

中红外连续波光学参变振荡技术研究进展

刘磊 李霄 刘通 许晓军 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 中红外连续波光学参变振荡技术是非线性变频领域关注的热点。它在激光通信、光谱学研究、遥感技术以及军事上的红外对抗等方面具有重要的应用。分析和对比了用于中红外输出的非线性晶体的主要特性,简单综述了国内外中红外连续波光学参变振荡技术的实验与理论研究情况,并基于研究现状提出其未来一些的研究方向。目前,中红外连续波光学参变振荡器能够实现 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 范围,输出功率范围在百毫瓦到十瓦之间的高稳定性、宽调谐的光输出。随着激光器技术的发展和周期性极化晶体性能的进一步提高,下一步有望在更大调谐范围内实现更高功率的中红外连续激光输出。

关键词 非线性光学;光学参变振荡器;光纤激光器;中红外;MgO:PPLN 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.060002

Progress of Mid-Infrared Continuous-Wave Optical Parametric Oscillation Technique

Liu Lei Li Xiao Liu Tong Xu Xiaojun Jiang Zongfu

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillator (CW-OPO) is the focus in the field of nonlinear frequency conversion. It has important applications in optical communication, spectroscopy, remote sensing and infrared countermeasure. We analyzed the main features of the nonlinear crystal which is used to produce mid-infrared laser, and overviewed the experimental and theoretical researches of mid-infrared CW-OPO. We also proposed some of its future research directions. Currently, mid-infrared CW-OPO can achieve the output power from a hundred milliwatts to ten watts in $3\sim 5\ \mu\text{m}$ with high stability, wide tunability. With the development of laser technology and periodically poled crystals with further improved performance, the next step is expected to achieve higher-power mid-infrared continuous-wave laser output in a larger tuning range.

Key words nonlinear optics; optical parametric oscillator; fiber laser; mid-infrared; MgO:PPLN crystal

OCIS codes 190.4970; 140.3070; 140.3580

1 引言

中红外波段($3\sim 5\ \mu\text{m}$)的相干光源在激光通信、光谱学研究以及军事上的激光雷达、红外对抗等方面均发挥着巨大的作用。光学学参变振荡器(OPO)作为实现中红外相干光源的最重要手段,一直是国内外相关研究机构的关注重点。自 Giordmaine 和 Miller^[1] 利用调 Q $1.058\ \mu\text{m}$ GaWO₄:Nd 激光通过 LiNbO₃ 晶体首次实现 OPO 成功运转后,1968 年,Smith^[2] 和 Byer^[3] 等又分别采用 Ba₂NaNb₅O₁₅ 和 LiNbO₃ 晶体成功地获得了连续工作的 OPO。而后人们对于脉冲、超短脉冲和连续运转方式的 OPO 进行了大量的研究。由于连续光抽运的 OPO 相对与脉冲、超短脉冲运转方式的 OPO 具有更高的阈值,这就要求其抽运光提供较高的抽运功率,非线性晶体要有更大的非线性系数,所以早期 CW-OPO 比其他运转方式 OPO 的发展缓慢。自 20 世纪 90 年代中后期以来,随着高功率、高光束质量和高单色性的抽运源发展和具有中红外透光范围周期

收稿日期: 2011-12-02; 收到修改稿日期: 2011-12-30; 网络出版日期: 2012-04-01

作者简介: 刘磊(1981—),男,博士研究生,主要从事中红外光参量振荡器方面的研究。E-mail: llwm0319@163.com

导师简介: 姜宗福(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为高能激光器技术、气动光学等方面的研究。

E-mail: jiangzongfu28@163.com

极化晶体(如:PPLN、MgO:PPLN、MgO:sPPLT)的出现,极大的推动了中红外 CW-OPO 的发展。目前,中红外 CW-OPO 系统已经从实验室研究发展成为实际应用中一类重要的可调谐光源。

针对中红外 CW-OPO 在中红外可调谐光源中不可取代的地位,本文全面回顾了中红外 CW-OPO 的研究历程,从非线性晶体的选择,OPO 的不同谐振类型、不同抽运光源及有关特性分析等方面,总结了中红外 CW-OPO 的实验和理论研究进展,并对未来的发展方向进行了展望。

2 中红外非线性晶体

作为 OPO 的核心部件,非线性晶体的特性决定了中红外激光的调谐波段和适用范围。目前适用于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ OPO 输出的非线性晶体很多,如双折射晶体材料 AgGaSe₂ 与 AgGaS₂, ZnGeP₂, KTA 与 RTA, LiNbO₃ 以及周期极化晶体 PPLN、MgO:PPLN、MgO:sPPLT、PPKTA、PPRTA 等。

半导体型非线性晶体 AgGaS₂、AgGaSe 非线性系数较大,且在中红外和远红外有较宽的透明范围,但这两种晶体热导率和损伤阈值较低限制了其在高功率激光非线性转换上的应用,一般常用于低平均功率的应用。ZnGeP₂ 晶体对波长短于 $2\ \mu\text{m}$ 的光吸收强烈,要求抽运源波长长于 $2\ \mu\text{m}$,它常用的抽运源输出波长要求大于 $2\ \mu\text{m}$ 。对于 $2\ \mu\text{m}$ 激光抽运的 ZnGeP₂-OPO 的特点是信号光和闲频光都位于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 范围内,总体转换效率高。由于其较周期极化材料,学参变光相互作用距离短,在连续光抽运下非线性增益低,不适用于连续光抽运的 OPO,常通过该晶体获得高重复频率的中红外激光。

KTP 的同形晶体 KTA 和 RTA 的透明范围可扩展到 $5\ \mu\text{m}$,由于 KTP 晶体在大于 $3.2\ \mu\text{m}$ 以后吸收严重,KTA 和 RTA 在中红外区域比 KTP 透射性好,而且它的热导系数较高,较 KTP 更适合于高功率激光抽运的中红外激光器。而作为最早实现 OPO 运转的 LiNbO₃ 晶体,由于其损伤阈值较低,不易实现较高能量的输出,而且存在接受角较小、增益低、有走离效应以及调谐范围不是很宽等缺点。由于 KTA 和 RTA 晶体的电导率一致性存在问题,使得制备满足连续光抽运需求的周期极化晶体 PPKTA、PPRTA 还有一定困难。目前,基于 PPKTA 的中红外 CW-OPO 还未见相关报道,同样对于关于采用 PPRTA 晶体实现连续中红外输出的报道也较少^[4,5]。

由于准相位匹配(QPM)技术的迅速发展,出现了许多适合中红外 OPO 输出的周期性极化晶体材料(PPLN、MgO:PPLN、MgO:sPPLT、PPKTA、PPRTA),由于这些材料较双折射晶体材料存在非线性系数大,无走离效应影响,学参变光相互作用长等优点,克服了在连续光抽运下双折射晶体材料非线性增益低的问题,很快成为了实现高功率中红外连续 OPO 的首选材料。这些晶体材料中最成熟、早期应用最多的为 PPLN 晶体。由于受电场击穿阈值限制,PPLN 晶体的厚度一般只能做到 $1\ \text{mm}$ 左右,因而其横向增益长度有限。为了消除光折变损伤的影响,PPLN 只能工作在 $150\ ^\circ\text{C}$ 左右。为了克服以上缺陷,日本的 Kuroda 等用高掺杂 MgO(摩尔分数 5%)的 LiNbO₃ 首次成功制成了 MgO:PPLN 晶体^[6],这种晶体在一定程度上克服了 PPLN 抗光折变能力差和极化电压高的缺点。目前基于 MgO:PPLN 晶体的 OPO,学参变光相互作用距离最大达到 $80\ \text{mm}$ ^[7]。该晶体已经成为高功率中红外 CW-OPO 的首选材料。

MgO:PPLN 晶体的较低损伤阈值一定程度上限制了其往更高功率方面的发展。作为 MgO:PPLN 的同形晶体 MgO:sPPLT 晶体,虽然非线性系数比 MgO:PPLN 晶体小,但是其抗激光损伤阈值相对较高,通光范围也更宽,并且易于极化制作出较厚的晶体(图 1),因此,在高功率中红外 CW-OPO 领域存在巨大的发展潜力。目前,国外在基于 MgO:sPPLT 的 CW-OPO 方面已经开展了研究工作^[8],已经获得了瓦量级的中红外激光输出。在国内,在连续波输出的基于 MgO:sPPLT 晶体的 OPO 研究还未见相关报道。

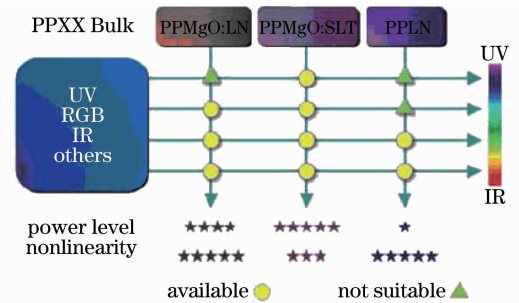


图 1 非线性晶体应用性能比较图

Fig. 1 Performance comparison of nonlinear crystals

由以上分析,MgO:sPPLT 是目前除 MgO:PPLN 晶体之外,中红外连续光学参变振荡器的最佳选择。

3 实验研究进展

3.1 谐振方式的不同

OPO最简单的实现方式是采用单谐振结构(SRO),但这种结构的 OPO 谐振阈值较高。早期由于缺乏大非线性系数的学参变晶体和高质量的抽运源,为解决 SRO 的高阈值,又发展了多种谐振结构的 OPO 腔型,主要包括:双谐振结构(DRO)、内腔单谐振结构(IC-SRO)、抽运增强单谐振结构(PE-SRO)以及三谐振结构(TRO)。

对于中红外连续波 OPO 主要是基于周期性极化晶体(PPLN)实现的。为了保证其输出功率、频率的稳定性和宽调谐性通常采用的是单谐振结构。而对于其他结构的中红外 CW-OPO 虽然可以极大的降低振荡阈值,但由于其系统实现的复杂性和对于抽运源稳定性的高要求,使得人们对其关注减少,目前主要是集中在 IC-SRO 和 PE-SRO 这两种结构的研究。

Lindsay 等^[9]报道了利用 810 nm 的 AlGaAs 激光器抽运 50 mm 长 PPLN 的 PE-SRO 实验。OPO 的阈值约为 25~30 mW。它能够提供 4 mW 的 2.58~3.44 μm 范围闲频光输出。该课题组还利用 PPRTA 晶体,采用相同结构实现了 3.245~3.520 μm 的连续中红外光输出,OPO 的阈值约为 87~250 mW^[7]。

在中红外连续波 IC-SRO 方面,英国圣安德鲁斯大学 Allen 物理研究实验室的 Stothard 等^[10]于 1998 年首次采用 50 mm 的 PPLN,以 IC-SRO 结构,利用 1 W 连续固态 Nd:YVO₄ 激光器抽运,获得了 70 mW 的 3.66 μm 中红外激光,阈值仅为 310 mW。由于 PPLN 的热性能较差,该研究小组的 Carleton 等^[4]采用热性能较好、并且可以在室温下工作的 PPRTA 晶体实现连续波 IC-SRO,阈值抽运功率为 1.6 W。在二极管入射功率为 3 W 时,产生 65 mW 的非谐振 3.52 μm 空闲光输出。利用温度调谐(10 $^{\circ}\text{C}$ ~100 $^{\circ}\text{C}$),空闲光的波长调谐范围分别为 3.41~3.54 μm ,在该实验过程中,未观察到弛豫振荡现象。随后,Stothard 等^[11]对连续波 IC-SRO 中 PPLN 和 PPRTA 的性能做了比较,通过实验发现,在二极管抽运功率为 12 W 时,尽管 PPRTA 的非线性系数明显小于 PPLN,两种情况下闲频光的输出功率都约为 440 mW。采用 PPRTA 晶体的系统输出的激光光束质量、功率以及频率稳定性要优于 PPLN-IC-SRO。他们推断这是因为 PPLN 在高功率时的热透镜效应造成的。2009 年,Stothard 等^[12]又利用 8.5 W 半导体盘片激光器(SDL)抽运,采用 30 mm 长,周期范围为 29.5~32.8 μm 扇形 MgO:PPLN 晶体,以 IC-SRO 结构,获得了 205 mW 的中红外激光,阈值仅为 1.4 W。

天津大学的丁欣等^[13]采用连续 Nd:YVO₄ 激光器抽运,以 IC-SRO 结构,利用周期为 28.5 μm 的 PPLN 晶体,在 3.86 μm 处实现了 155 mW 的连续中红外激光输出。2010 年,颜博震等^[14]通过 40 mm 的 MgO:PPLN 晶体,以 IC-SRO 结构,采用 15.6 W 连续 Nd:YVO₄ 激光器抽运,实现了 3.19 μm 处 1.9 W 连续中红外光输出,如图 2、图 3 所示。

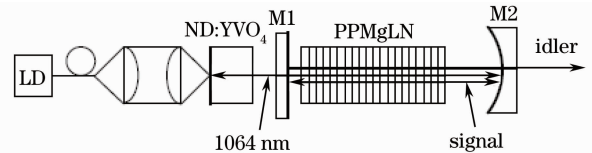


图 2 内腔连续单谐振 OPO 结构图

Fig. 2 Experimental setup of the CW IC-OPO

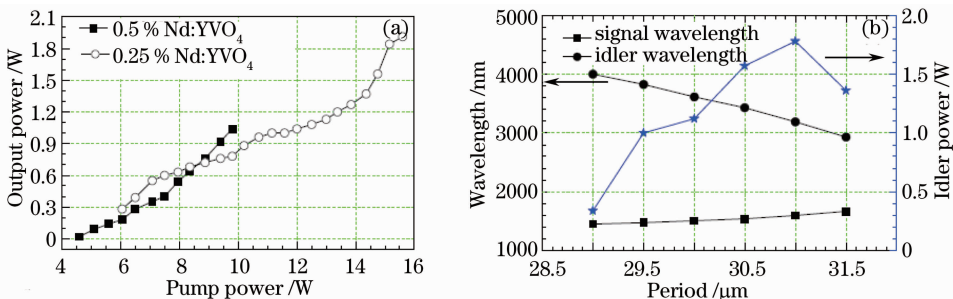


图 3 (a) 闲频光输出功率与抽运功率关系曲线;(b) 信号光波长、闲频光波长和功率与晶体周期关系

Fig. 3 (a) Relation of the idler-wave power versus the pump power; (b) signal/idler wavelengths and idler output power versus the domain period

虽然中红外连续 IC-SRO 结构的阈值比 SRO 结构的低很多,但是就中红外激光输出的功率水平来看还比较低。对于瓦量级以上中红外连续激光输出,目前主要是基于 SRO 结构实现的。

3.2 抽运源的不同

在实现高功率中红外 CW-SRO 上,最先采用的是连续多模 Nd:YAG 激光器。1996 年,Bosenberg 等首先采用单谐振腔结构,在波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 的连续型多模 Nd:YAG 激光器抽运下实现了 PPLN 光学参变振荡,并通过改变畴周期与晶体温度,实现闲频光波长在 $3.98\sim 3.11 \mu\text{m}$ 范围内的调谐^[15]。同年,他们又采用两种不同的单共振环形腔结构,在 13.5 W , $1.064 \mu\text{m}$ 抽运功率下,产生了 3.55 W 的 $3.25 \mu\text{m}$ 的红外闲频光输出,量子效率达到了 86% ^[16]。

由于之前采用多模激光器抽运输出的中红外激光存在线宽较宽的问题,为了降低输出中红外光的线宽,以满足物理、化学以及生物谱分析等领域对于单频、宽调谐中红外连续光 OPO 的应用需求,Chen 等^[17]实现并首次直接测量了由单频连续型 Nd:YAG 激光器抽运 OPO 在 $3 \mu\text{m}$ 输出的 450 mW 单频中红外连续激光,其线宽优于 140 MHz 。而后,Herpen 等^[18~20]进一步采用单频连续型 Nd:YAG 激光器抽运实现了 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 范围瓦量级单频、宽调谐中红外连续激光的输出。

随着二极管激光器的发展,使得近年来出现了采用二级激光器直接抽运的单谐振 OPO^[21,22],大大提高了 OPO 的光光转化效率。2010 年,Nieuwenhuis 等^[23]采用二极管激光器直接抽运 50 mm 长 MgO:PPLN 晶体实现了 $3154\sim 3415 \text{ nm}$ 中红外激光输出,在 3400 nm 输出功率达 1.1 W ,斜效率达到 89% 。

为实现中红外光的快速调谐输出,Siltanen 等^[24]采用单频连续可调谐掺钛蓝宝石($\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$)激光器作为抽运源,实现了连续单谐振 OPO,通过抽运源频率和非线性晶体周期的改变得到 $2.5\sim 3.5 \mu\text{m}$ 和 $3.4\sim 4.4 \mu\text{m}$ 范围中红外激光的输出。抽运光频率扫描范围达到 40 GHz 。

2010 年,檀慧明等采用^[25] 20 W 的 808 nm 半导体激光器阵列(LDA)抽运 Nd:YVO₄ 激光晶体产生 8.75 W 的 1064 nm 波长激光作为抽运光,在连续运转模式抽运下获得了 905 mW 的 $3.2 \mu\text{m}$ 闲频光输出,通过改变晶体的极化周期,实现了闲频光 $3.13\sim 4.20 \mu\text{m}$ 中红外宽带可调谐的连续激光输出。表 1 总结了目前主要高功率中红外 CW-SRO 的性能参数。

表 1 高功率中红外 CW-SRO 性能参数

Table 1 Specifications of high-power mid-infrared CW-SRO

Pump laser	Pump power/ wavelength/ linewidth/ threshold	Output power and wavelength	Tuning range	Configuration	Nonlinear material, period and length
multimode Nd:YAG laser ^[15]	13 W/1064 nm/ 2.2 GHz/4.5 W	1.2 W @3.3 μm	1.45~1.62 μm (signal); 3.11~3.98 μm (idle)	two-mirror linear cavity	single-grating PPLN, 29.75 μm , 50 mm; multiple-grating PPLN, 28~30 μm , 25 mm
multimode Nd:YAG Laser ^[16]	13.5 W/1064 nm/ 2.2 GHz/6 W (linear); 3.6 W (ring)	1.6 W@1.57 μm 3.55 W@3.3 μm	1.45~1.60 μm (signal); 3.24~3.95 μm (idle)	four-mirror linear cavity; four-mirror ring cavity	single-grating PPLN, 29.75 μm , 50 mm; multiple-grating PPLN, 28~29.75 μm , 25 mm
single-frequency Nd:YAG laser ^[18]	10 W/1064 nm/ 5 kHz/3 W	1.5 W@3.3 μm	1.5~1.7 μm (signal); 3.0~3.8 μm (idle)	four-mirror ring cavity	fan-out-grating PPLN, 29.3~30.1 μm , 50 mm
single-frequency Nd:YAG laser ^[19]	11 W/1064 nm/ 5 kHz/5 W@3.9 μm ; 7.5 W@4.7 μm	1.2 W@3.9 μm ; 120 mW@4.7 μm	3.7~4.7 μm (idle)	four-mirror ring cavity	fan-out-grating PPLN, 25.9~28.7 μm , 50 mm
single-frequency Yb:YAG laser ^[20]	18 W/1024~1036 nm/ 5 MHz/8 W	3 W@2.954 μm ; 1.5 W@3.8 μm ; 90 mW@4.16 μm	3.0~4.85 μm (idle)	four-mirror bow-tie ring cavity	single-grating PPLN, 29.3 μm ; fan-out-grating PPLN, 28.5~29.9 μm

续表 1

single-frequency diode laser ^[23]	8.05/1062 nm/4 W	1.1 W@3.37 μm	1.541~1.6 μm (signal); 3.154~3.415 μm (idle)	four-mirror bow-tie ring cavity	multiple-grating PPLN, 28.5~31.0 μm ,50 mm (only used 30.5 μm)
single-frequency Ti:Al ₂ O ₃ laser ^[24]	6 W/775~860 nm/1.5 W	0.8 W	2.5~3.5 μm ; 3.4~4.4 μm (idle)	four-mirror bow-tie ring cavity	multiple-grating PPLN, 21.25~23.25 μm ,50 mm (only used 21.75 μm)

在非线性光学频率转换研究领域,抽运源的光束质量是影响非线性转换效率的主要因素之一。传统的固体激光器在高功率工作时,由于热透镜效应,输出的激光光束质量不易控制,使得非线性转换效率低下。高功率光纤激光器具有良好的散热特性,能够获得较好光束质量的激光,可以作为非线性光学研究领域的优质抽运源。采用光纤激光器抽运的 OPO 相对于其他固体激光器抽运的 OPO 可靠性好,结构更加紧凑,随着近几年高功率光纤激光器技术的逐渐成熟^[26~28],基于光纤激光器抽运的光学参变振荡器为新一代的紧凑型、可调谐、高功率学参变设备提供了新的发展道路。表 2 总结了基于光纤激光器和放大器实现中红外连续波光参变振荡器的研究情况。

表 2 光纤激光器抽运的中红外 CW-SRO 性能参数

Table 2 Specifications of fiber-laser pumped mid-infrared CW-SRO

Pump laser	Pump power/ wavelength/ linewidth/ threshold	Output power and wavelength	Tuning range	Configuration	Nonlinear material, period and length
Yb-doped fiber laser ^[29]	8.3 W/1031~1100 nm/ 3 GHz/3.5 W	1.9 W@3.2 μm	1.515~1.633 μm (signal); 3.057~3.574 μm , 3.0~3.7 μm (idle)	four-mirror bow-tie ring cavity	multiple-grating PPLN, 29.25~30.0 μm ,40 mm
Yb-doped fiber laser ^[30]	6.6 W/1057~1100 nm/ 30~100 GHz	1.13 W@3.2 μm	1.583~1.597 μm (signal); 3.132~3.569 μm (idle)	four-mirror ring cavity	single-grating PPLN, 29.75 μm ,40 mm
Yb-doped fiber laser ^[31]	50 W/1.07 μm	10 W@2.94 μm		four-mirror bow-tie ring cavity	single-grating MgO:PPLN, 31.5 μm ,50 mm
MOPA fiber laser ^[32]	2.8 W/1083 nm/ 50 kHz/780 mW	750 mW@2.7 μm	2.65~3.2 μm	four-mirror bow-tie ring cavity	fan-out-grating MgO:PPLN, 31.3~32.5 μm ,80 mm
single-frequency fiber laser ^[33]	15 W/1064 nm/ 100 kHz/5.8 W	5.1 W@1.65 μm , 3.5 W@3.0 μm		four-mirror bow-tie ring cavity	fan-out-grating MgO:PPLN, 30.8~31.65 μm ,50 mm
Yb-doped fiber laser ^[34]	30 W/1064 nm/ 150 GHz/12 W	16.8 W@1.5 μm , 6.2 W@3.6 μm	1.5~1.94 μm (signal); 2.36~3.6 μm (idle)	four-mirror bow-tie ring cavity	multiple-grating MgO:PPLN; fan-out-grating MgO:PPLN, 29.1~32.5 μm , 50 mm
single-frequency, MOPA, fiber laser ^[35]	52.8 W/1064 nm/ 7.8 W	7.2 W@3.4		four-mirror ring cavity	single-grating PPLN, 30.5 μm , 40 mm
single-frequency fiber laser ^[36]	30 W/1060 nm/ 89 kHz/10 W	9.8 W@1627 nm; 7.7 W@3070 nm	2787~3147 nm	four-mirror bow-tie ring cavity	multiple-grating PPLN, 29.5~31.5 μm ,50 mm

自 2002 年,Gross 等^[29]首次利用掺 Yb³⁺ 的 CW 光纤激光器抽运 40 mm 长的 PPLN 晶体,实现输出为 1.9 W 的中红外 CW-SRO (图 4)以来,人们采用该方案在降低抽运阈值和提高中红外光输出功率上做了大量的工作。2005 年,Chen 等^[31]采用 50 W 的 Yb 光纤激光器抽运 MgO:PPLN 晶体,在 2.94 μm 处获得了 10 W 的中红外光输出。2010 年,Henderson 等^[34]利用同样结构在 3.6 μm 处得到 6.2 W 的中红外连续光输出。

基于光纤激光器抽运的 OPO 实现单频中红外连续光输出,一直是人们关注的热点。2006 年, Henderson 等^[32]首次实现了基于光纤激光器抽运单频中红外连续光百毫瓦量级输出的 OPO,闲频光线宽约 1.1 MHz。之后,他们又实现了瓦量级的单频中红外连续光输出,闲频光线宽约 30 kHz^[33]。

L. Liu 等^[35]通过 52.8 W MOPA 结构的光纤放大器抽运 40 mm 长 MgO:PPLN 晶体,采用四镜环形腔结构,实现 3.4 μm 处输出为 7.2 W 的中红外 CW-SRO。具体实验装置和输出结果如图 5、图 6 所示。

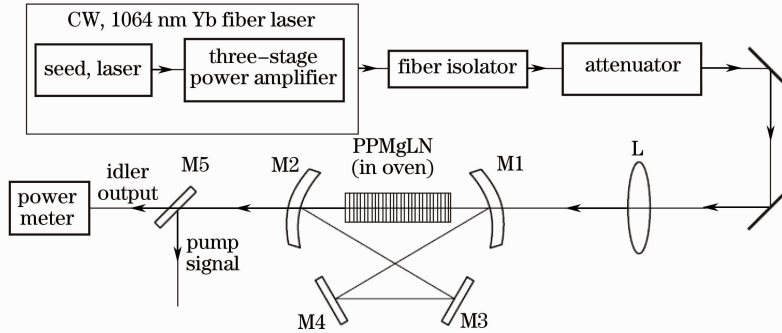


图 5 基于光纤激光器抽运的连续中红外 OPO 结构图

Fig. 5 Fiber-laser pumped mid-infrared CW-OPO

4 相关理论与特性分析进展

早在 1962 年, Armstrong 就提出了准相位匹配 (QPM) 概念^[37],它通过周期性的改变介质非线性系数的方向,实现对非线性系数的周期性调制,以补偿二次谐波产生过程中基频光波与二次谐波色散引起的相位失配,加强基频光波向二次谐波的有效转换。准相位匹配理论上能够利用晶体的整个透光范围和晶体最大的非线性系数,避免空间走离效应,非线性转换效率高,而且调谐方式简单、多样。过多年来人们不断在理论上和在实验中对它丰富和完善,形成了一整套比较完善的理论体系^[38~41]。到了 20 世纪 90 年代,随着 PPRTA、MgO:sPPLT、PPLN、MgO:PPLN 等高质量周期性极化晶体的出现,极大的推动了高功率连续波 OPO 的发展,这也使得人们对于基于 QPM 的 CW-OPO 的相关特性进行了进一步全面较深入的研究。

Moore 等^[42]利用数值模型分析了连续多模掺镱光纤激光器抽运的单谐振 OPO 的输出信号光,发现信号光输出光能够达到近衍射极限的光束质量。Moore 等^[43]通过建立基于 QPM 的 CW-SRO 数值分析模型,详细分析了 OPO 中的热效应和模式竞争问题。Rosencher 等^[44]给出了用于计算连续 SRO、DRO 和 PE-OPO 阈值、输出功率和振荡频率的数学模型,这些模型为被广泛应用于对连续 OPO 的计算分析当中。邓诚先等^[45]结合格林函数和微扰近似,给出了稳态 SRO 的阈值和转化效率的分析模型。

在连续波内腔单谐振光学学参变振荡器 (IC-SRO) 方面,1998 年,Turnbull 等^[46]对多模运转情况下连续波 IC-SRO 进行了功率特性、稳定特性和瞬态特性的分析,他们的分析表明内腔单谐振光学学参变振荡器不存在内腔双谐振光学学参变振荡器和腔内倍频激光器的不稳定现象,并指出信号光的腔光子寿命越长,功率稳定性越好。1999 年,他们对理论进行了修正,并做了实验验证^[47]。2005 年,邓诚先等^[48]建立了描述内腔连续波单

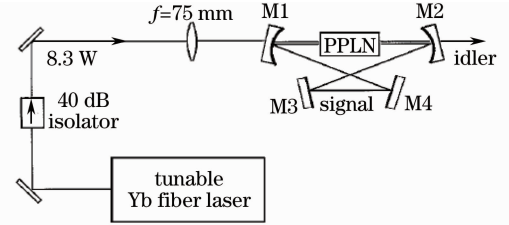


图 4 Gross 等实现的光纤激光器抽运的 CW-SRO

Fig. 4 Experimental setup of the fiber-laser pumped CW-SRO of P. Gross et al

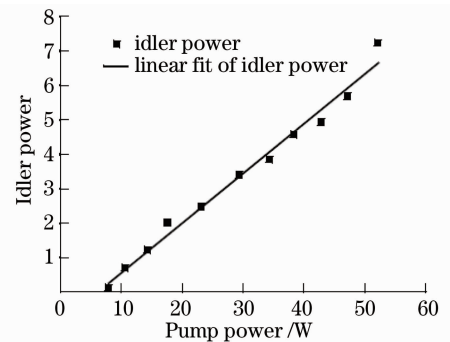


图 6 3.4 μm 闲频光输出功率与抽运功率关系曲线

Fig. 6 Idler output power at 3.4 μm versus pump power

谐振光学学参变振荡器功率特性的高斯光束理论。他们将激光谐振腔内的二阶非线性相互作用视为激光器的一种输出损耗,求解描述激光器功率特性的方程,得到激光器的非线性反射率,进而得出内腔连续波单共振光学学参变振荡器的信号光和闲频光的功率特性。

在热效应分析方面,1995年,Bames等^[49]分析了外腔式OPO中非线性晶体的热负载、热透镜焦距等问题,给出了热透镜焦距的计算公式,为更准确地研究外腔式OPO的运转特性提供了很好的帮助。1998年,Lowenthal^[50]提出了基于PPLN晶体的CW-SRO在4.5 μm光输出时的平面波分析模型,重点分析了转化效率,在晶体的强吸收条件下闲频光输出和热致相位失配问题。分析表明通过选择合适长度的晶体和信号光输出耦合率可以实现在强吸收条件下闲频光的大功率输出,同时晶体对于闲频光的强吸收在一定程度上有利于信号光转化效率的改善。2009年,Vainio等^[51]通过实验的方式,比较系统的分析了在3 μm波段瓦量级中红外光输出的CW-SRO,由于非线性晶体吸收信号光所产生的热效应对于其稳定性和调谐特性的影响。重点分析了CW-SRO中光学双稳态效应和热自锁效应。分析表明即使通过调整耦合输出的方式限制谐振腔内振荡信号光功率大小,OPO仍将会受到自锁效应的影响。如果对晶体内热效应进行有效控制,可以在腔内不加标准具或OPO外部无稳定性控制设备的情况下,实现OPO频率和功率的长期稳定性。

5 总结与展望

目前,中红外连续OPO由于周期性极化晶体材料的吸收特性限制,能够实现1.5~5 μm范围,功率从百毫瓦到十瓦量级的高稳定性、宽调谐的光束质量接近衍射极限光输出。这使得其能够广泛应用于物理、化学以及生物谱分析等领域。它的发展趋势可总结为以下几点:

- 1) 随着技术的提高以及新的极化方法的发明,将来可以得到通光孔径更大以及光学性能更好的非线性晶体,以进一步提高中红外连续OPO的各项性能指标。对于波长大于5 μm的连续光输出,将继续发展理想的周期性极化材料,达到对于大于5 μm波段的高光学质量、低吸收系数和长相干长度的要求;
- 2) 基于不同特性抽运光源的研究,以进一步提高OPO的性能并满足应用需求。如椭圆形高斯光束抽运^[52]、涡旋光抽运^[53]等;
- 3) 利用标准具、光栅以及棱镜等技术来压缩学参变光的线宽,以期获得更窄线宽的OPO输出;
- 4) 利用光纤激光器技术,发展全固化宽调谐高功率连续OPO,它具有高效率、长寿命、结构紧凑、体积小、重量轻等特点。它是中红外激光器未来发展的方向,并将会在激光测距、光电对抗和激光制导等领域得到广泛应用。

可以预见随着半导体激光、光纤激光等技术的快速发展和人们对新型非线性材料的研究,中红外连续OPO将会朝着更加实用化的方向发展,并在其应用领域发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- 1 J. A. Giordmaine, R. C. Miller. Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO₃ at optical frequencies[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, **14**(24): 973~976
- 2 R. G. Smith, J. E. Geusic, H. J. Levinstein *et al.*. Continuous optical parametric oscillator in Ba₂NaNb₅O₁₅[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **12**(9): 308~310
- 3 R. L. Byer, M. K. Oshman, J. F. Young *et al.*. Visible CW parametric oscillator[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **13**(3): 109~111
- 4 A. Carleton, D. J. Stothard, I. D. Lindsay *et al.*. Compact, continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled RbTiOAsO₄ in a Nd:YVO₄ laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(7): 555~557
- 5 I. Lindsay, D. Stothard, C. Rae *et al.*. Continuous-wave, pump-enhanced optical parametric oscillator based on periodically-poled RbTiOAsO₄[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(2): 134~140
- 6 A. Kuroda, S. Kurimura, Y. Uesu. Domain inversion in ferroelectric MgO:LiNbO₃ by applying electric field[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(11): 1565~1567
- 7 Angus Henderson, Ryan Stafford. Low threshold, singly-resonant CW OPO pumped by an all-fiber pump source[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2): 767~772
- 8 S. Chaitanya Kumar, M. Ebrahim-Zadeh. High-power, continuous-wave, mid-infrared optical parametric oscillator based on

- MgO:sPPLT[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(13): 2578~2580
- 9 I. D. Lindsay, C. Petridis, M. H. Dunn *et al.*. Continuous-wave pump-enhanced singly resonant optical parametric oscillator pumped by an extended-cavity diode laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(7): 871~873
- 10 D. J. M. Stothard, M. Ebrahimzadeh, M. H. Dunn. Low-pump-threshold continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(24): 1895~1897
- 11 D. J. M. Stothard, P. Y. Fortin, A. Carleton *et al.*. Comparison of continuous-wave optical parametric oscillators based on periodically poled LiNbO₃ and periodically poled RbTiOAsO₄ pumped internal to a high-power Nd:YVO₄ laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(10): 2102~2108
- 12 D. J. Stothard, J-M. Hopkins, D. Burns *et al.*. Stable, continuous-wave, intracavity, optical parametric oscillator pumped by a semiconductor disk laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(13): 10648~10658
- 13 Ding Xin, Zhang Shaomin, Ma Hongmei *et al.*. Continuous-wave mid-infrared intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Chin. Phys. B*, 2008, **17**(1): 211~216
- 14 Yan Boxia, Bi Yong, Zhou Mi *et al.*. Highly Efficient continuous-wave mid-infrared intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on MgO:PPLN[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(12): 124203
- 15 W. R. Bosenberg, D. Alexander, J. I. Alexander. Continuous-wave single resonant optical parametric oscillator based on periodically poled LiNbO₃[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(10): 713~715
- 16 W. R. Bosenberg, A. Drobshoff, J. I. Alexander *et al.*. 93% pump depletion, 3.5 W continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1336~1338
- 17 D. Chen, D. Hinkley, J. Pyo *et al.*. Single-frequency low-threshold continuous-wave 3 μm periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(6): 1693~1697
- 18 M. van Herpen, S. te Lintel Hekkert, S. E. Bisson *et al.*. Wide single-mode tuning of a 3.0~3.8 μm, 700 mW, continuous-wave Nd:YAG-pumped optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(8): 640~642
- 19 M. M. J. W. van Herpen, S. E. Bisson, F. J. M. Harren *et al.*. Continuous-wave operation of a single-frequency optical parametric oscillator at 4-5 μm based on periodically poled LiNbO₃[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(24): 2497~2499
- 20 M. M. J. W. van Herpen, S. E. Bisson, A. K. Y. Ngai *et al.*. Combined wide pump tuning and high power of a continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Appl. Phys. B-Lasers Opt.*, 2004, **78**(3-4): 281~286
- 21 M. E. Klein, D. H. Lee, J. P. Meyn *et al.*. Singly resonant continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a diode laser[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16): 1142~1144
- 22 M. E. Klein, C. K. Laue, D. H. Lee *et al.*. Diode-pumped singly resonant continuous-wave optical parametric oscillator with wide continuous tuning of the near-infrared idler wave[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(7): 490~492
- 23 Ab F. Nieuwenhuis, Chris J. Lee, Bernd Sumpf *et al.*. One-Watt level mid-IR output, singly resonant, continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a monolithic diode laser[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(11): 11123~11131
- 24 Mikael Siltanen, Markku Vainio, Lauri Halonen *et al.*. Pump-tunable continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator from 2.5 to 4.4 μm[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(13): 14087~14092
- 25 Tan Huiming, Lin Hongyi, Zhang Bolin. Mid-infrared tunable all-solid-state optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. *Chin. J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2303~2308
- 檀慧明, 林洪沂, 张搏麟. 基于 PPMgLN 的中红外全固态可调谐光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2303~2308
- 26 A. Piper, A. Malinowski, K. Furusawa *et al.*. High-power, high brightness, mJ Q-switched ytterbium-doped fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(15): 928~929
- 27 K. T. Vu, A. Malinowski, F. Richardson *et al.*. Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond fiber MOPA system[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(23): 10996~11001
- 28 Yanxing Ma, Xiaolin Wang, Jinyong Leng *et al.*. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 951~953
- 29 P. Gross, M. E. Klein, T. Walde *et al.*. Fiber-laser-pumped continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(6): 418~420
- 30 M. E. Klein, P. Gross, K. -J. Boller *et al.*. Rapidly tunable continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(11): 920~922
- 31 D. W. Chen, T. S. Rose. Low noise 10 W generation near 3 μm with MgO doped PPLN[C]. CLEO 2005. 1829~1831
- 32 A. Henderson, R. Stafford. Low threshold, singly-resonant CW OPO pumped by an all-fiber pump source[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2): 767~772

- 33 A. Henderson, R. Stafford. 8.6 watt, single frequency CW OPO[C]. *SPIE*, 2007, **6455**: 64550E
- 34 A. Henderson, P. Esquinasi. 23 Watt, 77% efficient CW OPO pumped by a fiber laser[C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 75800D
- 35 L. Liu, X. B. Wang, X. Li *et al.*. All fiber MOPA laser-pumped, continuous-wave, mid-infrared, singly-resonant optical parametric oscillator based on periodically poled MgO-Doped LiNbO₃[J]. *Laser Phys.*, 2011, **21**(10): 1704~1707
- 36 S. Chaitanya Kumar, R. Das, G. K. Samanta *et al.*. Optimally-output-coupled, 17.5 W, fiber-laser-pumped continuous-wave optical parametric oscillator[J]. *Appl. Phys. B-Lasers Opt.*, 2011, **102**(1): 31~35
- 37 J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing *et al.*. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric[J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(6): 1918~1939
- 38 L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer *et al.*. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(11): 2102~2116
- 39 Mathieu Charbonneau-Lefort, Bedros Afeyan, M. M. Fejer. Optical parametric amplifiers using chirped quasi-phase-matching gratings I: practical design formulas[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(4): 463~480
- 40 Mathieu Charbonneau Lefort, Bedros Afeyan, M. M. Fejer. Optical parametric amplifiers using nonuniform quasi-phase-matched gratings II: Space-time evolution of light pulses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(4): 683~700
- 41 S. J. Brosnan, R. L. Byer. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1979, **15**(6): 415~431
- 42 Gerald T. Moore, Craig A. Denman, T. Sean Ross. Using multiple mutually incoherent fiber lasers to pump a coherent signal beam in an optical parametric oscillator[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(7): 828~834
- 43 R. O. Moore, G. Biondini, W. L. Kath. Self-induced thermal effects and modal competition in continuous-wave optical parametric oscillators[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 802~811
- 44 E. Rosencher, C. Fabre. Oscillation characteristics of continuous-wave optical parametric oscillators: beyond the mean-field approximation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(5): 1107~1116
- 45 ChengXian Deng, Zhengjia Li, Changhong Zhu. Focusing dependence of the threshold and efficiency of a singly resonant optical parametric oscillator: generalized analysis[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **238**(4-6): 371~386
- 46 G. A. Turnbull, M. H. Dunn, M. Ebrahimzadeh. Continuous-wave, intracavity optical parametric oscillators: an analysis of power characteristics[J]. *Appl. Phys. B-Lasers Opt.*, 1998, **66**(6): 701~710
- 47 G. A. Turnbull, D. J. M. Stothard, M. Ebrahimzadeh *et al.*. Transient dynamics of CW intracavity singly resonant optical parametric oscillators[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(11): 1666~1671
- 48 Deng Chengxian, Li Zhengjia, Zhu Changhong. Intracavity continuous-wave optical parametric oscillator: Gaussian beam theory[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 791~797
- 邓诚先, 李正佳, 朱长虹. 内腔连续波光学参量振荡器: 高斯光束理论[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 791~797
- 49 N. P. Barnes, J. A. Williams-Byrd. Average power effects in parametric oscillators and amplifiers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(1): 124~131
- 50 D. D. Lowenthal. CW periodically poled LiNbO₃ optical parametric oscillator model with strong idler absorption[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **34**(8): 1356~1366
- 51 M. Vainio, J. Peltola, S. Persijn *et al.*. Thermal effects in singly resonant continuous-wave optical parametric oscillators[J]. *Appl. Phys. B-Lasers Opt.*, 2009, **94**(3): 411~427
- 52 Xie Gang, Peng Yuefeng, Wang Weimin *et al.*. High-power mid-infrared 3.8 μm lase[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(7): 970~972
- 谢刚, 彭跃峰, 王卫民等. 高功率中红外 3.8 μm 激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(7): 970~972
- 53 K. Miyamoto, S. Miyagi, M. Yamada *et al.*. Optical vortex pumped mid-infrared optical parametric oscillator[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(13): 12220~12226