

# 高功率中红外激光器的进展

张冬燕, 王戎瑞

(华北光电技术研究所, 北京 10015)

**摘要:** 中红外激光器在光谱学、遥感、医疗、环保及军事等诸多领域都有重要的应用价值和前景, 因此已成为各国研究的热门课题。首先介绍各类中红外光参量振荡器及其泵浦源的进展, 而后介绍中红外单极型量子级联半导体激光器特点和进展。

**关键词:** 中红外激光器; 中红外光参量振荡器; PPLN-OPO; ZGP-OPO;  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ ; 中红外光纤激光器; 中红外量子级联激光器

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Progress on mid-infrared lasers

ZHANG Dong-yan, WANG Rong-rui

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The mid-infrared lasers are of important application values and development prospect in many areas such as spectroscopy, remote sensing, medicine, environment monitoring and military et al, and thus become a research hotspot of world common interest. In the paper it is introduced that the progress on different mid-infrared optical parametric oscillators (MIR-OPOs) and their pump sources, and then the advancement on mid-infrared unipolar quantum cascade laser (QCL).

**Key words:** MIR laser; MIR-OPO; PPLN-OPO; ZGP-OPO;  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ ; MIR fiber laser; MIR-OCL

### 1 引言

3~5  $\mu\text{m}$  中红外激光器是大气的窗口波段, 位于这个波段的激光在光谱学、遥感、医疗环保及军事等诸多领域都有重要的应用价值和前景。因此对该波段激光器的研究成为目前世界上的热门课题。根据美国国防先进研究局的报导, 高效中红外激光器项目的目标是演示一种可以在室温下工作的连续波中红外(3.8~4.8  $\mu\text{m}$ )激光器。这种激光器不仅功率高( $\geq 1$  W), 而且光束质量好, 电光效率达到50%。

目前, 固体激光器输出波长由于掺杂离子的限制, 多数在1~2  $\mu\text{m}$  范围内, 而最有效的波段为1~1.54  $\mu\text{m}$ , 因此常用光参量振荡器(OPO)产生1.5  $\mu\text{m}$  以上波段激光。例如, 用KTP OPO产生1.57  $\mu\text{m}$  波长激光, 用周期极化铌酸锂(PPLN)和 $\text{ZnGeP}_2$  (ZGP)-OPO产生了3~5  $\mu\text{m}$  激光。在PPLN-OPO中一般采用Nd固体激光器泵浦, 而

ZGP-OPO采用KTP-OPO, Ho:YAG, Tm光纤和光泵半导体( $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ )等泵浦。因此, 要获得全固体化高效可调谐中红外激光输出, 除了开发非线性好的、能耐高功率的中红外非线性晶体(如ZGP)以外, 还应积极开展有效泵浦源的开发。

在中红外激光发展中, 不可忽视的是半导体激光器, 因为它体积小、效率高, 且可靠性高。过去, 中红外半导体激光器电光效率低, 室温下通常约为百分之几, 妨碍了许多潜在应用。与此相反, 近红外半导体激光器目前已实现了室温高功率输出, 具有优良的光束波形和调制特性, 其电光效率目前超过了50%。因此中红外半导体激光器发展面临的困难是实现与已经验证的近红外激光器性能水平接近的中

作者简介: 张冬燕(1971-), 女, 工程师, 从事科技情报工作。  
E-mail: zdy\_0122@hotmail.com

收稿日期: 2010-12-08; 修订日期: 2011-01-06

红外激光源。重点是量子级联激光器(QCL)的全新设计和革新技术开发,预计使中红外波段的未来军用系统尺寸、质量、性能以及成本方面得到极大的改善。

本文首先介绍中红外光参量振荡器及其泵浦源最近发展,而后介绍中红外单极量子级联激光器的最近进展,最后是结论和展望。

## 2 光参量振荡器<sup>[1]</sup>

中红外光参量振荡器(MWOPO)一直是国外研究热点,随着各种新型非线性晶体出现,更为该项目领域的研究开拓了新的应用前景。其主要应用领域包括:环境监测、遥感、医疗诊断和治疗、激光光谱学研究、材料处理、数据通信、光电测量、激光测距、激光雷达,红外对抗等。

目前能够用于 MWOPO 的晶体有  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiIO}_3$ ,  $\text{KTP}$ ,  $\text{ZnGP}_2$  和  $\text{AgCaS}_2$  等。在这些晶体中,  $\text{LiNbO}_3$  和  $\text{ZnGP}_2$  晶体作为 MWOPO 首选晶体。

### 2.1 PPLN OPO 最新进展<sup>[2]</sup>

近几年来,由于 PPLN 和准相位匹配(QPM)技术的迅速发展使 PPLN OPO 成为当然的 MWOPO 研究热点。准相位匹配较之折射率相位匹配的主要优点如下:①由于使用者控制着周期性,他可选用某一周期来匹配希望的非线性相互作用;②无需使用正交光束偏振,这意味着非线性系数不再局限于非对称  $d$  张量元。所有三个相互作用电场都有可能的偏振。在  $\text{LiNbO}_3$  情况下可用  $d_{33}$  而不是  $d_{31}$ , 由于对角分量大多得多,所以有效非线性增益提高了 20 倍;③准相位匹配是非临界匹配,不存在正交极化传播光束的双折射感应离散。此外,角灵敏度低,所以相互作用光束能够紧密地聚焦在非线性晶体上,进一步提高非线性增益;④通过在 PPLN 晶体上设置多种光栅间距和改变晶体温度,可简单实现宽的调谐。

典型的 PPLN 连续单共振参量振荡器如图 1 所示,其性能参数如表 1 所示,其中 PPLN-OPO 泵浦源是二极管泵浦 Nd:YAG 激光器。这些参数表明 PPLN 可作为  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  中波红外光源,有很大的实用前景。

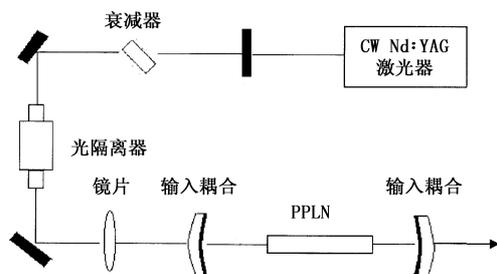


图 1 典型 PPLN-OPO 结构

表 1 PPLN 连续单共振 OPO 参数

参数	性能	
泵浦波长/ $\mu\text{m}$	1.064	
泵浦源功率/W	17	3.98 ~ 3.11(闲频)
输出波长/ $\mu\text{m}$	1.45 ~ 1.62(信号)	
阈值功率/W	2.6 ~ 4.5	
输出功率/W	1.2(3.3 $\mu\text{m}$ 波长)	

虽然 PPLN-OPO 已经有很多应用,但也存在一些缺点。由于受电场击穿阈值限制,PPLN 晶体的厚度一般只能做到约 1 mm,因而其横向增益长度有限;同时由于 PPLN 晶体在常温下抗光损伤阈值较低,为了消除光折变损伤的影响,PPLN 要加热到  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  以上,才能有效地实现光谱转换。这些因素均在一定程度上制约了 PPLN 在实用性 OPO 上的应用,特别是在大功率 OPO 上的应用。研究发现铈酸锂中掺适量的  $\text{MgO}$ (PPMgLN) 是一种很有前途的非线性光学材料,因为它大大减少了抗光折变损伤的影响,而且非线性光学系数( $d_{33}$ )更大。所以,现在国内外对 PPMgLN 的研究较多。

### 2.2 $\text{ZnGeP}_2$ - OPO 进展<sup>[3]</sup>

在众多的非线性光学晶体中, $\text{ZnGeP}_2$  (ZGP) 晶体具有良好的物理化学特性,高的非线性系数( $75 \text{ pm/V}$ )、宽的透明范围( $0.7 \sim 12 \mu\text{m}$ ,  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  的吸收系数小于  $0.01/\text{cm}^{-1}$ )、宽的相位匹配范围、高热导率( $0.36 \text{ W/cm K}$ )、低阈值和高损伤阈值( $30 \text{ GW/cm}^2$ )<sup>[4]</sup>,故  $\text{ZnGeP}_2$  有利于高功率泵浦,从而产生高功率中红外激光输出。

$\text{ZnGeP}_2$  的泵浦波长为  $2 \mu\text{m}$ ,目前在其附近吸收系数能达到  $<0.05 \text{ cm}^{-1}$ ,其特点是信号光和闲频光都位于  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段内。目前已经能达到总体转换效率  $>50\%$ ,平均输出功率  $>10 \text{ W}$ <sup>[5]</sup>。因而,ZGP 是  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  中红外光参量振荡器的最佳非线性光学材料。

在泵浦源方面,由于泵浦源波长范围小于  $2 \mu\text{m}$  时被 ZGP 强烈吸收,因此它只能用波长大于  $2 \mu\text{m}$  的激光做泵浦源。目前主要泵浦源有二极管泵浦掺  $\text{Tm}:\text{Ho}$  固体激光器、 $\text{KTP-OPO}$ 、 $\text{PPLN-OPO}$ 。另外,最新正在开发新型  $2 \mu\text{m}$  波长激光器如掺  $\text{Tm}$  光纤激光器和光泵浦半导体激光器(如  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ )作为 ZGP 的泵浦源。

在相位匹配方式上 ZGP-OPO 用 I 类相位匹配可输出  $2.4 \sim 4 \mu\text{m}$  信号光和  $4 \sim 12 \mu\text{m}$  闲频光,而用 II 类相位匹配可输出  $2.4 \sim 3 \mu\text{m}$  信号光和  $6 \sim 12 \mu\text{m}$  闲频光。

近年来中红外 ZGP-OPO 开发有较大进展,输出

功率/能量有较大的提高, 详如表 2 所示。但是, ZGP-OPO 的发展还是受到泵浦源的限制。

表 2 国外中红外 ZGP-OPO 性能<sup>[1]</sup>

泵浦源 (波长, 功率, 频率)	相位匹配方式	中红外输出(波长调谐范围, 输出功率, 转化效率/斜率效率, 阈值, 脉冲宽度)	研究单位, 年份
Ho:YGA 2.05 μm	I 类, 单谐振	5.2 μm, 30 mJ 泵浦输入时, 输出 2.5 mJ, 转化效率 8.3%, 1 nm	美国 NASA 兰利研究中心与汉普顿大学物理系, 2006 年
KTP OPO 2.1 μm, 22 W, 15 kHz	I 类	3.5 μm, 4.3 μm, 4.6 μm, 5.5 μm, 5.5 W, 转化效率 25%, 15 kHz	新加坡 DSO 国家实验室, 2006 年
Tm, Ho:YAG 2.096 μm 9.8 W, 20 kHz	I 类	3.83 μm 和 4.63 μm, 3.5 ~ 5 μm, 5.1 W, 转化效率 59% (从 2 μm 到中红外), 斜率效率 70%, 20 kHz	挪威防卫研究组织, 2006 年
Tm, Ho:YAG 2.05 μm, 大于 55 mJ 500 Hz	I 类	3.4 μm 和 5.16 μm, 10 mJ, 总转化效率 35%, 500 Hz	美国 Q-Peak, 2007 年
PPKTP-OPO 2.128 μm	I 类	3.7 μm 和 5 μm, 350 μJ, 转化效率 8.9% (1.06 μm 到中红外), 斜率效率 14% (1.06 μm 到中红外)	瑞典防卫研究组织, 2007 年
Tm:YLF 泵浦 Ho:YAG, 2.09 μm	I 类	环形腔 4 ~ 5 μm, 5 μm 处输出 4 mJ, 斜率效率 20%	德国航天宇宙中心, 2007 年
Tm 光纤激光器 2 μm, 3 W, 30 kHz	I 类	3.4 ~ 3.9 μm 和 4.1 ~ 4.7 μm, 大于 658 mW, 其中信号光 370 mW, 闲频光 270 mW, 转化效率 22%, 斜率效率大于 35%	美国 BAE Systems, 2008 年
Q 开关, CrTm Ho:YAG, 2.09 μm	I 类单谐振	5.2 μm, 4.7 ~ 7.8 μm, 5.2 μm 处输出 1.7 mJ 光-光转化效率为 56%, 斜率效率 64%, 1 mJ	荷兰 Twente 大学与德国 Minkster 大学, 2008 年

2.3 新型泵浦源的开发<sup>[3,6-7]</sup>

最近几年中为配合 ZGP-OPO 发展也在研制许多新的 2 μm 波长以上的泵浦源, 其中有代表性的是掺过渡金属(如 Cr<sup>2+</sup> 或 Fe<sup>2+</sup>) 二元(如 ZnSe, ZnS, CdS, ZnSe) 和三元(如 CdMnTe, CdZnTe, ZnSTe) 硫化物激光器以及掺稀土金属(如 Tm, Ho) 的光纤激光器。

2.3.1 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 激光器<sup>[8]</sup>

掺过渡金属硫化物激光器是最近开发较多

的另一类掺杂晶体激光器, 在中红外波段的发展, 其中研究较多的是 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 激光器。这种激光器的最大的优点是, 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 2 所示), 而且有类似于掺钛蓝宝石激光器的光谱特性(如图 3 所示)。因此, 这些激光器可能是目前在 2 ~ 5 μm 波段内代表最简单、最高效费比的高功率和波长宽可调的激光器。

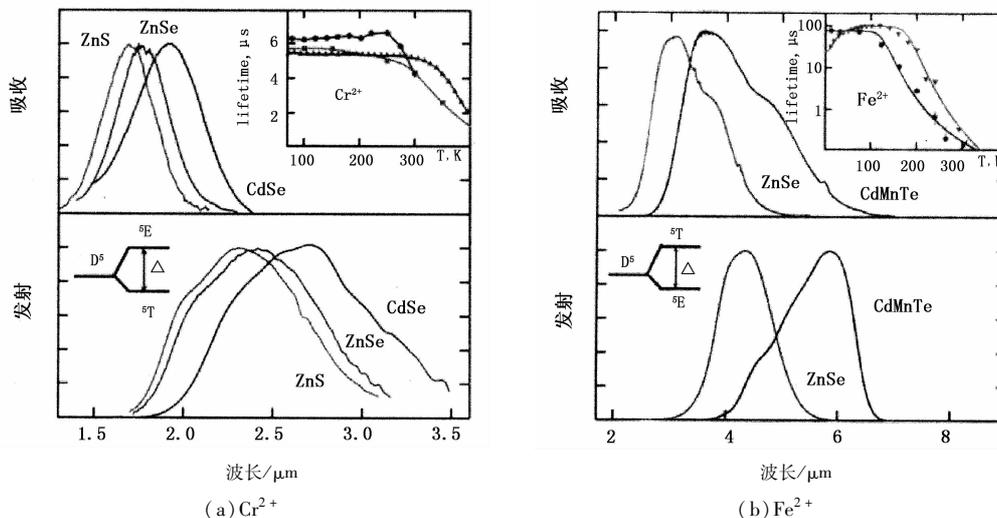


图 2 归一化室温吸收和发射-增益光谱曲线<sup>[8]</sup>

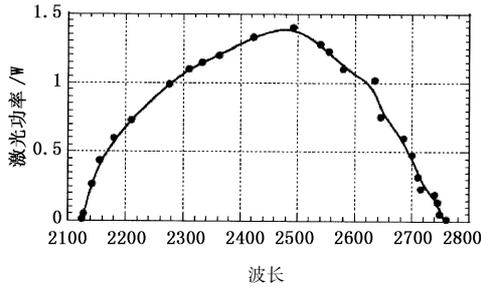


图3 连续  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光器输出功率调谐曲线

最近在开发高质量  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  晶体及其热管理方面取得重大进展<sup>[9]</sup>,因此  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光器连续波输出功率在 29 W 输入泵浦功率下最大已达到 12.5 W,其斜率效率达到 43.5%。

目前  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光器在掺过渡金属离子 II-IV 族化合物晶体激光器中发射的波长最长并实现了连续波振荡<sup>[10-11]</sup>。据称这种激光器在波长 4.06  $\mu\text{m}$  上连续波输出功率达 160 mW,斜率效率为 56%,而用 2.97  $\mu\text{m}$  CW  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  激光器作为泵浦源。

### 2.3.2 大功率高效率中红外光纤激光器

高功率二极管泵浦技术加上现有近红外波段光纤激光器技术,如石英双包层光纤等,可以很容易产生 2  $\mu\text{m}$  波段的激光,而 3  $\mu\text{m}$  波长以上的激光,则需要采用低声子的玻璃光纤,如氟化物玻璃光纤等,才能够获得。

目前输出功率最高的 2  $\mu\text{m}$  光纤激光器是 IPG 光子学公司的商用光纤激光器,采用二极管泵浦  $\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}$  共掺杂光纤激光器作为泵浦源,对掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤激光器进行泵浦,输出波长为 2  $\mu\text{m}$ ,相对于二极管泵浦源功率,最大光-光转换效率约为 30%。

硫族化合物拉曼光纤激光器是中红外拉曼光纤激光器领域一个非常有前景的研究方向,它具有较宽的红外透明区域(1.2~12  $\mu\text{m}$ ),温度对硫化物玻璃光纤损耗的影响很小,其损耗在 6  $\mu\text{m}$  波长处为 0.2 dB/km。目前用  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤激光器泵浦  $g\text{-As}_2\text{Se}_3$  拉曼光纤激光器,产生功率约为 1 W 的输出,第 1 和第 2 斯托克斯波长分别为 2.062  $\mu\text{m}$  和 2.074  $\mu\text{m}$ 。

光纤的基质材料为氟化物玻璃的高功率 3  $\mu\text{m}$  光纤激光器,由于这种玻璃的声子能量很低(约 550  $\text{cm}^{-1}$ ),允许多声子衰减来实现电子在 2~4  $\mu\text{m}$  光波段范围内跃迁。预计  $\text{Ho}^{3+}:\text{Pr}^{3+}$  共掺的 ZBLAN (Zr, Ba, La, Al, Nd) 光纤激光器将有可能成为真正的高功率、高效率 3  $\mu\text{m}$  光纤激光器。

值得注意的是,上述  $\text{Cr}^{3+}:\text{ZnSe}$ 、硫族化合物拉

曼光纤和氟化物光纤等激光器都在发展之中,其材料质量是关键。这些中红外激光器在将来不仅可以作为中红外光参量振荡器的重要泵浦源,而且有可能作为重要的中、远红外激光源。

### 3 单极型量子级联激光器<sup>[12]</sup>

1994 年发明的单极型量子级联激光器(QCL)具有下述特点:

(1) 受激辐射实现光放大激射理论:QCL 是基于电子在导带能级间跃迁和共振声子辅助隧穿实现光激射,受激辐射过程只有电子参加而没有空穴参加,是单极型半导体激光器。其激射波长由有源势阱层和势垒层厚度决定而与材料带隙无关,理论预测可覆盖几微米至 250  $\mu\text{m}$  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波段半导体激光领域研究长期处于停止不前的状态,是半导体激光理论的革命里程碑发展。

(2) 在光放大机制上: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,并成为目前唯一实现瓦级大功率室温脉冲、室温连续工作的多模中红外半导体激光器,功率比商用注入型铅盐类激光器高 3~4 个数量级。由于 QCL 的受激辐射机理是光学声子发射而不是俄歇复合效应,因此具有高特征温度  $T_0$  和高工作温度特点。

(3) 宽调谐、高增益特性:量子级联分布反馈激光器(QC-DFBL)是第一个实现室温脉冲运转、室温连续运转的单模中红外半导体激光器,其温度波长调谐范围宽达 150 nm,其边模抑制达 30 dB。QC-DFLB 是目前唯一适合用于宽光谱范围连续单模调谐的中红外半导体激光器。

(4) 单原子层水平控制和亚纳米生长技术:35~75 级联 QCL 材料结构含有 800~1800 层外延层,最薄的外延层厚度仅为 0.4~0.6 nm,为原子层量级。外延层厚度波动 0.5 nm,就会导致波长改变了 3 meV(0.4  $\mu\text{m}$ )。因此,要求 QCL 材料层厚度、组分、界面控制精度在单原子层水平。它被视为最具挑战的半导体纳米材料和纳米生长技术巅峰。

(5) 材料体系:QCL 用同一种材料体系如 InGaAs/InAlAs/InP 和 AlGaAs/GaAs,只需改变有源势阱和势垒层厚度就可覆盖很宽的光谱范围,而不像传统的半导体 p-n 结激光二极管。

(6) 与双极型带间跃迁激光二极管不同,QCL 的注入面功率密度高达  $10^8 \text{ Wm}^{-2}$ ,因此,QCL 的热

特性和热管理的理论和实验研究仍需创新。

有源区的数百至上千的异质结量子阱界面的散射、高注入电流(安培量级)、高工作电压(10 V 量级),相当于注入功率在 10 W 量级,而功率密度  $10^8 \text{ W/m}^2$ ,有源区热损耗是制约 QCL 长期未能实现室温连续工作的瓶颈。十多年来,通过优化有源核工作层结构设计、选择低热阻波导层材料,深入研究 QCL 器件热特性和科学设计热管理,以及器件封装等<sup>[13]</sup>,多模高功率 F-P 腔 QCL 和单模宽波长调谐 DFB-QCL 取得重大进展。其中室温脉冲 F-P QCL 最高脉冲率已达 120 W,连续波功率超过瓦级,电光转换效率达 15% ~ 20%。单模中红外 QCL 自 2006 年研制成功第一个  $9.6 \mu\text{m}$  室温连续波 DFB-QCL 以来,已从个别波长扩展至  $3.6 \mu\text{m}$ ,  $4.6 \mu\text{m}$ ,  $4.8 \mu\text{m}$ ,  $5.6 \mu\text{m}$  等多个波长实现室温连续工作。

为实现 QCL 单模、宽调谐,开拓光子晶体 QCL 和外腔调谐 QCL 研究,2003 年美国和法国联合研究组首次报导研制 InP 基  $8 \mu\text{m}$  中红外量子级联面发射光子晶体激光器<sup>[14]</sup>,而近几年来这方面取得了突破性进展<sup>[15-16]</sup>。光子晶体 QCL 的研究成功开拓了把半导体带隙与光子带隙结合的量子电子-量子交叉学科。

由上述可见,自 1994 年采用了分子束外延 QCL 结构材料研制出第一个  $4.3 \mu\text{m}$  中红外 QCL 以来,16 年间解决了一系列 QCL 材料与器件核心科学技术问题,并取得了突飞猛进的发展。展望中远红外半导体激光器领域,将会在信息产业、环保、安全和国防发展中开拓战略性的新兴产业,并开创和发展新兴交叉学科。

#### 4 结 论

中红外波段在光谱学、遥感、医疗、环保及军事诸多领域都有重要的应用价值和前景,为获得 3 ~  $5 \mu\text{m}$  中红外大功率高效率的激光,各国都在致力于各种红外 OPO 及其泵浦源和中红外半导体激光器的研制。随着新型材料的开发和新型器件结构的创新,中红外激光器会有越来越广泛的应用领域。

#### 参考文献:

- [1] Run Peng. The late progress of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. Laser Journal, 2010, 31(4): 1-3. (in Chinese)  
阮鹏. 中红外光参量振荡器的最新进展 [J]. 激光杂志, 2010, 31(4): 1-3.
- [2] Tan Huiming. 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. 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.
- [3] Timothy J Carrig, et al. Tunable infrared laser sources for DIAL [C]//Laser Radar Technology and Applications VIII, 2020, 4723: 147-155.
- [4] Kevin J Zavilsk. Increasing the laser-induced damage threshold of single-crystal ZnGeP<sub>2</sub> [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2006, 23(11): 2310-2316.
- [5] Ian Eler. Thulium fiber laser pumped mid-IR source [C]. SPIE, 20097325: 732501.
- [6] Wang Zhenfu. Progress on high power mid-IR semiconductor sc laser [J]. OME Information, 2010, 27(8): 10-16. (in Chinese)  
王贞福(译). 高功率中红外半导体碟形激光器进展 [J]. 光机电信息, 2010, 27(8): 10-16.
- [7] Progress on high power and effieien mid-IR fiber laser [J]. OME Information, 2002, 19(2): 12-20. (in Chinese)  
大功率高效率中红外光纤激光器的研究进展 [J]. 光机电信息, 2002, 19(2): 12-20.
- [8] Sergey Mirov, et al. Progress in Cr<sup>2+</sup> and Fe<sup>2+</sup> doped mid-IR laser materials [J]. Laser & Photonics Reviews, 2010, (4): 21-41.
- [9] I S Moslalev. ASSP Technical digest on CD, WB30(Opt. Soc. of Am., Washington DC, 2009).
- [10] A A Voronov, et al. A continuous 0-wave Fe<sup>2+</sup>:ZnSe laser [J]. Quantum Electronics, 2008, 38(12): 1113-1116.
- [11] M P Frolov, et al. International conference on laser optics 2008, Technical Program, st. Petersburg, Russia 2008 (Institute for Laser Physics, st. Petersburg, Russia, 2008). (in Chinese)
- [12] Li Aizhen. The invention and advancement on unipolar quantum cascade lasers, [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期进展 [J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2213-2220.
- [13] C Zhu, et al. Analysis of key parameters affecting the thermal behavior and performance of quatum cascade lasers [J]. J. Appl. Phys., 2006, 100(5): 053105.
- [14] R Colombelli, et al. Quantum cascade surface  $\Sigma$  emitting photonic crystal laser [J]. Science, 2003, 302(5649): 1374-1377.
- [15] G Y Xu, et al. Surface-emitting mid-infrared quantum cascade laser with high contrast photonic crystal resonators [J]. Opt. Express, 2010, 18(11): 11979-11989.
- [16] G Y Xu, et al. Polarized single-lobed surface emission in mid-infrared, photonic-crystal, quantum-cascade lasers [J]. Opt. Lett., 2010, 35(6): 859.