Vol. 43, No. 8 August, 2013

文章编号:1001-5078(2013)08-853-06

·综述与评论 ·

# 中红外激光技术研究进展

刘尊洋, 卞进田, 邵 立, 汪亚夫, 孙晓泉 (脉冲功率激光技术国家重点实验室电子工程学院, 安徽合肥 230037)

**摘** 要:中红外激光技术在激光通信、遥感技术、光谱分析和军事等方面都有重要的作用。介 绍了产生中红外激光的各种方式,综述了其技术特点和进展情况。首先介绍了线性光学方法 产生中红外激光的技术,如固体激光器、半导体量子级联激光器、自由电子激光器、化学激光器 等的进展;然后对基于物质二阶非线性作用产生中红外激光的光学倍频激光器和光参量激光 器的进展进行了介绍;最后讨论了中红外激光技术的现状和发展趋势。

关键词:激光;中红外;线性光学;非线性光学

中图分类号:TN241 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.08.002

# Progress of mid-infrared laser technology

LIU Zun-yang, BIAN Jin-tian, SHAO Li, WANG Ya-fu, SUN Xiao-quan

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract:Mid-infrared laser has very important applications in many fields such as laser communication, remote sensing, spectroscopy and countermeasure. Methods of producing mid-infrared lasers are introduced. Progress and characteristics of mid-infrared laser technology are summarized. The discussion includes two aspects. One is the linear methods such as the solid laser, semiconductor quantum cascade laser, free-electron laser and chemical laser. The other is the nonlinear ways based on second-order nonlinearity such as the frequency-doubled laser and optical parametric laser. Finally, the status and the prospect of mid-infrared lasers are analyzed.

 $Key \ words: {\tt laser; mid-infrared; linear optics; nonlinear optics}$ 

#### 1 引 言

中红外波段不仅是衰减最小的大气窗口,而且还覆盖了众多原子及分子的吸收峰,所以该波段激光在光谱学、遥感、医疗、通信及军事等诸多领域都有重要的应用价值和前景<sup>[1]</sup>。因此,中红外激光技术成为国内外激光工作者研究的热点。

中红外激光有多种产生方式,总体上可以分为 线性和非线性两种。线性方法主要包括固体激光 器、半导体量子级联激光器、自由电子激光器和化学 激光器等;有非线性方法:如借助物质二阶非线性作 用的光学倍频激光器和光参量技术激光器。本文将 分别综述其基本特点和最新的研究进展。

#### 2 线性方法产生中红外激光

2.1 固体中红外激光器 固体激光器是以掺杂的玻璃、晶体或透明陶瓷 等固体材料为工作物质的激光器。固体激光器具有 结构紧凑、小巧、牢固、灵活等优点,但由于掺杂离子 的限制,固体激光器的输出波长多数在1~2 μm 范 围内,中红外固体激光技术一直以来发展缓慢。

近年来,人们发现了可以直接发出中红外激光的工作物质,如过渡族元素掺杂二元或三元硫族化 合物<sup>[2-5]</sup>和 Dy<sup>3+</sup>:PbGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>(Dy:PGS)晶体<sup>[6]</sup>,大大促 进了固体中红外激光器的发展。

2.1.1 过渡族元素掺杂二元或三元硫族化合物激 光器

最近几年, 掺过渡金属(如 Cr<sup>2+</sup>或 Fe<sup>2+</sup>)二元

收稿日期:2013-01-06

基金项目:国家重点实验室基金项目(No. 10J006)资助。

**作者简介**:刘尊洋(1984 - ),男,博士研究生,研究方向为目标的红外辐射特性。E-mail:liukp2003@163.com

(如 ZnSe, ZnS, CdS, ZnSe) 和 三 元 (如 Cd MnTe, CdZnTe,ZnSTe) 硫族化合物因增益带宽宽(可达中心 波长 50%),在中红外波段具有强而宽的吸收和发射 带宽(如图1、图2所示)成为中红外激光技术研究的 一个热点。从图2可以看出,Fe:ZnSe 在人们非常感 兴趣的4~5  $\mu$ m 波段附近有较强的辐射能力。过渡 族元素掺杂二元或三元硫族化合物激光器的最新研 究进展如表1所示<sup>[2-5]</sup>。从表1可以看出,目前使用



图 1 掺 Cr<sup>2+</sup>晶体常温下的吸收和发射曲线 (右上角嵌入的是 Cr<sup>2+</sup>离子在 ZnS(圆) ZnSe(三角)和 CdSe(方)晶体内的寿命曲线)



- 图 2 掺 Fe<sup>2+</sup> 晶体室温下的吸收和发射曲线
   (右上角嵌入的是 Fe<sup>2+</sup>离子在 ZnSe(三角)和 CdMnTe(圆)晶体内的寿命曲线)
- 表1 过渡族元素掺杂二元或三元硫族化合物 激光器研究进展<sup>[2-5]</sup>

材料	发射波长/µm	平均功率/能量	制式	时间
Cr:ZnSe	2.0 ~ 3.1	12.5 W	CW	2009
Cr:ZnSe	2.65	1.1 J@7 ms	Pulse	2012
Fe:ZnSe	3.95 ~ 5.05	187 mJ@ ,300 μs,85 k	Pulse	2006
Fe:ZnSe	3.95 ~ 5.05	0.4 mJ@60 ns,300 k	Pulse	2006
Fe:ZnSe	4.3,4.37	4.7 mJ@4.3 μm,15 ns, 236 k 3.6 mJ@4.37 μm, 15 ns,300 k	Pulse	2011
Fe:ZnSe	4.14~4.65	0.42 J@4.14 μm,77 k	Pulse	2012

该技术已经可以实现平均功率十瓦级和单脉冲能量 百毫焦的中红外激光输出。使用 FeZnSe 输出 4.3 μm激光的主要问题是随温度升高效率严重降 低以及难以获得高性能的 3 μm 泵浦源。 2.1.2 Dy<sup>3+</sup>:PbGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 激光器

 $Dy^{3+}$ :PbGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>(Dy:PGS) 是一种非常优秀的常 温中红外激光工作物质<sup>[6]</sup>,Dy<sup>3+</sup>的能级图如图 3 所 示,它具有宽的吸收谱带,且位于容易得到泵浦源的 短波,吸收谱如图 4 所示,其在室温条件下,使用 Er:YLF 泵浦时的光谱分布如图 5 所示。目前已能 实现在 4.3 µm 输出功率高达 160 mJ。并且在没有 任何制冷条件下,在 4.3 µm 输出接近高斯分布的 激光束,斜效率高达 8%。Dy:PGS 激光器的最新研 究进展列于表 2<sup>[6]</sup>。



图 5 使用高能量 Er: YLF 泵浦时 Dy: PGS 的输出光谱分布(室温)

表 2 Dy: PGS 激光器的最新研究进展<sup>[6]</sup>

时间	泵浦源	发射 波长/µm	平均功 率/能量	斜效 率/%
2010	Nd:YAG 480 mJ@1.32 μm	4.3	160 mJ	4
2010	Er:YAP1.66 μm	4.3	0.275 mJ	
2011	Er:YLF90 mJ@1.73 μm	4.33,4.60	7 mJ,80 μs	8

#### 2.2 半导体量子级联激光器

半导体量子级联激光器(QCL)是基于电子在导带子能级间跃迁和共振声子辅助隧穿实现光激射的,其激射波长由有源区阱层和垒层的厚度决定而与材料带隙无关,理论预测可覆盖几个微米至250 μm以上很宽的波长范围,从根本上解决了自然界缺少带隙位于中远红外波段理想的半导体激光材料所导致的中远红外半导体激光领域研究长期处于停滞不前的状态<sup>[7]</sup>。QCL 的级联效应允许一个电子产生多个光子,其光子数目等于QCL 的级数,由此提高了量子效率。

1994年,瑞典科学家等人首次在(Science)上报 道了第一个10k下激射的4.6 μm QCL,其输出功 率仅为8 mW。目前,已研制出波长覆盖2.63~ 360 μm 的单极型 QCL。表3<sup>[7-9]</sup>给出了量子级联 激光器产生中红外激光的进展。

目前量子级联激光器还存在一些问题,如工艺 要求高,阈值电流密度大,工作温度低,输出功率小, 光束质量差等,但是,随着科技的发展,中远红外 QCL以它的小型、实时、远程、高分辨、高灵敏度、宽 光谱范围连续单模调谐的优势,将在气候变化与环 境污染在线实时监测、非侵入医学诊断、国土和社会 安全、大气保密通信等应用方向和战略性新兴产业 发挥重要的实用价值<sup>[7]</sup>。

表	3	中	红	外	틑	子	级	联	激	光	器	研	究	讲	展	[7	-9	<i>י</i> ן
~~~	-		10	Z I			-//~	· * 1/ \	1/1/1	211	· uu	· / I		while the	102			

时间	波长/um	亚杓功索/m₩/沮産/k	运行制式
1111	ix iC μm	均匀丰/ ⅲΨ/ 裇皮/ к	进行的政
2002	9.1	17@292 k	连续
2006	5.25	480@363 k	连续
2007	3.6~3.8	10500@77 k	脉冲

2.3 自由电子激光器

自由电子激光器是利用相对论电子束通过一个称为摇摆器的周期变化的横向磁感应场来与电磁辐射相互作用产生激光的装置。由于相对论电子束有很高的功率密度,工作介质又是自由电子,不存在击穿问题,因此自由电子激光器能产生很高的功率。自由电子激光器输出波长与电子束能量有关,容易连续调谐,工作的频率范围可以很宽,从厘米波到纳米波。自由电子激光器的缺点是体积庞大、价格昂贵。

Los Alomas 实验室开发的先进自由电子激光器 (AFEL)<sup>[10]</sup>占地面积 12.16 m×21.28 m,主要有控 制室、激光室和拱顶室组成。表 4 是 AFEL 装置首

轮实验结果。

表4 AFEL装置首轮实验结果

激光波长	宏脉冲能量	宏脉冲长度	微脉冲平均能量	激光功率
4.7 μm	7 mJ	2 μs	30 µ.J	3 MW

由于自由电子激光器的波长容易调谐,适合气象环境多变导致"最佳大气窗口"多变的海上使用。 2004年,杰弗逊国家实验室(JEFFERSON LAB)的自由电子激光器获得了14.2 kW(1.61 μm)发射功率的出光水平。2009年,美海军授权波音公司作为承包商,研制100 kW 的舰载自由电子激光武器演示样机系统。预计2025年将实现舰载兆瓦级自由电子激光武器服役,主要用于拦截弹道导弹,其能力也可用于攻击临近空间飞行器和低轨卫星。

2.4 化学激光器

化学激光器靠化学反应提供能源,具有输出能量大和光束质量好的优点。1983年,美国建成了输出功率达2.2 MW的DF化学激光器 MIRAC L(至今最大)<sup>[11]</sup>,光束质量达2倍衍射极限。1992年, ALPHA-II HF化学激光器将功率提高到5 MW,且 光束质量接近衍射极限。表5为常用化学激光器的 部分参数。

表5 化学激光器参数

激光器	波段	最大功率/MW	大气透过率/%
氟化氢(HF)	2.7~2.9	5	0 ~ 10
氟化氘(DF)	3.6~4.1	2.2	约100
化学氧碘(COIL)	1.32	3	大于等于95

化学激光器以其功率大、光束质量高等优点,受 到各国激光武器研究人员的青睐,ALPHA-II被列 入天基激光武器(IFX)计划,1997年进入ALI(AL-PHA-LAMP)一体化试验阶段。整个预计IFX预计 到2013年服役。1996年,美国开始和以色列联合 研制战术高能激光武器系统(THEL),多次在试验 中成功跟踪与摧毁目标,后又研制机动THEL (MTHEL),主体都是DF化学激光器<sup>[12]</sup>。对于机载 COIL,美国进行了有益的尝试。2010年2月12日, 美国导弹防御局宣布,"机载激光器"(ABL)系统于 11日成功击落一枚弹道导弹。

化学激光器的缺点是体积庞大,产生有毒的化 学副产品,同时需要消耗费用昂贵的气体。

#### 3 非线性方法产生中红外激光

3.1 倍频激光器

倍频激光器利用远红外脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器倍频 产生 3~5 μm 激光。能够用于 CO<sub>2</sub> 激光器倍频的 晶体很多,晶体匹配方式分 BPM 和 QPM 两种,具体 包括 Te, Ag<sub>3</sub>AsS<sub>3</sub>, AgGaS<sub>2</sub>, LiInSe<sub>2</sub>, GaAs 和 ZnSe 等 多种,其中 AgGaSe<sub>2</sub> 能获得大尺寸单晶且红外波段 透过率高,是目前国内外研究最多的倍频晶体<sup>[13]</sup>。

对于采用脉冲 TEA CO<sub>2</sub> 激光器泵浦 AgGaSe<sub>2</sub> 晶体获得中红外波段输出的技术而言,目前已见报 道的各个单项最高指标为<sup>[14]</sup>:最高倍频转换效率 56%;最大单脉冲倍频能量输出 350 mJ;最高平均 功率输出 3.9 W。上述最佳指标分别是在完全不同 的参数条件下获得的,尚未见在同一实验中达到上 述指标的报道。2009 年,中国长春光机所使用 9.3 μm 倍频输出 4.6 μm 的实验,得到最大单脉冲 能量 12.9 mJ,平均功率 940 mW,实验装置如图 6 所示<sup>[14]</sup>。



图6 激光倍频实验装置 3.2 光参量技术产生中红外激光

光参量技术能够产生宽光谱可调谐激光输出, 并能将现有的激光波长转换到传统激光器无法达到 的波段。随着性能优良抽运源和中红外非线性晶体 技术的发展,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。固体光参量振荡激光器以其宽光谱调谐 范围、高效率、高功率、高重复频率及小型化、固体化 等特点在军事对抗、大气环境监测、光雷达以及光谱 学研究等诸多领域有重要应用<sup>[15]</sup>。

目前能够用于中红外 OPO 的晶体有 LiNbO<sub>3</sub>, LiIO<sub>3</sub>,KTP,ZnGP<sub>2</sub>和 AgCaS<sub>2</sub>等,图 7 为常用 OPO 晶体输出连续或纳秒脉冲激光光谱覆盖范围<sup>[16]</sup>。 本文主要介绍 ZGP 和 LiNbO<sub>3</sub>两种晶体技术 的进展。



wavelength∕µm

图 7 常用 OPO 晶体输出连续或纳秒脉冲激光光谱覆盖范围 (完全填充部分为已经实现有效输出的光谱范围,阴影填充部 分为由于多声子吸收出光效率较低的光谱范围。) 3.2.1 ZGP OPO

ZGP 晶体具有非常高的非线性系数(75 pm/ V),在2~12 μm 波段良好的透过性以及导热性等, 所以成为了获取中红外激光输出的首选。由于 ZGP 对波长短于2 μm 的激光吸收较强,国内外绝大部 分的报道集中在利用波长大于2 μm 激光泵浦 ZGP OPO 产生中红外激光输出。常用的泵浦方法主要 有两种:一种是直接利用掺 Tm,Ho 的激光得到;另 一种是使用级联激光器得到,如利用1.9 μm 掺 Tm 激光泵浦掺 Ho 激光和利用1.06 μm 激光泵浦 KTP OPO 或周期性极化晶体(PPKTP 或 PPLN)OPO。

目前,使用 ZGP OPO 产生中红外输出,在 3~ 5 μm 波段输出达到 12.6 W<sup>[17]</sup>,在 ZGP OPO 输出中 红外激光后再级联光参量放大(OPA)器,单脉冲能 量可以达到 33 mJ<sup>[18]</sup>。表 6 和表 7 分别列举了近年 来直接泵浦和级联泵浦 ZGP OPO 的研究进展情况。

表6 直接泵浦 ZGP OPO 研究进展

时间	泵浦源	结构	波长/µm	平均功率 /能量/W
2010 <sup>[19]</sup>	Ho: YAG	ZGP OPO	3.06~6.6	1.44
2010 <sup>[20]</sup>	Ho: YAG	ZGP OPO	4.72	2
2012[21]	Tm, YAP	ZGP OPO	3.88,4.00,4.14	7.16

表7 级联泵浦 ZGP OPO 研究进展

时间	泵浦源	结构	波长/μm	平均功率 /能量
2008 <sup>[22]</sup>	Nd: YAG PPKTP OPO	ZGP OPO	3.7~4 4.5~5	3.18 W
2008 <sup>[17]</sup>	掺 Tm <sup>3 +</sup> 光纤功率/W	Ho: YAG ZGP OPO	3~5	12.6 W
2008[18]	Nd: YAG	KTP MOPA ZGP MOPA	2.8(一级) 3~5	8 mJ@2.8 μm 33 mJ@4.7 μm 8 mJ@8 μm
2010 <sup>[23]</sup>	Nd: YAG	MgO:PPLN ZGP OPO	2.5 3.8~4.5 5.65~5.7	3 W@2.5 μm 800 mW@4.0 μm
2011 <sup>[24]</sup>	Nd: YAG	KTP OPO ZGP OPO	2.7 4.3	2 mJ 76 μJ
2008[25]	Ho: YLF MOPA 55 mJ	ZGP OPO	3.4 µm	30 mJ

#### 3.2.2 PPLN/ PPMgLN OPO

PPLN 和准相位匹配(QPM)技术的迅速发展使 PPLN OPO 成为中红外 OPO 研究热点。由于掺 MgO 的 PPLN 晶体(PPMgLN)能显著提高抗激光损 伤阈值,且可以有效降低晶体的极化矫顽场, PPMgLN 成为实现 QPM OPO 最常见的铁电材 料<sup>[26]</sup>。目前,PPLN/ PPMgLN OPO 中红外输出功率 在 2.73  $\mu$ m 可以达到 36.7 W<sup>[27]</sup>。表 8 汇总了近年 来国内外 PPLN/PPMgLN OPO 输出中红外激光的发 展现状。

限制 PPLN/PPMgLN 的主要因素是, PPMgLN 晶体加工厚度一般为0.5~1 mm, 且损伤阈值较低, 限制了泵浦功率水平, 不易实现较高能量的输出, 另外, LN 晶体对波长长于 3.8 µm 的中红外激光吸收显著增大, 且波长越长吸收越严重, 限制了该波段大功率参量激光输出。目前, 日本分子科学激光研究中心已经加工了厚度为 3 mm 和 5 mm 的 PPMgLN 晶体, 随着 PPMgLN 晶体加工技术的发展, 晶体厚度加大后, 就有可能获得更高功率中红外激光输出。

## 表 8 国内外 PPLN/PPMgLN OPO 输出中

4	工外	激光	的	发	展	现丬	犬

时间	泵浦源	结构	波长	平均功率
2010 <sup>[28]</sup>	掺铥光 纤激光 器 1.55 μm	PPMgLN OPO	3.7 ~ 4.7 μm	37 mW@4µm
2012 <sup>[29]</sup>	Nd: YVO4	PPLN OPO	3.66 μm 4.22 μm	1.54 W 约 0.2 W
2009 <sup>[30]</sup>	Nd: YAG	PPMgLN OPO	2.83 ~ 4.79 μm	2.17 W@3.33 μm
2010 <sup>[31]</sup>	Nd: YAG	PPMgLN OPO	1.47 3.894	46 W 16.7 W
2010 <sup>[27]</sup>	Nd: YAG	PPMgLN OPO	2.6 ~ 3.0 μm	36.7 W@2.73 μm
2010 <sup>[32]</sup>	Nd: YVO <sub>4</sub>	PPMgLN OPO	3.2 3.13~ 4.20	0.905 W(连续) 1.13 W(主动调 Q) 0.125 W(被动调 Q)
2011 <sup>[33]</sup>	全光纤 MOPA 皮秒	PPMgLN OPO	3.42	0.67 W
2012	LD 泵浦 掺镱光纤 MOPA	PPMgLN OPO	3.82	5.5

#### 4 结 论

综上所述,产生中红外激光的方法有很多种,各种红外激光器技术都有其特有的优势与局限,随着科技、工艺等的不断进步,上述技术都取得了较大的发展,部分技术已经在实际应用中发挥了重要的作用。另外,相对而言,在各种技术中,在小型化、全固化、窄线宽、室温运转、可调谐等方面具有重大优势

的光参量技术已经成为当前研究的热点并将在其应 用领域发挥更大的作用。

### 参考文献:

- [1] Bian J T, Nie J S, Sun X Q. Mid-infrared laser technology and its progress [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006,35(z3):188-193. (in Chinese) 下进田,聂劲松,孙晓泉.中红外激光技术及其进展 [J]. 红外与激光工程,2006,35(z3):188-193.
- $\label{eq:generalized_states} \begin{array}{ll} \mbox{[2]} & \mbox{Mirov S, Vladimir F, Igor M, et al. Progress in $Cr^{2+}$ and $Fe^{2+}$ doped mid-IR laser materials [J]. Laser & Photon. $Rev,2010,4(1):21-24.$ \end{array}$
- [3] Myoung N, V D, Martyshkin, et al. Energy scaling of 4.3 μm room temperature Fe:ZnSe laser[J]. Optics Letters, 2011,36(1):94 – 96.
- [4] Fedorov V V, Martyshkin D V, Mirov M, et al. High energy 4. 1 ~ 4. 6 μm Fe: ZnSe laser [C]. CLEO Technical Diges. California, 2012; CM3D. 3.
- [5] Fedorov V V, Mirov M S, Mirov S B, et al. Compact 1 J mid-IR Cr:ZnSe laser[C]. Frontiers in Optics. Rochester, NY, 2012: FW6B.9
- [6] JelInkova H, Doroshenko M E, JelInk M, et al. Resonant pumping of dysprosium doped lead thiogallate by 1.7 μm Er: YLF laser radiation [J]. Laser Phys. Lett., 2011, 8 (5):349-353.
- [7] Li A Z. The Invention and advancement on unipolar quantum cascade lasers (invited paper) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9):2213 2220. (in Chinese) 李爱珍. 单极型量子级联激光器的发明及其进展(邀请论文)[J]. 中国激光, 2010, 37(9):2213 2220.
- [8] Shi J B, Wang Y D. Development of λ ~ 3 μm short-wavelength mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Inreared, 2008,29(8):6-10. (in Chinese)
  石泾波,王一丁.λ~3 μm 短波长中红外量子级联激光器的发展及最新研究成果[J].红外,2008,29(8):6-10.
- [9] Beck M, Hofstetter D, Aellen T, et al. Continuous wave operation of a mid-infrared semiconductor laser at room temperature[J]. Science, 2002, 295(11):301-305.
- [10] Du X W. Essentials of lasers for high technology [M]. BeiJing: China Science and Technology Press, 2000. (in Chinese) 杜祥琓. 高技术要览——激光卷[M]. 北京:中国科学 技术出版社,2000.
- [11] Zhang S Y, Sun S Y. Research on the development of american navy high power laser weapon[J]. Moden Ships, 2010,(11):44-47.(in Chinese)
  张世英,孙世岩.美国海军高能激光武器发展探寻
  [J].现代舰船,2010,(11):44-47.
- [12] Lei J, Lai L, Wang Z G. A review on critical technologies of DF/HF chemical laser[J]. Electronics Optics & Con-

trol,2007,14(6):106-112.(in Chinese) 雷静,赖林,王振国.DF/HF 化学激光器关键技术研究 状况评析[J].电光与控制,2007,14(6):106-112.

- [13] Luo X, Feng C, Chen X, et al. Review of frequency doubling crystal in high power CO<sub>2</sub> lasers[J]. Laser Optolectronics Progress, 2012, 49(9):30-37. (in Chinese) 罗旭, 冯驰, 陈欣, 等. 大功率 CO<sub>2</sub> 激光器倍频晶体综述[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9):30-37.
- [14] Li D J, Yang G L, Xie J J, et al. Experiments of second harmonic generation of 9.3 µm pulsed CO<sub>2</sub> lasers [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17 (11): 2684 2691. (in Chinese)
  李殿军,杨贵龙,谢冀江,等.9.3 µm 脉冲 CO<sub>2</sub> 激光倍频 实验[J]. 光学精密工程,2009,17(11):2684 2691.
- [15] Bao Z R G T, Zhang D Y, Feng Y T, et al. Research on tunable mid-infrared OPO laser [J]. Laser & Inrared, 2012,42(9):986-988. (in Chinese)
  包照日格图,张大勇,冯宇彤,等.可调谐中红外 OPO 激光器研究[J].激光与红外,2012,42(9):986-988.
- [17] Elder I. Thulium fibre laser pumped mid-IR laser [J]. Proc. of SPIE,2008,7115:711505.
- [18] Haakestad M W, Arisholm G, Lippert E, et al. High-pulseenergy mid-infrared laser source based on optical parametric amplification in ZnGeP<sub>2</sub>[J]. Optics Express, 2008, 16 (18):14263 - 14273.
- $[\,19\,]\,$  Mu X, Meissner H, Lee H. High efficiency, high power 2.097  $\mu m$  Ho:YAG laser pumped mid-infrared ZGP optical parametric oscillation [ J ]. Proc. of SPIE, 2010, 7686:76860T.
- [20] Mu X, Meissner H, Lee H. Ho: YAG laser pumped walkoff compensated mid-infrared ZGP optical parametric oscillation[J]. Proc. of SPIE, 2011, 7917;79170M.
- [21] Wei L, Xiao L, Han L, et al. ZGP optical parametric oscillator pumped by Tm:YAP laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(7):24 28. (in Chinese)
  魏磊,肖磊,韩隆,等. Tm:YAP 激光抽运 ZGP 晶体光参 量振荡器[J]. 中国激光, 2012, 39(7):24 28.
- [22] Henriksson M, Sjöqvist L, Gustav S, et al. Tandem PPKTP and ZGP OPO for mid-infrared generation [J]. Proc. of SPIE, 2008, 7115:711500.
- [23] Dherbecourt J, Godard A, Raybaut M, et al. Picosecond synchronously pumped  $ZnGeP_2$  optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 2010, 35(13):2197.
- [24] Jiang H L, Bian J T, Nie J S, et al. Theoretical investigation on a method generating 4.3 μm laser based on the tandem optical parametric oscillator [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2):210-213. (in Chinese)

姜海林,卞进田,聂劲松,等.利用双光学参量振荡器 结构输出 4.3 μm 激光方案[J]. 红外与激光工程, 2011,40(2):210-213.

- [25] Dergachev A, Armstrong D, Smith A, et al. High-power, high-energy ZGP OPA pumped by a 2.05 µm Ho:YLF MOPA system[J]. Proc. of SPIE,2008,6875:687507.
- [26] Zhang D Y, Wang R R, et al. Progress on mid-infrared lasers[J]. Laser & Inrared, 2011, 41(5):487 - 491. (in Chinese) 张冬燕,王戎瑞. 高功率中红外激光器的进展[J]. 激 光与红外,2011,41(5):487 - 491.
- [27] Peng Y F, Wei X B, Wang W M, et al. High-efficiency 2.7 μm tunable mid-infrared laser[J]. ACTA Optica Sinica,2010,30(9):2624-2628. (in Chinese) 彭跃峰,魏星斌,王卫民,等. 高效率中红外 2.7 μm 可 调谐激光器[J]. 光学学报,2010,30(9):2624-2628.
- [28] Haakestad M W, Fonnum H, Arisholm G, et al. Mid-infrared optical parametric oscillator synchronously pumped by an erbium-doped fiber laser [J]. OSA Optics Express, 2010,18(24):25379-25388.
- [29] Sheng Q, Ding X, Shi C, et al. Continuous-wave mid-infrared intra-cavity singly resonant PPLN-OPO under 880 nm inband pumping [J]. Optics Express, 2012, 20 (7):8041-8046.
- [30] Xia L Z, Ruan S C, Su H. High-power, widely tunable, singly resonant optical parametric oscillator based on PPLN or MgO-doped PPLN [J]. Proc. of SPIE, 2009, 7276:72760G.
- [31] Peng Y F, Xie G, Wang W M, et al. Intracavity optical parametric oscillator high-repetition-rate 2 µm laser with 46 W output power[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1):33-36. (in Chinese)
  彭跃峰,谢刚,王卫民,等.46 W 腔内光参量振荡高重 复频率 2 µm 激光器[J].中国激光, 2009, 36 (1):33-36.
- [32] Tan H M, Lin H Y, Zhang B L, et al. Mid-infrared tunable all-solid-state optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37 (9): 2303 2308. (in Chinese) 檀慧明,林洪沂,张搏麟,等. 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.
- [33] Liu T, Wang X B, Liu L, et al. Mid-infrared synchronously pumped picosecond optical parametric oscillator based on PPMgLN crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38 (12):11-15. (in Chinese)

刘通,汪晓波,刘磊,等.基于周期极化掺镁铌酸锂晶体的中红外同步抽运皮秒光参量振荡器[J].中国激光,2011,38(12):11-15.