文章编号:1001-5078(2020)01-0003-06　　·综述与评论·

级联光参量振荡与放大技术研究进展

赵志刚,谢安宁,王德飞,吴志建
(中国洛阳电子装备试验中心,河南 洛阳 471000)

摘　要:高性能中红外激光源在科研、民用及军事对抗等领域具有重要的应用价值。级联光参量振荡与放大技术可以显著提高抽运光子利用率,是获取高转换效率、高光束质量和系统高度集成中红外激光的有效方式。介绍了级联光参量振荡与放大技术的基础理论、典型结构以及常用非线性光学晶体,评述了级联光参量振荡与放大技术的研究进展,分析了级联光参量振荡与放大技术在非线性晶体制备、废热管理和镀膜工艺等方面面临的挑战,并对这项技术的发展趋势进行了展望。

关键词:中红外激光;级联;光参量振荡;光参量放大;废热管理
中图分类号:TN248.1　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.01.001

Research progress on tandem optical parametric oscillation and amplification technology

ZHAO Zhi-gang, XIE An-ning, WANG De-fei, WU Zhi-jian
(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471000, China)

Abstract: High-performance mid-infrared laser has important application value in some fields, such as science research, civil and military confrontation. Tandem optical parametric oscillation and amplification technology can significantly improve the utilization of pump photons, and is an effective way to obtain high conversion efficiency, high beam quality and high integration of mid-infrared laser. The basic theory, typical structure and common nonlinear optical crystal of tandem optical parametric oscillation and amplification technology are introduced in the paper. The research progress of tandem optical parametric oscillation and amplification technology is reviewed. Scientific challenges of the tandem optical parametric oscillation and amplification technology on crystal growth, waste heat management and coating are analyzed, and its development trend is also predicted.

Keywords: mid-infrared laser; tandem; optical parametric amplification; optical parametric oscillation; heat management

1　引　言

3~5 μm 中红外激光位于大气吸收窗口,热辐射能量聚集并且水吸收强烈,这些特性使得中红外激光在科学前沿、光电对抗、医疗、材料加工和环境监测等领域有重要应用价值,是激光技术领域的研究热点[1-3]。

目前学术界获得这种激光的主要技术路线有掺杂离子的直接发射、非线性频率变换、量子级联激光器、化学激光器、自由电子激光器和色心激光器等[4]。在这些技术中,非线性频率变换技术具有波长调谐范围宽、全固化、结构紧凑、转换效率和输出功率高等特点,成为当前获取中红外激光的主流[5],并且成熟产品已经在工程实践中被广泛应用。这种技术虽然优势明显,但也存在瓶颈。目前已知的用于产生中红外激光的光学晶体,抗损伤阈值相对较小,且受制备工艺的限制,大尺寸晶体生长

作者简介:赵志刚(1984-),男,硕士,工程师,主要从事固体激光技术研究。E-mail:18537960296@163.com
收稿日期:2019-05-30

困难,造成抽运光通光口径小,如果大功率抽运光注入,谐振腔内高增益将增大晶体损伤风险,并影响光束质量,同时还会引起逆转换效应,最终使输出功率降低[6]。此外,镀膜工艺和温控技术等因素也限制了中红外激光功率的提升[7]。在此技术背景下,研究人员引入了光参量放大[8-9]和矩形抽运光注入[10]等拓展技术来提高中红外激光的输出功率,最高分别可达到66.7 W 和40.3 W,但系统结构复杂,稳定性较差,不符合中红外激光在实际应用中的客观需求。还有一种基 TOPO(tandem optical parametric oscillation,TOPO)理论的技术[11]。TOPO 技术可以大幅提升抽运光子的利用率,解决常规 OPO 和 OPA 输出功率受限于量子效率和光子能量比的问题,能够有效提高中红外激光的转换效率和输出功率,改善输出参量光的光束质量,同时抑制 OPO 过程中的逆转换效应,并且激光频率变换过程高度集成,结构简单紧凑,便于实现小型化。

文章主要介绍了 TOPO 技术的基本原理,给出了 TOPO 拆分为 OPO + OPA 过程的实现条件,详述了基于 TOPO 理论的级联光参量振荡与放大技术的三种典型结构和常用的非线性光学晶体特性,评述和分析了这项技术的研究进展与在非线性晶体制备等方面面临的挑战,并对未来发展趋势进行了展望。

2 背景概述

2.1 TOPO 理论

在常规 OPO 过程中,中红外激光输出功率和光子能量比成反比,光子能量比越高,则输出功率越低,占能量主要部分的信号光往往得不到充分利用而被白白浪费。TOPO 技术将信号光作为抽运光重复使用,转换为中红外激光输出。变换过程为:$\omega_p \rightarrow \omega_s + \omega_i$,$\omega_s \rightarrow \omega_s' + \omega_i'$,ω 表示频率,角标 p,s,i 分别代表抽运光、信号光和闲频光。若第二次 OPO 转换过程为 $\omega_s \rightarrow \omega_i + \omega_i'$,对应图 1 中 $\omega_s' = \omega_i$,则第二次 OPO 相当于 OPA,即第一个 OPO 过程中的信号光对闲频光(第二个 OPO 过程中的信号光)进行了放大,总过程可拆分为 OPO + OPA[12]。

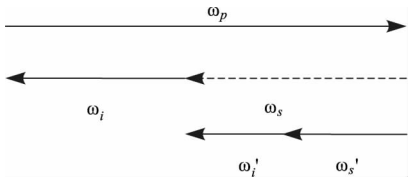

图 1 TOPO 物理过程

Fig. 1 Physical process of TOPO

常规 OPO 过程需要满足能量守恒和动量守恒。要实现 TOPO 过程,则信号光在第二次 OPO 过程中必须再次满足能量守恒和动量守恒。

$$\begin{cases} \dfrac{1}{\lambda_p} = \dfrac{1}{\lambda_{s1}} + \dfrac{1}{\lambda_{i1}} \\ \dfrac{n_p(\lambda_p,t)}{\lambda_p} - \dfrac{n_{s1}(\lambda_{s1},t)}{\lambda_{s1}} - \dfrac{n_{i1}(\lambda_{i1},t)}{\lambda_{i1}} - \dfrac{1}{\Lambda} = 0 \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \dfrac{1}{\lambda_{s1}} = \dfrac{1}{\lambda_{s2}} + \dfrac{1}{\lambda_{i2}} \\ \dfrac{n_{s1}(\lambda_{s1},t)}{\lambda_{s1}} - \dfrac{n_{s2}(\lambda_{s2},t)}{\lambda_{s2}} - \dfrac{n_{i2}(\lambda_{i2},t)}{\lambda_{i2}} - \dfrac{1}{\Lambda} = 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} n_e^2 = a_1 + b_1 f + \dfrac{a_2 + b_2 f}{\lambda^2 - (a_3 + b_3 f)^2} + \dfrac{a_4 + b_4 f}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2 \\ f = (t - 24.5)(t + 570.82) \end{cases} \tag{3}$$

式中,λ 表示波长;n 表示折射率;Λ 表示晶体极化周期;1 和 2 分别表示第一次 OPO 和第二次 OPO 过程;t 表示晶体温度;$a_1 \sim a_6$、$b_1 \sim b_4$ 均为常数,如表 1 所示。由式(1)~(3)可知,只要满足条件 $\lambda_{i1} = \lambda_{s2}$,就可以实现级联光参量振荡与放大。由于第二个 OPO 过程对信号光的大幅消耗,促使抽运光持续向参量光转换,提高了转换效率,改善光了束质量,同时抑制了逆转换效应。

表 1 a、b 数值

Tab. 2 The value of a and b

a_1	5.756	b_1	2.86×10^{-6}
a_2	0.0983	b_2	4.7×10^{-8}
a_3	0.0202	b_3	6.113×10^{-8}
a_4	189.32	b_4	1.516×10^{-4}
a_5	12.52		
a_6	1.32×10^{-2}		

2.2 典型结构

TOPO 技术典型结构有多块非线性晶体在环形腔、直线腔中实现、单块多周期非线性晶体在环形腔中实现和单块单周期晶体在直线腔中实现三种形式。利用多块非线性晶体在谐振腔中两次或者多次 OPO 实现双波长或多波长输出,是最早提出并最早被实验验证的。这种方式腔内损耗大,调谐难度高,对抽运源要求也高,后来周期极化晶体出现,这种技术随即被淘汰。利用单块多周期非线性晶体在环形腔中实现 TOPO 技术的优势在于抽运功率和阈值低,调谐方式简单方便。由于大厚度高质量非线性

晶体制备难度高,这种使用模式发展相对缓慢。单块单周期晶体在直线腔中实现 TOPO,量子转换效率高,光谱调谐范围宽,可以获得中红外波段双波长或多波长激光输出,发展前景广阔,是当前使用最多的应用模式。但由于热效应比常规 OPO 要高,对温度控制要求十分苛刻。

2.3　常用晶体

常规 OPO 使用的非线性光学晶体同样适用于级联光参量振荡与放大技术,常用类型及详细参数如表 2 所示。KTP 和 $AgGaS_2$ 同为双折射相位匹配晶体。KTP 属于正交晶系,正光性双轴晶体,性能稳定,不易潮解,但对 3.2 μm 以上波长的激光存在较强吸收,在近红外波段更具优势。$AgGaS_2$ 晶体的极化系数大,通光范围宽,但热导率和损伤阈值低。PPLN 和 PPMgLN 属于准相位匹配晶体。非线性系数大、调谐范围宽、性价比很高,应用非常广泛。但 PPLN 晶体的极化电压很高,大尺寸晶体生长困难,并且对蓝绿激光敏感,易发生光折变损伤,难以在室温下使用。后来在 PPLN 中添加 MgO 离子后,极化电压大幅降低,损伤阈值增大,并实现了常温下应用,成为光参量振荡与放大技术的首选。

表 2　TOPO 常用非线性晶体

Tab. 2 Nonlinear crystals commonly used in TOPO technology

crystal	transmission range /μm	nonlinear polarization coefficent/ (pm · V^{-1})	absorption coefficient (1 ~ 4) μm /cm	damage threshold (1.06 μm,10 ns) /(GW · cm^{-2})
PPLN	0.40 ~ 5.5	d_{eff} = 16	/	0.27
PPMgLN	0.40 ~ 5.5	d_{eff} = 34	/	10
$AgGaS_2$	0.5 ~ 13	d_{36} = 23.6 ± 2.4	< 0.09	0.025
KTP	0.35 ~ 4.5	d_{31} = 2.2 ± 0.1; d_{32} = 3.7 ± 0.2	< 0.001 (2.5μm)	1.3

3　研究进展

关于 TOPO 技术的研究最早是通过理论模拟开始的。1995 年,Karl Koch 等人在环形腔内插入 PPLN 和 $AgGaS_2$ 晶体,分别用于 OPO 和 OPA,波长转换过程为:1.064 μm→1.596 μm + 3.192 μm/1.596 μm→3.192 μm + 3.192 μm。理论计算闲频光的转换效率高达 98.2 %,OPA 过程完成转化接近 98 %,同时认为抽运光全部被转换,展示出了光明的前景[11]。1996 年,GT. Moore 等人采用平面波在环形腔中再次完成了理论模拟,并对 TOPO 过程的量子效率和阈值进行了研究,同时成功在单块双周期 PPLN 晶体中模拟实现了波长变换形式为 1.064 μm → 1.368μm + 4.788 μm/1.368 μm → 2.218 μm + 3.83 μm 的 TOPO 过程[13]。在理论模拟的指导下,M Vaidyanathan 等人率先在直线腔中使用单块多周期 PPLN 晶体完成了 TOPO 实验验证,证明了 TOPO 理论的可行性[14]。1998 年,G. T. Moore 等人再次模拟了 TOPO 过程,对量子效率和抽运光完全转换的条件进行了研究,并给出了大功率抽运下,TOPO 必然获得高量子转换效率的结论[15]。2000 年,K. J. McEwan 团队在两个环形腔中各使用一块 PPLN 晶体完成了波长转换为 1.064 μm→1.46μm + 3.92 μm/1.46 μm→2.4 μm + 3.73 μm 的 TOPO 过程,中红外波长转换效率达到 42 %[16]。第二年他们又采用类似结构完成了新的波长变换:1.064 μm→1.48μm + 3.8 μm/1.48 μm →2.4 μm + 3.8 μm,参量光的波长调谐范围较宽,分别为 0.2 μm 和 0.76 μm,总输出功率为毫瓦级,中红外波长转换效率 29 %[17]。2003 年,他们在环形腔中采用单块双周期 PPLN 晶体又一次实现了 TOPO 过程。晶体极化周期分别为 28.3 μm 和 32.3 μm,转换效率和输出功率都有明显提升。当抽运功率加载到 25 W 时,总功率 4.3 W,转换效率超过17 %[18]。2004 年,K. A. Tillman 等人利用单块多周期 PPLN 实现了 TOPO。闲频光调谐范围分别为2.1 ~ 2.5 μm 和 2.5 ~ 4.2 μm,但输出功率只有几十毫瓦[19]。2007 年,Antoine Berrou 等人使用两块 KTA 晶体实现了光参量振荡与放大过程,研究了腔长对参量光输出特性的影响,证明了 OPA 过程中相位失配和相位匹配对转换效率的影响[20]。同年,张铁犁等人采用 PPLN 和 PPMgLN 两块晶体在直线腔中实现 TOPO 过程。参量光最高输出功率为 169.6 mW[21],这是国内学者首次公开的关于 TOPO 技术的研究成果。2010 年,Gil Porat 等人使用 PPMgLN 晶体实现了级联光参量振荡与放大。当晶体工作温度为 125 ℃ 时,波长变换过程为:1.064 μm → 1.456μm + 3.95 μm/1.456 μm → 2.307 μm + 3.95 μm,转换效率和斜效率从常规 OPO 过程的 12.5 % 和 15.25 % 分别提高到 14.6 % 和 23.3 %[22]。同年,魏星斌等人理论模拟了在直线腔中采用单块单周期 PPLN 晶体中实现 TOPO 过

程,晶体极化周期31.4 μm,工作温度106.5 ℃,波长变换为:1.064 μm→1.7μm + 2.835 μm/1.7 μm →2.835 μm + 4.25 μm。随后采用相似结构进行了实验验证。晶体极化周期31.2 μm,工作温度151.3 ℃,波长变换为:1.064 μm → 1.7μm + 2.83 μm/1.7 μm→2.83 μm + 4.3 μm。并使用三种腔型对输出功率进行了研究,测得2.83 μm和4.3 μm激光的输出功率分别为5.57 W/0.5 W、7.68 W/0.2 W、8.25 W/0.8 W,对应的功率和光子转换效率分别为22.3 %/68.9 %、30.7 %/81.7%、33 %/87.8 %[23]。后来他们又把PPLN晶体更换为PPMgLN晶体,重复了相似实验。晶体温度为148 ℃时,获得了和PPLN晶体在151.3 ℃时相同的级联光参量振荡与放大变换过程[24]。2011年,他们把2.83 μm参量光的输出功率提高到7.68 W,转换效率超过30 %[25]。同年,Antoine Godard等人使用单块双周期PPLN晶体在直线腔中实现了波长变换过程为1.064 μm→1.45 μm + 4 μm/1.45 μm→2.27 μm + 4 μm的级联光参量振荡与放大,测得闲频光输出功率超过1 W,比同等条件下单周期OPO的输出功率增大60 %。还验证了TOPO技术对参量光光束质量的优化作用[26]。2014年,赵婧在单块单周期PPMgLN晶体中实现了级联光参量振荡与放大。当晶体极化周期为31.5 μm,工作温度为81 ℃时,波长变换过程为:1.064 μm→1.702 μm + 2.837 μm/1.702 μm→2.837 μm + 4.257 μm,总输出功率3 W,光光转换效率27.4 %,信号光和闲频光功率分别为2.253 W/0.578 W;当晶体极化周期为31 μm,工作温度为192.1 ℃时,波长变换过程为:1.064 μm→1.704 μm + 2.834 μm/1.704 μm→2.834 μm + 4.252 μm,总输出功率2.459 W,光光转换效率22.5 %,信号光和闲频光功率分别为1.868 W/0.543 W[12]。2016年,李世凤等人采用单块双周期MgO:sPPLT晶体在110 ℃实现了波长变换过程为1.064 μm → 1.467 μm + 3.876 μm/1.467 μm→2.359 nm + 3.876 μm的级联光参量振荡与放大过程,测得最大输出功率2.2 W,转换效率13 %,斜效率15.9 %,比单个OPO过程的输出功率和转换效率分别增加了69.2 %和71 %,优势明显[27]。2018年,刘恂等人对级联晶体倍频器件温度适应性进行了研究,指出当晶体间空气色散引起的基频光和倍频光相位失配量为2π整数倍时,具有最高的转换效率和最好的温度适应性,对于级联光参量振荡与放大技术同样具有借鉴意义[28]。

4 面临的挑战

级联光参量振荡与放大技术作为一种获取大功率、高转换效率、高光束质量和系统高度集成中红外激光的有效方式,具有广阔的发展前景,但要想在输出功率和稳定性等方面获得更大的突破,比拟或赶超1 μm近红外激光的发展势头,仍然面临很多挑战。

4.1 非线性晶体

虽然OPO理论早在1962年就被提出并逐步完善成熟,但直到上世纪90年代非线性晶体制备工艺的突破,OPO技术才得到真正意义上的发展。由此可见光学材料对激光技术的发展影响深远。经过多年的努力,非线性光学晶体的生长理论、工艺取得了很大进步,但距离高性能、大尺寸、大通光口径的目标差距依然很大。以使用最广泛的PPMgLN晶体为例,从$LiNbO_3$到PPLN,再到PPMgLN,理论与工艺经过了多次更新,光学性能得到了不断优化,但晶体的尺寸一直没有获得重大突破,目前商品化PPMgLN晶体的厚度仅为1 ~ 3 mm。在实验研究阶段,Hideki Ishizuki团队[29-32]一直处于世界领先水平,经过十余年努力,晶体厚度从3 mm、5 mm、10 mm一直增大到了12 mm,但厚度越高、制备难度越大,成本越高,稳定性越差,虽然对这些样品的实验研究显示出了光明的前景,但距离批量化生产与推广应用,还需时日。

4.2 废热管理

高功率抽运条件下,晶体会吸收抽运光和参量光的能量,使自身温度升高,并沿着通光方向形成温度梯度,产生严重的热效应。温度过高不仅导致晶体发生形变,产生热膨胀效应,增大损伤风险,还会改变晶体的折射率和极化周期,使输出参量光的中心波长发生漂移,甚至难以实现简并输出。此外,温升还会引起参量光波前畸变,造成光束质量劣化[33-34]。因此,对光参量振荡与放大过程产生的废热进行有效管理非常重要。目前技术革新后的商用恒温炉的控温精度已经达到了0.01 ℃,还有学者[35]提出的温度梯度反向补偿理论与系统,都对光参量过程中的废热管理有优化作用。但研发新的温

控理论与技术、更高精度和更高效率的温控设备仍然具有积极的现实意义。这也是光参量技术外围研究的一个重要方向。

4.3 镀膜技术

在光参量技术中,很多元件涉及多波段镀膜,工艺更加复杂,而且中红外波段激光热效应显著,对镀膜提出了更高要求。光参量振荡与放大技术特有的高度集成和信号光二次抽运,使得腔镜及其他元件等膜层的损伤风险进一步增大,限制了抽运功率的提高,并直接影响最终输出光的转换效率和功率。因此,镀膜工艺也是影响中红外激光特性的一个关键因素,品质需要继续提高。

5 展 望

虽然级联光参量振荡与放大技术和常规 OPO 技术、OPA 技术一样,发展面临诸多限制,但这项技术在高转换效率、良好的光束质量、抑制逆转换效应和便于集成等方面具备的优势,是其他技术难以比拟的,必将拥有光明的发展前景。预测随着非线性光学晶体制备、镀膜工艺和温控技术等外围领域研究的突破,级联光参量振荡与放大技术的潜能将会全面释放,在工程应用中展现巨大的价值。

参考文献:

[1] SHEN Deyuan, FAN Dianyuan. Mid-infrared laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
沈德元,范滇元. 中红外激光器[M]. 北京:国防工业出版社,2015.

[2] TAN Gaijuan, XIE Jijiang, ZHANG Laiming, et al. Recent progress in mid-infrared laser technology[J]. Chinese Optics, 2013, 6(4): 501 – 512. (in Chinese)
谭改娟,谢冀江,张来明,等. 中红外激光技术最新进展[J]. 中国光学,2013,6(4):501 – 512.

[3] PANG Qikun. Progress of mid-infrared solid-state laser[J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 557 – 566. (in Chinese)
潘其坤. 中红外固体激光器研究进展[J]. 中国光学,2015,8(4):557 – 566.

[4] CHENG Xiaojin, LI Chao, XU Fei, et al. Progress in Fe: ZnS/ZnSe middle-infrared solid-state lasers[J]. Laser Technology, 2018, 42(2): 151 – 155. (in Chinese)
程小劲,李超,徐飞,等. Fe:ZnS/ZnSe 中红外固体激光器研究进展[J]. 激光技术,2018,42(2):151 – 155.

[5] Koechner K, Bass M. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.

[6] PENG Jue. Research on narrow linewidth high power mid-infrared optical parametric oscillation and amplification techniques[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2014. (in Chinese)
彭珏. 窄线宽高功率中红外光参量振荡与放大技术研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2014.

[7] ZHAO Zhigang, WANG Defei, HU Weixing. Research progress of nanosecond OPA technology[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(3): 266 – 272. (in Chinese)
赵志刚,王德飞,胡维星. 纳秒量级光参量放大技术研究进展[J]. 激光与红外,2019,49(3):266 – 272.

[8] PENG Y F, WEI X B, LUO X W, et al. High-power and widely tunable mid-infrared optical parametric amplification based on PPMgLN[J]. Optics Letters, 2016, 41(1): 49 – 51.

[9] ZHAO Zhigang, SHEN Lifeng, JIANG Hongbo, et al. Output of mid-infrared laser with narrow spectral width in implementation of optical parametric oscillator and oscillator power amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1001008 – 1 – 1001008 – 7. (in Chinese)
赵志刚,沈利沣,姜洪波,等. 光参量振荡器和光参量放大器实现窄谱宽中红外激光输出[J]. 中国激光,2016,43(10):1001008 – 1 – 1001008 – 7.

[10] WEI X B, PENG Y F, PENG J, et al. 110 W 1678 nm laser based on high-efficiency optical parametric interactions pumped by high-power slab laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1608 – 1611.

[11] Karl K, Gerald T M, E. C. Cheung. Optical parametric oscillation with intracavity difference-frequency mixing[J]. Opt. Soc. Am. B, 1995: 12: 2268 – 2273.

[12] ZHAO Jing. Study on tandem optical parametric oscillation and amplification technology based on MgO: PPLN crystal[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
赵婧. 基于 MgO:PPLN 晶体级联光参量振荡与放大技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2014.

[13] Gerald T M, Karl K. The tandem optical parametric oscillator[J]. Journal of Quantum Electronics, 1996: 33: 2085 – 2094.

[14] M Vaiduanathan, R C Eekardt, Vince D, et al. Cascaded optical parametric oscillations[J]. Optics Express, 1997: 1: 49 – 53.

[15] Gerald T M, Karl K, Michael E D, et al. A simultaneously phase-match tandem optical parametric oscillator[J].

Journal of Quantum Electronics, 1998: 34: 803 – 810.

[16] K J McEwan, J A C Terry. A tandem PPLN optical parametric oscillator[J]. Optics Communications, 2000: 182: 423 – 432.

[17] K J McEwan, J A C Terry. Synchronously pumped OPO-OPO and OPO-DFM devices[J]. Lasers and Electro-Optics Society, LEPS, 2001: 667 – 668.

[18] K J McEwan, Kenneth J. Synchronously pumped tandem OPO and OPO/DFM devices based on a single PPLN crystal[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4972: 1 – 2.

[19] K A Tillman, D T Reid. Idler resonant femtosecond tandem optical parametric oscillator tuning from 2.1 μm to 4.2 μm[J]. Opt. Soc. Am. B, 2004, 21(8): 1551 – 1558.

[20] A Berrou, J M Melkonian, M Raybaut, et al. Specific architectures for optical parametric oscillators[J]C. R. Physique, 2007, 8: 1162 – 1173.

[21] ZHANG T L, YAO B Q, ZHU X Y, et al. Widely tunable, high-repetition-rate, dual signal-wave optical parametric oscillator by using two periodically poled crystals[J]. Optical Communications, 2007, 272(1): 111 – 115.

[22] G Porat, O Gayer, A Arie. Simultaneous parametric oscillation and signal-to-idler conversion for efficient downconversion[J]. Optics Letters, 2010, 35(9): 1401 – 1403.

[23] WEI Xingbin. Rearch on mid-infrared optical parametric oscillation technology based on PPLN[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2010. (in Chinese)
魏星斌. 基于 PPLN 晶体的中红外光参量振荡技术研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2010.

[24] WEI X B, PENG Y F, WANG W M, et al. Wavelength tunability of tandem optical parametric oscillator based on signle PPMgLN crystal[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(11): 1061 – 1063.

[25] WEI X B, PENG Y F, WANG W M, et al. High-efficiency mid-infrared laser from synchronous optical parametric oscillation and amplification based on single MgO: PPLN crystal[J]. Applied Physics B, 2011, 104: 597 – 601.

[26] A Godard, M Raybuat, M lefebver, et al. Optimized 4-μm OPO with intracavity OPA based on a single dual-gurating PPLN crystal[C]//CLEO, 2011.

[27] LI SH F, JU P P, LIU Y H, et al. Efficiency enhanced picosecond mid-infrared optical parametric downconversion based on a cascaded optical superlattice[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(4): 041402 – 1 – 041402 – 3.

[28] LIU Xun, SHEN Xueju, YIN Jianling, et al. Research on extending temperature acceptance bandwidth of second harmonic generation in cascaded crystals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0108001 – 1 – 0108001 – 7. (in Chinese)
刘恂,沈学举,殷建玲,等. 级联晶体倍频器件温度适应性扩展研究[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0108001 – 1 – 0108001 – 7.

[29] ISHIZUKI H, SHOJI I, TAIRA T. High-energy quasi-phase-matched optical parametric oscillation in a 3-mm-thick periodically poled MgO: LiNbO3 device[J]. Optics Letters, 2004, 29(21): 2527 – 2529.

[30] SAIKAWA J, FUJII M, ISHIZUKI H, et al. High-energy, narrow-bandwidth periodically poled Mg-doped LiNbO3 optical parametric oscillator with a volume Bragg grating[J]. Optics Letters, 2007, 32(20): 2996 – 2998.

[31] ISHIZUKI H, TAIRA T. Half-joule output optical parametric oscillation by using 10-mm-thick periodically poled Mg-doped congruent LiNbO3[J]. Optics Express, 2012, 20(18): 20002.

[32] TAIRA T, ISHIZUKI H. Large aperture quasi-phase matched nonlinear material for functional power lasers[J]. CLEO, 2017: 1 – 2.

[33] CAI X T, LI X, ZHAO G M. Beam quality deterioration caused by crystal temperature in optiacl parametric oscillator[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1219001 – 1 – 1219001 – 5.

[34] VAINIO M, PELTOLA J, PERSIJIN S, et al. Thermal effects in singly resonant continuous-wave optical parametric oscillators[J]. Applied Physics, 2009, 94(3): 411 – 427.

[35] LIU Chong, DONG Yantao, GE Jianhong, et al. Device and method for compensating nonlinear crystal longitudinal temperature gradient in optical parametric oscillator, CN, Patent 102749784A[P]. 2012. (in Chinese)
刘崇,董延涛,葛剑虹,等. 补偿光学参量振荡器中非线性晶体纵向温度梯度的装置和方法, CN, Patent 102749784A[P]. 2012.