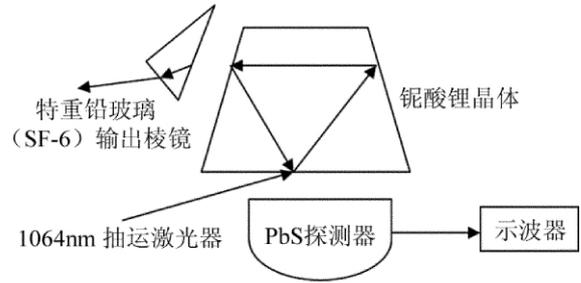


图 4 晶体内部反射的 CW DRO 光路设计^[19]

输入镜在 1.06 μm 波长的反射率为 87%, 在 2 μm ~ 2.2 μm 波长范围反射率为 99.8%, 输出镜在 1.06 μm 波长反射率为 99.8%, 在 2 μm ~ 2.2 μm 波长范围反射率为 99%, 实验中采用两焦距分别为 300mm 和 60mm 透镜组合,使其和 OPO 腔光束模式匹配达到 97%,信号光和空闲光在波长 2 μm ~ 2.3 μm 稳定单模输出,抽运阈值低至 500 μW 。

使用单谐振腔方面,1997 年, CHEN 等人^[22]采用单频 Nd:YAG 1.06 μm 激光抽运 PPLN,并在腔内加入相位调制器等稳频措施将环形腔模稳定在抽运激光频率,使 CW SRO 的参变振荡阈值降低到 350mW,成功地降低了 CW SRO 阈值;他们同时在腔中引入共焦标准具实现 2.9 μm ~ 3.5 μm 范围单频稳定连续输出,但光路较复杂。2006 年, HENDERSON 等人^[23]用单谐振连续光参变振荡器,抽运源为分布反馈式激光器(distributed feedback laser, DFB)并引入光纤放大技术,同时使用了长度较长的 80mm 的 MgO:PPLN 晶体,阈值降低为 780mW。2007 年, RONG 等人^[24]示范了连续波喇曼硅激光器的基础上环形谐振腔 OPO,阈值为 20mW。2011 年, BAE 等人^[25]报道了基于 MgO:PPLN 晶体的低阈值 CW SRO 设计,最小阈值功率 0.3W,其腔形结构如图 5 所示,他们使用了可调谐二极管激光波长接近信号波长监测调整 OPO 腔的共聚焦参量,优化空间匹配的抽运光腔模式和 OPO 的腔参量,实现两腔镜驻波优化,从而减小了 CW SRO 阈值。

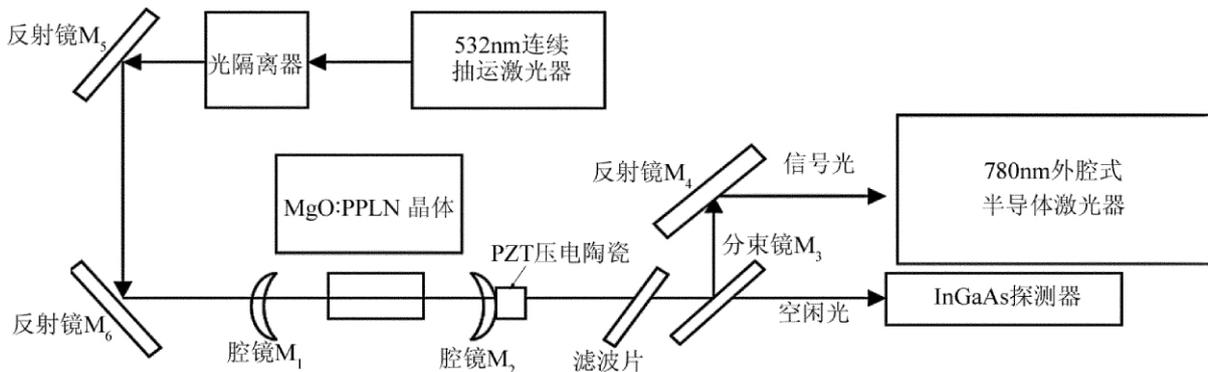


图 5 基于 MgO:PPLN 晶体的低阈值 CW SRO 光路设计^[25]

4 窄线宽或单频连续光参变振荡器

为获得窄线宽参变光输出,通常的做法是对抽运光和腔中的信号光加入标准具等压缩线宽或采用窄线宽滤波的方式。2002年, van HERPEN 等人^[26]在 OPO 腔中引入空间和固体标准具,在波长 $3\mu\text{m} \sim 3.8\mu\text{m}$ 范围内获得功率为 2.2W 的连续稳定可调谐输出,并将参量光用于分子微量气体检测。由于标准具的稳频, $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的 PPLN 晶体温度振荡引起长期空载频率漂移小于 200MHz 的时间超过 300s,超过 1s 时的频率漂移小于 3MHz。这主要得益于抽运源窄线宽(超过 5kHz/ms),高频稳定性 50MHz/h,在 TEM₀₀ 空间模式下有优异的光束质量 ($M^2 < 1.1$)。2010年, MALIK 和 MARHIC^[27]采用腔内不同窄线宽滤波(半峰全宽为 0.25nm),实现了信号光在 3dB 时的线宽约为 10GHz(即 0.08nm),调谐范围超过 200nm。2011年, HEMPEL 等人^[28]为压缩抽运线宽,以布儒斯特角插入 2.5mm 厚的石英双折射板,为压缩信号光线宽在腔中插入了 400 μm 厚的石英标准具,获得了窄线宽(小于 0.2nm)连续波输出。

随着 PPLN 晶体和高功率单频近红外固体激光器的出现,窄线宽光参变振荡器取得了长足的进步,目前市场上已经出现了一种高功率中红外单频连续光参变振荡器,它非常适合于中红外高分辨率光谱。

5 结束语

连续光学参变振荡在非线性光学频率转换领域应用广泛,也是产生中红外连续波相干光源的重要手段。PPLN 晶体的出现和准相位匹配技术的应用,极大地促进了连续波中红外参变光振荡技术的发展。目前通过采用合适的腔型结构(SRO, DRO, 环形腔等)、抽运源(单频激光、大功率光纤激光等),以及稳频和选模技术的应用,基于 PPLN 晶体和准相位匹配的 OPO 在高功率、低抽运阈值、宽调谐、窄线宽等方面都取得了长足的进步,也必将在大气污染检测、激光雷达、非线性光谱学等众多领域获得更大的应用。

参 考 文 献

- [1] GIORDMAINE J A, MILLER R C. Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO₃ at optical frequency [J]. Physical Review Letters, 1965, 14(24): 973-976.
- [2] SMITH R G, GEUSIC J E, LEVINSTEIN H J, et al. Continuous optical parametric oscillation in Ba₂NaNb₅O₁₅ [J]. Applied Physics Letters, 1968, 12(9): 308-311.
- [3] BYER R L, OSHMAN M K, YOUNG J F, et al. Visible cw parametric oscillator [J]. Applied Physics Letters, 1968, 13(3): 109-111.
- [4] ARMSTRONG J A, BLOEMBERGEN N, DUCUING J, et al. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [J]. Physical Review, 1962, 127(6): 1918-1939.
- [5] MYERS L E, BYER R L. 93% pump depletion 3.5W continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator [J]. Optics Letters, 1996, 21(17): 1336-1338.
- [6] MYERS L E, BOSENBERG W R, ARBORE M A, et al. CW singly-resonant optical parametric oscillators based on 1.064 μm pumped periodically poled LiNbO₃ [J]. Journal of the Optics Society of America, 1996, 1(1): 35-37.
- [7] LIN S T, LIN Y Y, WANG T D, et al. Thermal waveguide OPO [J]. Journal of the Optics Society of America, 2010, 18(2): 132-1329.
- [8] CHEN D W, ROSE T S. Low noise 10W CW OPO generation near 3 μm with MgO doped PPLN [J]. Journal of the Optical Society of America, 2005, 2(1): 22-27.
- [9] SAMANTA G K, FAYAZ G R, SUN Z, et al. High-power, continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator based on MgO:sPPLT [J]. Optics Letters, 2007, 32(4): 400-402.
- [10] DAS R, KUMAR S C, SAMANTA G K, et al. Broadband high-power continuous-wave mid-infrared source using extended phase-matching bandwidth in MgO:PPLN [J]. Optics Letters, 2009, 34(24): 3836-3838.
- [11] ZHAO J Q, YAO B Q, LIAN Y, et al. High power, continuous wave, singly resonant OPO based on MgO:PPLN [J]. Laser Physics, 2010, 20(10): 1902-1906.
- [12] HENDERSON A, PETER E. 23 watt 77% efficient CW OPO pumped by a fiber laser [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7580: 75800Q.
- [13] GROSS P, KLEIN M E, WALDE T, et al. Fiber-laser-pumped continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator [J]. Optics Letters, 2002, 27(6): 418-420.
- [14] LIN H Y, TAN H, MIAO J, et al. Extra-cavity widely tunable continuous wave MgO-doped PPLN optical parametric oscillator pumped with a Nd:YVO₄ laser [J]. Optical Materials, 2009, 32(1): 257-260.
- [15] van HERPEN M M J W, BISSON S E, HARREN F J M. Continuous-wave operation of a single-frequency optical parametric oscillator at 4~5 μm based on periodically poled LiNbO₃ [J]. Optics Letters, 2003, 28(24): 2497-2499.
- [16] WATSON M A, SHEPHERD D P, HANNA D C, et al. Synchronously pumped CdSe optical parametric oscillator in the 9~10mm region [J]. Optics Letters, 2003, 28(20): 1957-1959.
- [17] YANG S T, ECKARDT R C. Continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator pumped by a single-frequency resonantly doubled Nd:YAG laser [J]. Optics Letters, 1993, 18(12): 971-973.
- [18] COLVILLE F G, PADGETT M J, DUNN M H. Continuous-wave, dual-cavity, doubly resonant, optical parametric oscillator [J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(12): 1490-1492.
- [19] SERKLAND D K, ECKARDT R C, BYER R L. Continuous-wave total-internal-reflection optical parametric oscillator pumped at 1064nm [J]. Optics Letters, 1994, 19(14): 1046-1048.
- [20] LINDSAY I D, TURNBULL G A, DUNN M H, et al. Doubly resonant continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a single-mode diode laser [J]. Optics Letters, 1998, 23(24): 1889-1891.
- [21] MARTINELLI M, ZHANG K S, COUDREAU T, et al. Ultra-low threshold CW triply resonant OPO in the near infrared using periodically poled lithium niobate [J]. Applied Optics, 2001, A3(4): 300-303.
- [22] CHEN D, HINKLEY D, PYO J, et al. Single frequency low threshold CW 3 micron PPLN OPO [C]//Advanced Solid State Lasers.

- Oridando, Florida, USA: Optical Society of America, 1997: 1-3.
- [23] HENDERSON A, STAFFORD R. Low threshold, singly-resonant CW OPO pumped by an all-fiber pump source [J]. *Optical Express*, 2006, 14(2): 767-772.
- [24] RONG H Sh, XU Sh B, KUO Y H, *et al.* Low-threshold continuous-wave Raman silicon laser [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(1): 232-237.
- [25] BAE I H, MOON H S, ZASKE S, *et al.* Low-threshold singly-resonant continuous-wave optical parametric oscillator based on MgO-doped PPLN [J]. *Applied Physics*, 2011, B103(1): 311-319.
- [26] van HERPEN M M J W, 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(1): 329-333.
- [27] MALIK R, MARHIC M E. Narrow-linewidth tunable continuous-wave fiber optical parametric oscillator with 1W output power [C] // 2010 36th European Conference and Exhibition on IEEE Optical Communication (ECOC). Swansea, UK: IEEE, 2010: 19-23.
- [28] HEMPLER N, ROBERTSON G, BROMLEY L, *et al.* Compact narrow linewidth continuous-wave intracavity optical parametric oscillator pumped by a semiconductor disk laser [C] // CLEO: Science and Innovations (CLEO: S and I). Baltimore, Maryland, USA: CLEO, 2011: 1-2.

版权所有 © 《激光技术》编辑部