

中波红外激光技术最新进展

谭改娟^{1,2}, 谢冀江^{1*}, 张来明¹, 郭劲¹, 杨贵龙¹,
邵春雷¹, 陈飞¹, 杨欣欣¹, 阮鹏^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 3~5 μm 中红外波段激光源是近年来备受国内外关注的研究热点, 本文综合评述了产生中红外波段激光的 5 种主要方法(CO₂激光倍频技术、泛频 CO 激光技术、光学参量振荡器、氟化氙激光器、Fe²⁺:ZnSe 固体激光技术)的国内外发展现状, 总结分析了各种方法的关键技术和存在的问题, 指出了该技术的未来发展趋势。

关键词: 中红外激光; CO₂ 激光倍频; 泛频 CO 激光; 光参量振荡器; 氟化氙激光器; Fe²⁺:ZnSe 激光

中图分类号: TN248 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20130604.0501

Recent progress in mid-infrared laser technology

TAN Gai-juan^{1,2}, XIE Ji-jiang^{1*}, ZHANG Lai-ming¹, GUO Jin¹, YANG Gui-long¹,
SHAO Chun-lei¹, CHEN Fei¹, YANG Xin-xin¹, RUAN Peng^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

** Corresponding author, E-mail: laserxj@163.com*

Abstract: 3~5 μm mid-infrared laser sources have significant applications in many fields and have been intensively studied by researchers. Main technical methods to generate mid-infrared laser radiation are reviewed in this paper, which are as follows: second harmonic generation of CO₂ laser, first-overtone CO laser, optical parametric oscillator, DF laser, Fe²⁺:ZnSe solid laser. The key techniques and problems of each method are concluded and analyzed. The technology tendencies of mid-infrared laser sources are summarized.

Key words: mid-infrared laser; second harmonic generation of CO₂ laser; first-overtone CO laser; optical parametric oscillator; DF laser; Fe²⁺:ZnSe laser

1 引言

3~5 μm 是中红外大气透明窗口中透过率最高的波段,并包含了众多的分子及原子吸收峰,因此该波段的激光源在光谱学、遥感、环保、医疗,以及军事等诸多领域都具有非常重要的应用价值和前景,已成为国内外关注和开展广泛研究的热点^[1-5]。获取该波段激光源有两种技术途径,第一种是直接激光输出方式,主要包括泛频 CO 激光技术、氟化氘(DF)激光技术以及 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 为代表的新型固体激光技术等,第二种是间接输出方式,主要包括 CO_2 激光倍频技术、光学参量振荡器(Optical Parametric Oscillator, OPO)技术等。其中,泛频 CO 激光技术得到的功率一般较小,常用于光谱学的研究,其主要的的问题在于激光器需在低温条件下运行;氟化氘(DF)激光器可得到百焦耳能量的输出,因其在环境探测等领域的巨大应用潜力而广受关注,然而体积大、气体昂贵、反应副产物处理复杂等问题亟待解决;以 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 为代表的新型固体激光技术可以实现直接激励,从而得到中红外波段激光输出,通常情况下该技术对应的激光源系统简单、成本相对较低,而实现其在室温条件下高效工作是研究者努力的方向。 CO_2 激光倍频技术获得的激光源亦可用于空气成分监测和激光通讯等领域;光学参量振荡器以其宽调谐范围、高重频及小型固体化等特点在激光测距、大气污染检测及光电对抗等领域中显示出越来越广泛的应用前景。这两种方式均是基于晶体的非线性效应得到中红外激光输出的,在现阶段获得满足相位匹配条件、高质量的非线性晶体是研究重点。

本文就目前能够产生中红外波段激光输出的最主要的5种方法,即 CO_2 激光倍频技术、泛频 CO 激光技术、OPO、DF 激光器和以 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 为代表的新型固体激光技术作简要介绍,并对其各自的发展现状、关键技术和存在的问题进行综合分析和评述,在总结比较各种中波激光产生方法优缺点的基础上,指出该技术的未来发展趋势。

2 中波红外激光技术发展现状

2.1 CO_2 激光倍频技术

激光倍频(SHG)技术始于激光问世的第二年,这种方法的理论基础是基于激光在非线性晶体中传播所产生的频率变换效应。尽管1970年 W. B. Gandrud 和 R. L. Abrams 就利用 Te 晶体首次实现了 CO_2 激光倍频输出,但由于受到晶体材料特性的限制,其技术发展相对较慢,最主要的问题是晶体的倍频效率低、损伤阈值低。而高质量的倍频晶体应同时满足下述条件:(1)非线性光学系数大;(2)对基波和谐波的光学吸收系数小,激光损伤阈值高;(3)相位匹配允许角大;(4)对于输出功率大的激光,导热率也大。

研究发现,满足上述条件且可大体积生长、品质好的 AgGaSe_2 、 ZnGeP_2 等三元黄铜矿晶体是实现 CO_2 激光倍频较为理想的选择。由于 ZnGeP_2 晶体在 10 μm 波长附近倍频效率急剧下降,因而利用该晶体进行倍频的通常是波长小于 10 μm ,且以脉冲方式工作的 CO_2 激光器。而由于 AgGaSe_2 晶体具有更好的光学性质,其在 9~11 μm 的整个 CO_2 激光波段倍频效率均较高,成为连续波(CW) CO_2 激光倍频的首选晶体。GaSe 晶体因机械性能较差,应用受限,为改善其机械和其他物理性能,2005年印度的 Burdwan University 对该晶体在掺杂了其他元素后的特性进行了相关研究,发现掺杂钢、硫元素可提高 GaSe 的硬度,且在 SHG 效率方面 GaSe:S 是 GaSe:In 的 1.5 倍,此外还有其他掺杂元素的研究^[6-7]。提高 CO_2 激光倍频输出功率的另一个技术途径是采用多块拼接的方法组成晶体的平行阵列增大晶体面积,2011年中科院长春光机所报道了利用 7 块 ZnGeP_2 晶体进行的横向激励大气压(TEA) CO_2 激光器^[8-9] 9.3 μm 波长倍频实验,得到了 20.3 W 的 CO_2 激光倍频输出,这也是目前国际上公开报道的最高功率。

除了选取合适的非线性晶体之外,基频光束质量的优化也是 CO_2 激光倍频的关键技术之一,它对于提高倍频效率具有极其重要的作用。2004年哈尔滨工业大学就整形前后的入射光束进行了

双晶体倍频对比实验,发现利用等离子开关将脉冲整形去除拖尾后,倍频效率由之前的 2% 提高到了 12%。表 1 列出了近年来国内外 CO₂激光倍频技术的研究进展。

表 1 国内外 CO₂激光倍频技术研究进展
Tab.1 The development of SHG of CO₂ laser

研究单位	年代	泵浦光参数	晶体(类型、尺寸)	主要输出技术指标
Sanders, A Lockheed Martin Company, USA ^[10]	2000	波长 9.27 μm,脉宽 10 ns,重频 100 kHz,功率 11.8 W	AgGaSe ₂ 长 40 mm	波长 4.6 μm,功率 3.05 W,外转换效率 26%
哈尔滨工业大学 ^[11]	2004	波长 10.59 μm,脉宽 60 ns(拖尾数百纳秒),能量 67.2 mJ;加等离子体开关,脉宽 38 ns,能量 8.8 mJ	双晶体 AgGaSe ₂ (长 11.7 mm 和 19.5 mm)	未加等离子开关时,输出能量 1.44 mJ,转换效率 2%;加等离子体开关,输出能量 1.14 mJ,转换效率 12.9%
中科院安徽光机所 ^[12]	2004	波长 9.23 ~ 10.65 μm,重频 200 Hz,泵浦功率 8.7 kW/cm ²	AgGaSe ₂ 长 15 mm	波长 5.3 μm 输出功率 2.1 μW,相位匹配接受外角 2.1° · cm
Burdwan University, India ^[13]	2005	波长 9.2 ~ 10.78 μm,脉冲宽度 160 μs(有拖尾),连续波	GaSe:In 厚 8 mm GaSe:S 厚 5 mm	GaSe:S 倍频转换效率是 GaSe:In 倍频转换效率的 1.5 倍
中科院长春光机所 ^[14]	2009	波长 9.3 μm,单脉冲或 100 Hz 重频,脉宽 80 ns,能量 160 mJ	AgGaSe ₂ 晶体	单脉冲泵浦,输出能量 12.9 mJ,转换效率 8%;重频泵浦,平均输出功率 940 mW
Air Force Research Laboratory, USA ^[15]	2010	波长 9.2 ~ 9.63 μm,连续波	OPGaAs 长 40 mm	倍频功率 1.91 mW(输入 1.81 W@9.294 μm),外转换效率 0.11%
中科院长春光机所 ^[16]	2012	波长 9.3 μm,单脉冲能量 1 J,重频 1 ~ 300 Hz 可调	7 块长为 12 mm 的 ZnGeP ₂ 晶体组成的平行阵列	单脉冲运作:输出能量 197 mJ,转换效率 3.4%;250 Hz 重频:最大功率 20.3 W,转换效率 1.4%

2.2 泛频 CO 激光技术

CO 激光器可实现基频 ($\Delta v = 1$) 和泛频 ($\Delta v = 2$)^[17-18] 两个波段(如图 1 所示)的输出,其中泛频波段可实现 2.6 ~ 4.2 μm 的激光输出,是少数可直接产生 3 ~ 5 μm 中波输出的激光源之一,因此泛频 CO 激光技术也引起了国内外众多研究者的关注。然而在国内由于受到技术条件的限制,相关的研究机构较少,近年来只有大连理工大学的林钧岫、于清旭等人报导了泛频 CO 激光器相关技术研究成果,他们于 1999 年研制的低温流动式可调谐连续波泛频 CO 激光器,通过采用液氮冷却方法使得激光等离子体工作在 77 K 下,利用光栅扫描在 3 ~ 4 μm 波段得到 9 条激光跃迁线,且得到最大激光单线的输出功率为

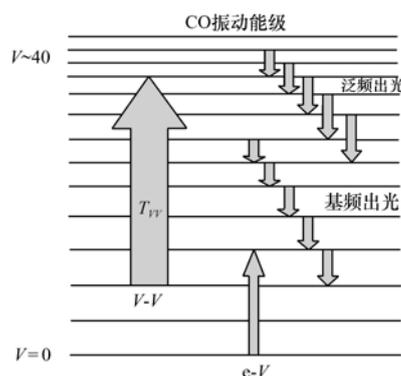


图 1 包含主要受激过程和激光跃迁的 CO 分子振动能级示意图

Fig. 1 Diagram of the vibrational levels of the CO molecule with main excitation processes and laser transitions

55 mW^[19]; 另外,在2009年他们指出要获得泛频波段长波区(3~4.2 μm)的输出必须采用低温制冷的原因,并从理论上给出了长波端的极限值^[20]。国外此技术的研究起步早,研究机构也较多,其中以美国和俄罗斯报导其相关的研究成果居多。现简述如下。

2005年美国的俄亥俄州立大学对慢流泛频CO激光器的实验研究^[21]是分别在两组具有不同液氮制冷区长度的短管(102 mm)和长管(142 mm),而其他条件相同的装置上进行的。最终均获得了40~45个振转能级跃迁谱线,它们属于从振动带9~7到35~33,覆盖的光谱为2.6~3.9 μm。短管实验得到的最大输出功率为8.5 W,无基频跃迁光输出,最大激光效率为5%,最优气体分压为:He, 1 246 Pa; N₂, 149 Pa; CO, 80~133 Pa; O₂, 4 Pa。在使用长管的实验中,得到了12 W的输出功率,激光效率5%,并且在最高输出功率12 W的条件下基频跃迁输出占总功率的比例小于5%。

2008年俄罗斯Lebedev Physical Institute在其2006年首次报道的紧凑封闭式低温运转的射频放电激励板条CO激光器基础上进一步对泛频输出公开了其新的研究成果^[22],他们在气压1 999 Pa气体配比为CO: Air: He = 1:2:10的条件下,观测到对应于泛频振动带从22~20到36~34的50条振转输出谱线,光谱为3.1~4.0 μm。但是由于实验中并未对激光谐振腔参数进行进一步优化,得到的输出功率并不高,其平均输出激光功率不超过40 mW。

2010年该研究机构又对上述激光器进行了更深入的研究^[23],他们在配比CO: O₂: N₂: He = 1:0.5:1:10,气压 $p = 1\ 999$ Pa;载频 $F_0 = 81$ MHz,重频 $F = 500$ Hz,泵浦脉宽 $t = 0.1/F$,射频泵浦功率 $P_{RF} = 600$ W的条件下,得到了最大平均输出功率为0.13 W,电光转换效率为0.3%的激光输出。另外还设计了一个新型的激光头,与之前的不同之处在于激活介质区长度增加了40 cm,最终得到的平均输出功率比之前的提高大约3

倍,并且在气压2 932 Pa,气体配比CO: O₂: He = 1:0.25:10的条件下,获得了0.45 W的平均输出功率和1%的效率。此外,使用了另一输出耦合镜进行了实验,在气体配比CO: O₂: He = 1:0.33:15,气压2 932 Pa, $F_0 = 60$ MHz, $F = 300$ Hz, $t = 0.2/F$, $P_{RF} = 450$ W的条件下得到0.75 W的平均输出功率,电光转换效率高于1%。

2.3 光学参量振荡器

OPO与CO₂倍频方法有某些共同之处,即都是利用晶体的非线性光学效应现象。泵浦光入射到置于谐振腔内的非线性晶体上,因非线性极化场的存在,在满足相位匹配的条件下,将产生闲频光和信号光两束光。根据谐振腔腔镜镀膜情况,OPO可分为单谐振光参量振荡器(SRO)和双谐振光参量振荡器(DRO),当输出镜M2只镀对信号光的高反膜,即只对信号光振荡时,称为SRO;当输出镜M2同时镀对信号光和闲频光的高反膜,即对信号光和闲频光都振荡时,称为DRO。DRO满足信号光和闲频光双谐振,其阈值低,但可调性差、稳定性低;SRO相对DRO阈值高,但腔体结构简单、稳定性好,实际中用的较多^[24]。

与CO₂倍频技术相似,晶体的性质和参数优化是OPO最为关键的技术。目前适合于OPO的中红外晶体主要考虑以下因素:晶体要有较宽的中红外透明区、大的非线性系数、合适的相位匹配、较高的抗光损伤阈值以及能生长大尺寸等。研究者发现较适合的晶体主要有磷锗锌(ZGP)、KTP、铌酸锂(PPLN)等。OPO的另一项关键技术是泵浦源及其相位匹配技术,其中ZGP-OPO常用泵浦源的波长为2 μm,利用I类相位匹配得到的信号光和闲频光均处于中红外波段;PPLN-OPO采用准相位匹配方式获得振荡输出,近年来通过在晶体PPLN中掺杂一定量的MgO有效地提高了晶体的损伤阈值,并有益于制作出厚度较大的PPLN晶体,因而MgO:PPLN引起了众多研究者的关注。表2列出了近几年国内外OPO的相关研究进展。

表2 国内外 OPO 研究进展

Tab.2 Development of OPO

研究单位	年代	泵浦源(波长,能量/功率,重频,脉宽)	非线性晶体(长度,匹配方式等)	输出特性(波长,能量)
French-German Research Institute of Saint-Louis, France ^[25]	2008	Tm: YAG, 2.013 μm , 4 mJ, 80 ns	ZnGeP ₂ , 长 16 mm, I类相位匹配	信号光 3.59 ~ 3.61 μm 和 闲频光 4.57 μm , 总能量 1 mJ, 斜效率 61%, 脉宽 53 ns
中国工程物理研究院 ^[26]	2008	Nd: YAG, 1.064 μm , 23 W, 7 kHz	PPMgLN (MgO 摩尔分数 5%), I类准相位匹配单谐振, 周期调谐	2.7 ~ 4.8 μm , 3.6 ~ 3.8 μm 平均功率大于 3.2 W, 斜效率超过 18%
华中科技大学 ^[27]	2009	调 Q Nd: YAG, 1.064 μm , 8.15 W, 10 kHz	双 PPMgLN, 长 40 mm, 单谐振, 温度周期调谐	闲频光 2.789 ~ 4.957 μm , 输出功率 2.23 W (@ 3.344 μm), 光光转换效率 27.4%
中科院半导体所 ^[28]	2009	调 Q Nd: YAG, 1.064 μm , 12.3 W, 5 kHz	PPMgLN, 长 30 mm, 单谐振, 温度调谐	闲频光 3.846 ~ 3.952 μm , 输出功率 1.35 W (@ 3.93 μm), 光光转换效率 11%
ICFO, Spain ^[29]	2010	掺 Yb 光纤激光器, 1.064 μm , 16 W, 81.8 MHz, 20.8 ps	MgO: PPLN, 长 50 mm, 单谐振, 温度调谐	信号光 1.43 ~ 1.63 μm , 闲频光 3.06 ~ 4.16 μm , 总功率 11 W; 闲频光最大输出 4.9 W (@ 3.08 μm), 斜效率 31%
哈尔滨工业大学 ^[30]	2010	调 Q Nd: YAG, 1.064 μm , 7.5 W, 1 ~ 60 kHz 可调	PPLN, 长 22 mm, 单谐振, 温度调谐	闲频光 3.34 ~ 3.64 μm , 光光转换效率 9.2%, 最大闲频光输出 0.83 W
中国工程物理研究院 ^[31]	2011	KTP-OPO, 2.1 μm , 15 W, 8 kHz	ZnGeP ₂ , I类双谐振	输出功率 5.7 W, 斜效率 46.6%, 信号、闲频光中心波长 4.10 μm , 4.32 μm
KMLabs Inc., USA ^[32]	2012	掺 Yb ANDi 光纤, 1.04 μm , 13 nJ, 60 MHz, 100 fs	MgO ₂ : PPLN (3 mm 长), 双谐振, 周期温度调谐	信号光 (1.59 μm), 闲频光 (3.006 μm), 总功率 300 mW, 光光转换效率 37%
华北光电技术研究所 ^[33]	2012	Tm: YAP, 1.99 μm , 13.7 W, 10 kHz	ZnGeP ₂ , I类双谐振	4.388, 4.14 μm 输出, 最大输出功率 7.16 W, 光光转换效率 49.4%, 斜效率 48.9%

2.4 DF 激光器

DF 激光器是目前可获得 3 ~ 5 μm 波长最高功率输出的激光源,也是被认为最具有应用前景、可直接输出中波红外激光的相干光源,其工作原理与已被广泛研究的氟化氢(HF)激光器^[34-35]相同,都是利用工作物质本身化学反应中释放的能量建立粒子数反转从而受激辐射产生激光的,所以实际上也属于化学激光器的范畴^[36]。该激光器的输出波长为 3.5 ~ 4.2 μm 。国外对该激光器的相关技术研究已较为成熟,而国内相对较弱。

根据运转方式的不同,可将该激光器分为连

续 DF 激光器和脉冲 DF 激光器。连续 DF 激光器的代表是燃烧驱动连续波 DF 激光器,由于该种激光器采用的是燃烧驱动技术和超音速混合技术,激光功率获得飞速发展,1983 年美国建成了一台输出功率达 2.2 MW 的激光装置(MIR-ACL)。虽然其输出功率已发展至武器级水平,但因实用化的诸多因素的限制,燃烧驱动连续波 DF 激光器至今并未应用到战场上,近年来对于该种激光器的研究甚少。国内的国防科技大学也对连续波 DF 激光器开展了相关研究^[37-40]。脉冲 DF 激光器分为链式和非链式两种:链式脉冲 DF 激

光器更适用于单脉冲运作方式,其输出能量及电效率高,但重频运转方式下有爆炸危险和不可控的缺点;非链式虽然转换效率不高,但因易于重频运转而受到研究者的关注,成为近年来研究的热点。在引发脉冲 DF 激光器化学反应的方式上,以放电引发方式为主,其相关的研究也层出不穷^[41-43],而放电引发中的自持体放电具有较大吸引力。然而,该激光器最初得到的输出能量并不高,很难超过 10 J 的水平,学者们认为其主要障碍在于作为 F 原子供主的 SF₆ 气体本身的强电负特性。DF 激光器中 F 原子主要是来自于高能电子对 SF₆ 的碰撞解离, SF₆ 的强电负性使得 F 原子

产出受到影响,继而影响受激态 DF 分子的数量,最终影响激光的输出能量。俄罗斯科学院普通物理所的 Firsov 团队提出的自引发体放电 (SIVD) 技术^[44],使得 DF 激光器的单脉冲输出能量提高了一个数量级,达到 325 J,位于世界领先水平。而对于重频运转的激光器,需要考虑的因素较多,如工作物质的纯度保证、基态粒子的吸收处理、气体循环系统的设计及引发方式的可靠稳定性等。非链式脉冲 DF 激光器的研究机构主要集中在俄罗斯、法国等发达国家,国内则只有中科院北京电子所、中科院长春光机所^[45]等少数几个单位,其近年来的技术进展情况见表 3。

表 3 非链式脉冲 DF 激光器的研究进展

Tab. 3 Development of pulsed nonchain DF lasers

研究单位	年代	工作物质	引发方式	主要输出技术指标
Brunet, France ^[46]	1995	SF ₆ 、D ₂ 和 Ne	光触发放电	单脉冲能量 3 J
Brunet, France ^[47]	1997	SF ₆ 、C ₆ D ₁₂ 和 Ne	光触发放电	单脉冲能量 8 J;重频 65 Hz,平均功率 450 W,电转换效率 2.3%
Institute of General Physics, Russian Academy of Sciences ^[48]	1998	SF ₆ 和 D ₂	自持体放电	输出能量 115 J,电转换效率 2.2%
Russian Federal Nuclear Centre ^[49]	2000	SF ₆ 和 D ₂	自持体放电	输出能量 10.5 J,电转换效率 2.2%
General Physics Institute, Russian Academy of Sciences ^[50]	2000	SF ₆ 和 D ₂	自引发放电	输出能量 325 J,电转换效率 3.4%
Russian Federal Nuclear Centre ^[51-52]	2001	SF ₆ 和 D ₂	自持体放电	重频 10 Hz,输出功率 400 W;重频 1 200 Hz,平均输出功率 25 ~ 30 W
High Current Electronics Institute, Russia ^[53]	2005	SF ₆ 和 D ₂	自持体放电	输出能量 1 J,电转换效率 5%
中科院电子学研究所 ^[54]	2007	SF ₆ 和 D ₂	紫外预电离自持放电	重频 1 ~ 3 Hz,最大输出能量 1.2 J
Russian Federal Nuclear Centre ^[55]	2009	SF ₆ 和 D ₂	自持体放电	重频 2 200 Hz,输出功率 33 W,电转换效率 1.6%
中科院长春光机所 ^[56]	2012	SF ₆ 和 D ₂	紫外预电离自持放电	单脉冲能量 3.58 J,脉宽 215 ns,峰值功率 16.65 MW,电光转换效率 2.08%

2.5 Fe²⁺:ZnSe 固体激光技术

OPO、掺 Fe²⁺ 的固体激光器均属于能够实现中红外激光输出的固体激光器范畴,而掺 Fe²⁺ 的固体激光器是可以实现直接激射的一种新型中红外固体激光器,这里主要介绍以 ZnSe 为基质材料

的掺 Fe²⁺ 激光器的相关研究进展情况。

以 ZnSe 为基质材料的最早激光器为 Cr²⁺:ZnSe 中红外激光器,国内外相关的研究较多,其可调谐范围为 2 ~ 3 μm^[57-60],为向长波区域扩展,以 ZnSe 为基质材料的掺 Fe²⁺ 激光器引起

了研究者的广泛关注。

图2给出了 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体的光谱特性曲线^[61],由图中可知,该晶体的吸收峰位于 $3\ \mu\text{m}$ 附近,发射波段刚好位于中红外波段。另外由于 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体自身存在多声子淬灭效应,随温度升高激活介质寿命迅速减短,所以最初的研究都是在制冷条件下进行的,直到近几年高能量、窄脉冲泵浦源的使用才实现了室温下的受激辐射。表4列出了近几年国外的主要研究成果。值得关注的是,IPG Photonics Corp.已经有在室温下($T=300\ \text{K}$)可调谐波段为 $3.95\sim 5.05\ \mu\text{m}$ 的中红外激光器出售。

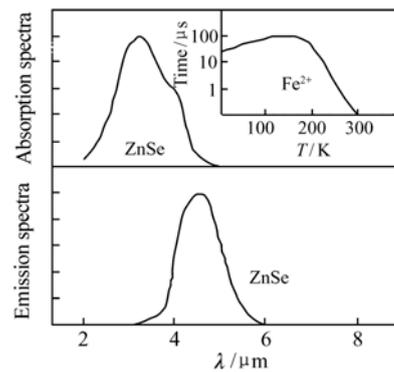


图2 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体的光谱特性曲线

Fig.2 Absorption and emission spectra of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ crystals

表4 国内外 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 研究进展

Tab.4 Development of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$

研究单位	年代	温度条件	泵浦源	输出特性
University of Alabama, USA ^[62]	2005	RT (room temperature)	Nd:YAG(波长 $2.92\ \mu\text{m}$,脉宽 $<5\ \text{ns}$,能量 $45\ \text{mJ}$)	$3.9\sim 4.8\ \mu\text{m}$, 输出能量 $1\ \mu\text{J}$
University of Alabama, USA ^[63]	2006	RT	Er:YAG(波长 $2.94\ \mu\text{m}$,脉宽 $60\ \text{ns}$,重频 $\geq 60\ \text{Hz}$,能量 $10\ \text{mJ}$)	$3.95\sim 5.05\ \mu\text{m}$,最大输出能量 $0.37\ \text{mJ}$,最大斜效率 13% ,脉宽 $>100\ \text{ns}$
Moscow Institute of Physics and Technology, Russia ^[64]	2007	RT	Er:YAG(波长 $2.94\ \mu\text{m}$,脉宽 $60\ \text{ns}$,能量 $20\ \text{mJ}$)	$3.95\sim 5.1\ \mu\text{m}$,最大输出能量 $1.42\ \text{mJ}$,最大斜效率 17%
M. E. Doroshenko, Russia ^[65]	2009	RT	Er:YAG(波长 $2.94\ \mu\text{m}$,脉宽 $160\sim 300\ \text{ns}$,能量 $14\sim 30\ \text{mJ}$,重频 $1\ \text{Hz}$)	$4.3\sim 4.6\ \mu\text{m}$,最大输出能量 $0.58\ \text{mJ}$,最大斜效率 38%
Czech Technical University, Czech ^[66]	2010	RT	Er:YAG(波长 $2.937\ \mu\text{m}$,脉宽 $300\ \text{ns}$,能量 $10\sim 15\ \text{mJ}$,重频 $1\ \text{Hz}$)	$3.9\sim 4.7\ \mu\text{m}$,最大输出能量 $1.2\ \text{mJ}$,斜效率 12% ,脉宽 $60\sim 100\ \text{ns}$
University of Alabama, USA ^[67]	2011	$236\sim 300\ \text{K}$	Er:Cr:YSGG(能量 $33\ \text{mJ}$,能量密度 $0.35\ \text{J}/\text{cm}^2$,脉宽 $20\ \text{ns}$,重频 $6.7\ \text{Hz}$)	$4.3\ \mu\text{m}$ ($236\ \text{K}$) $\sim 4.37\ \mu\text{m}$ ($300\ \text{K}$),最大输出能量 $4.7\ \text{mJ}$ (@ $4.3\ \mu\text{m}$) 和 $3.6\ \text{mJ}$ (@ $4.37\ \mu\text{m}$),斜效率 19% 、 16%
IPG Photonics, USA ^[68]	2012	$77\sim 220\ \text{K}$	Er:YAG(波长 $2.94\ \mu\text{m}$,脉宽 $250\ \mu\text{s}$,最高输出能量 $1.3\ \text{J}$)	$4.14\ \mu\text{m}$ ($77\ \text{K}$) $\sim 4.65\ \mu\text{m}$ ($220\ \text{K}$),最大输出能量 $0.42\ \text{J}$ (@ $4.14\ \mu\text{m}$),光效率 32%

3 结束语

在获得 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 输出的激光技术中, CO_2 激

光器倍频和OPO都是利用红外晶体的非线性效应实现的,其共同的技术难点在于如何提高晶体的频率转换效率和晶体的抗损伤阈值,研究的重点主要集中在优化非线性晶体的特性(包括光学

特性和机械特性)上,而开发大体积(大面积)、高质量的晶体是提高激光器输出功率最有效的技术途径,采取掺杂的方法可望得到性能更优异的非线性光学晶体。但由于受到这种激光产生机制的限制,尚无法实现此波段的高功率激光输出。

CO 激光器可通过采取腔镜镀膜、滤光片选择等方法对基频波段的输出加以抑制,在低温下(常用的方法为液氮冷却或气体膨胀冷却)实现泛频波段(2.6 ~ 4.2 μm)的运转。CO 泛频激光器产生的臭氧高温时易发生爆炸,因而必须确保激光器低温运行,这也是该技术的难点之一。而低温运作的要求使得其实用化难度大大增加,因此其实现高功率输出的前景亦不容乐观。

基于非链式化学反应的脉冲 DF 激光器近年来技术发展迅速,已获得数百焦耳的激光输出,特别是自引发放电技术的采用有效地改善了大体积放电区域的电场均匀性,显著提高了该激光器的注入功率和电光转换效率,实现了激光器的高功率输出。然而,通常情况下此类激光器的体积较为庞大,且工作气体的消耗、反应产物的处理等问

题是制约其实用化的主要因素。因此,下一步的研究除了需要考虑重频工作状态下的放电稳定性问题,还应重点解决工作气体的补充和反应生成物的处理,减少和消除其工作对环境的影响。

以 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 为代表的新型固体激光器处于新生阶段,目前得到的通常是非常温条件下的激光输出,因而要想将该类激光器高效的实用化,工作条件是首要需要解决的问题。到目前为止,该类激光器虽可实现 3 ~ 5 μm 波段的输出,但输出的能量还处于毫焦水平,有待进一步深入研究。

综上所述,由于 3 ~ 5 μm 波段激光源具有广泛的应用领域和非常高的应用价值,正受到越来越多的关注,研究人员也正在对现有的技术进行优化,并不断探索新的技术途径,以期获得更高的激光功率、更好的光束质量,以及激光器的小型化和实用化。从目前的技术发展趋势来看,基于非链式化学反应的脉冲 DF 激光器在高功率输出方面占据明显的优势,而 OPO 和新型固体激光器则在小型化、可调谐等方面更具发展潜力。

参考文献:

- [1] 林洪沂,郭劲,檀慧明,等. 泛频 CO 激光器研究进展[J]. 激光与红外,2009,39(4):358-362.
LIN H Y, GUO J, TAN H M, *et al.*. Research and progress of first overtone CO laser[J]. *Laser Infrared*, 2009, 39(4): 358-362. (in Chinese)
- [2] 郭汝海,施龙,王思雯,等. HF/DF 化学激光器的研究进展[J]. 光机电信息,2010,27(3):30-35.
GUO R H, SHI L, WANG S W, *et al.*. Development review of HF/DF chemical lasers[J]. *OME Information*, 2010, 27(3):30-35. (in Chinese)
- [3] 王宇虹,任德明,胡孝勇,等. TEA CO₂ 激光器倍频研究的进展[J]. 激光与光电子学进展,2002,39(4):26-29.
WANG Y H, REN D M, HU X Y, *et al.*. Research progress on frequency doubling of TEA CO₂ lasers[J]. *Laser Optoelectronics Progress*, 2002, 39(4):26-29. (in Chinese)
- [4] QU Y, KANG Z H, WANG T J, *et al.*. The detection of carbon monoxide by the second harmonic generation of CO₂ laser[J]. *Laser Physics Lett.*, 2007, 4(3):238-241.
- [5] 阮鹏,谢冀江. 中红外光参量振荡器的最新进展[J]. 激光杂志,2010,31(4):1-3.
RUAN P, XIE J J. The latest progress of mid-infrared optical parametric oscillator[J]. *Laser J.*, 2010, 31(4):1-3. (in Chinese)
- [6] KU SH A, CHU W CH, LUO CH W, *et al.*. Optical properties and application of GaSe:AgGaSe₂ crystal[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1):57-63.
- [7] TARASENKO V F, SITNIKOV A G, PANCHENKO A N, *et al.*. Single-pulse CO₂ laser frequency doubler based on GaSe and GaSe_{0.7}S_{0.3} single crystals[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(4):397-403.
- [8] 王晓铭,郭劲,郭汝海,等. 大功率 TEA CO₂ 非稳腔激光器的远场传输特性[J]. 中国光学,2012,5(6):671-676.
WANG X M, GUO J, GUO R H, *et al.*. Far-field transmittance characteristics of high-power unstable resonator TEA CO₂ laser[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):671-676. (in Chinese)
- [9] 张兴亮,郭立红,张传胜,等. CO₂ 激光器高压脉冲触发系统的设计[J]. 中国光学,2012,5(4):416-422.

- ZHANG X L, GUO L H, ZHANG CH SH, *et al.*. Design of high-voltage pulse trigger system for CO₂ laser[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 416-422. (in Chinese)
- [10] SCHUNEMANN P G, SETZLER S D, POLLAK T M. Phase-matched crystal growth of AgGaSe₂ and AgGa_{1-x}In_xSe₂[J]. *J. Crystal Growth*, 2000, 211: 257-264.
- [11] 任德明, 张莉莉, 曲彦辰, 等. 等离子体开关在 TEA CO₂ 激光倍频中的应用[J]. 中国激光, 2004, 31(9): 1061-1064.
REN D M, ZHANG L L, QU Y CH, *et al.*. Application of plasma shutter in second harmonic generation of TEA CO₂ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(9): 1061-1064. (in Chinese)
- [12] 吴海信, 张维, 陶德节, 等. 连续波可调谐 CO₂ 激光在 AgGaSe₂ 中倍频研究[J]. 量子电子学报, 2004, 21(4): 440-443.
WU H X, ZHANG W, TAO D J, *et al.*. Second harmonic generation in AgGaSe₂ with tunable CW CO₂ lasers [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, 21(4): 440-443. (in Chinese)
- [13] DAS S, GHOSH C, VOEVODINA O G, *et al.*. Modified GaSe crystal as a parametric frequency converter [J]. *Appl. Physics B*, 2006, 82: 43-46.
- [14] 李殿军, 杨贵龙, 谢冀江, 等. 9.3 μm 脉冲 CO₂ 激光倍频实验[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2684-2691.
LI D J, YANG G L, XIE J J, *et al.*. Experiments of second harmonic generation of 9.3 μm pulsed CO₂ lasers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2684-2691. (in Chinese)
- [15] GONZALEZ L P, UPCHURCH D C, SCHUNEMANN P G, *et al.*. Continuous-wave second harmonic generation of a tunable CO₂ laser in orientation-patterned GaAs [C]//Conference on laser and Electro-optics (CLEO), May 1-6, 2011, Baltimore, MD, 2011. .
- [16] LI D J, GUO J, YANG G L, *et al.*. High power 4.65 μm single-wavelength laser by second-harmonic generation of pulsed TEA CO₂ laser in AgGaSe₂ and ZnGeP₂ [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(4): 725-729.
- [17] IONIN A A, KURNOSOV A K, NAPARTOVICH A P, *et al.*. Lasers on overtone transitions of carbon monoxide molecule [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(1): 144-186.
- [18] ZHANG L M, XIE J J, GUO J, *et al.*. CO laser frequency mixing in nonlinear crystals ZnGeP₂ and GaSe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 277-286.
- [19] 于清旭, 李少成, 韩瑞萍. 低温流动式可调谐连续波泛频 CO 激光器的研究[J]. 大连理工大学报, 1999, 39(4): 588-590.
YU Q X, LI SH CH, HAN R P. Investigation of LN₂ cooled CW CO-overtone laser [J]. *J. Dalian University Technology*, 1999, 39(4): 588-590. (in Chinese)
- [20] 林钧岫, 王晓旭, 于清旭. 低温 3.0~4.2 μm 波段第一泛频一氧化碳激光器[J]. 大连理工大学报, 2009, 49(4): 617-624.
LIN J Y, WANG X X, YU Q X. 3.0~4.2 μm low temperature cooled first overtone CO-laser [J]. *J. Dalian University Technology*, 2009, 49(4): 617-624. (in Chinese)
- [21] YURII G U, MATTHEW G, IGOR V A, *et al.*. Compact overtone band carbon monoxide laser [J]. *Opt. Commun.*, 2006, 263: 105-110.
- [22] IONIN A A, KOZLOV A Y, SELEZNEV L V, *et al.*. RF discharge slab CO laser operating in both fundamental and first-overtone bands [J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282: 629-634.
- [23] IONIN A A, KOZLOV A Y, SELEZNEV L V, *et al.*. Slab RF discharge overtone CO laser [J]. *SPIE*, 2011, 7994: 79941N.
- [24] 孙文佳. 内腔光参量振荡器及新波长固体激光器的研究[D]. 济南: 山东大学, 2011 年.
SUN W J. Research on intracavity optical parametric oscillator and solid-state lasers at new wavelengths [D]. Ji'nan: Shandong University, 2011. (in Chinese)
- [25] EICHHORN M, HIRTH A. Electro-optically Q-switched Tm: YAG laser pumped ZGP optical-parametric oscillator [C]//Conference on laser and Electro-Optics, May 4-9, 2008, San Jose, CA, 2008.
- [26] 彭跃峰, 鲁燕华, 谢刚, 等. 准相位匹配 PPMgLN 光参量振荡技术[J]. 中国激光, 2008, 35(5): 670-674.
PENG Y F, LU Y H, XIE G, *et al.*. Investigation of quasi-phase-matched optical parametric oscillator based on PPMgLN [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(5): 670-674.

- [27] XIA L ZH, SU H, RUAN SH CH. Widely continuous-tunable 2.789 ~ 4.957 μm twin-MgO:PPLN cascaded optical parametric oscillator[J]. *Chinese Optics Letter*, 2009, 7(11):1038-1040.
- [28] 熊波, 马建立, 林学春, 等. 1.35 W, 3.85 ~ 3.95 μm 连续调谐周期极化掺镁铌酸锂光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2009, 36:7-10.
XIONG B, MA J L, LIN X CH, *et al.*. Continuous tuning of a 3.85 ~ 3.95 μm , 1.35 W optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36:7-10. (in Chinese)
- [29] KOKABEE O, ESTEBAN-MARTIN A, EBRAHIM-ZADEH M. Efficient, high-power, ytterbium-fiber laser pumped picosecond optical parametric oscillator[J]. *Optics Lett.*, 2010, 35(19):3210-3212.
- [30] 贾宝中. 基于化学计量比钽酸锂中红外光参量振荡器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
JIA B SH. Research on the mid-infrared optical parametric oscillator based on stoichiometric lithium tantalite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [31] PENG Y F, WEI X B, WANG W M. Mid-infrared optical parametric oscillator based on ZnGeP_2 pumped by 2- μm laser[J]. *Chinese Optics Lett.*, 2011, 9(6):061403.
- [32] KIRCHNER M, NIEDRINGHAUS A, DURFEE C, *et al.*. Ultrafast optical parametric oscillator pumped by an All Normal Dispersion(ANDi) Yb: Fiber oscillator[C]//Conference on Laser and Electro-optics, May 6-11, 2012, San Jose, CA, 2012.
- [33] 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):0702006.
WEI L, XIAO L, HAN L, *et al.*. ZGP optical parametric oscillator pumped by Tm:YAP laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, 39(7):0702006. (in Chinese)
- [34] HUANG K, TANG Y, YI A P, *et al.*. Effect of gas circulation on energy stability of discharge pumped repetitively pulsed HF laser[J]. The 2nd International Symposium on Laser Interaction with Matter, Sept. 9-12, 2012, Xi'an, China, 2012: 158.
- [35] 易爱平, 刘晶儒, 唐影, 等. 电激励重复频率非链式 HF 激光器[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2):360-366.
YI A P, LIU J R, TANG Y, *et al.*. Electrically initiated repetitive-pulsed non-chain HF lasers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):360-366. (in Chinese)
- [36] 陈家璧. 激光原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
CHEN J B. *Principle and Application of Lasers* [M]. Beijing: Publishing House of electronics Industry, 2004. (in Chinese)
- [37] 袁圣付, 华卫红, 姜宗福. 采用超音速低温喷管的小型连续波 DF 化学激光器性能分析[J]. *中国激光*, 2003, 30(4):295-299.
YUAN SH F, HUA W H, JIANG Z F. Performance analysis of small continuous wave DF chemical laser with HYLTE nozzle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, 30(4):295-299. (in Chinese)
- [38] 罗威, 袁圣付, 陆启生. 小型电激励连续波 HF/DF 化学激光器研究进展[J]. *激光与红外*, 2011, 41(4):371-375.
LUO W, YUAN SH F, LU Q SH. Research development of small scale discharge driven continuous-wave HF/DF chemical laser[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4):371-375. (in Chinese)
- [39] 闫宝珠, 袁圣付, 陆启生, 等. 直排型 DF/HF 化学激光器气流通道模型实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(4):563-567.
YAN B ZH, YUAN SH F, LU Q SH, *et al.*. Experimental investigation on small-scale model of gas channel in directly drained CW DF/HF chemical lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(4):563-567. (in Chinese)
- [40] 王红岩, 张焯喆, 李强, 等. 氮稀释高效电激励连续波 HF/DF 化学激光器[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2):304-309.
WANG H Y, ZHANG X ZH, LI Q, *et al.*. Efficient nitrogen diluted discharge-driven continuous wave HF/DF chemical lasers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):304-309. (in Chinese)
- [41] APOLLONOV V V, FIRSOV K N, KAZANTSEV S Y, *et al.*. High-power non-chain HF(DF) lasers initiated by self-sustained volume discharge[J]. *SPIE*, 1998, 3574:374-384.
- [42] APOLLONOV V V, KAZANTSEV S Y, SAIFULIN A V, *et al.*. Discharge characteristics in a nonchain HF(DF) laser[J]. *Quantum Electronics*, 2000, 30(6):483-485.

- [43] BELEVTSSEV A A, FIRSOV K N, KAZANTSEV S Y, *et al.*. Electron detachment instability and self-organization of gas discharge plasma in working mixtures of chemical non-chain HF(DF) lasers[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(1):31-40.
- [44] APOLLONOV V V, BELEVTSSEV A A, FIRSOV K N, *et al.*. Self-initiated volume discharge in non-chain HF lasers based on SF₆-hydrocarbon mixtures[J]. *Quantum Electronics*, 2000, 30: 207-214.
- [45] RUAN P, ZHANG L M, XIE J J, *et al.*. Key technologies of pulsed non-chain DF lasers[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 313-318.
- [46] BRUNET H, MABRU M, VOIGNIER F. High energy-high average power pulsed HF/DF chemical laser[J]. *SPIE*, 1995, 2502:388-392.
- [47] BRUNET H. Improved DF performance of a repetitively pulsed HF/DF laser using a deuterated compound[J]. *SPIE*, 1997, 3092:494-497.
- [48] APOLLONOV V V, KAZANTSEV S Y, ORESHKIN V F, *et al.*. Nonchain electric-discharge HF(DF) laser with a high radiation energy[J]. *Quantum Electronics*, 1998, 28(2):116-118.
- [49] BORISOV V P, BURTSEV V V, VELIKANOV S D, *et al.*. Electric-discharge DF laser with a pulsed energy of the order of 10 J[J]. *Quantum Electronics*, 2000, 30(3):225-228.
- [50] APOLLONOV V V, FIRSOV K N, KAZANTSEV S Y, *et al.*. Scaling up of non-chain HF(DF) laser initiated by self-sustained volume discharge[J]. *SPIE*, 2000, 3886:370-381.
- [51] AKSENOV Y N, BORISOV V P, BURTSEV V V, *et al.*. A 400-W repetitively pulsed DF laser[J]. *Quantum Electronics*, 2001, 31(4):290-292.
- [52] BUTSYKIN I L, VELIKANOV S D, EVDOKIMOV P A, *et al.*. Repetitively pulsed DF laser with a pulse repetition rate up to 1200 Hz and an average output power of ~ 25 W[J]. *Quantum Electronics*, 2001, 31(11):957-961.
- [53] PANCHENKO A N, ORLOVSKII V M, TARASENKO V F, *et al.*. Non-chain HF and DF lasers pumped by electric discharge[J]. *SPIE*, 2005, 5777: 313-314.
- [54] 柯常军, 张阔海, 孙科, 等. 重复频率放电引发的脉冲 HF(DF) 激光器[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(增):36-38.
KE CH J, ZHANG K H, SUN K, *et al.*. A periodically pulsed HF/DF gas discharge laser[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2007, 36(s):36-38. (in Chinese)
- [55] VELIKANOV S D, EVDOKIMOV P A, ZAPOL'SKY A F, *et al.*. Pulse periodic HF(DF)-laser of atmospheric pressure with pulse repetition rate up to 2200 Hz[J]. *SPIE*, 2009, 7131:71310V.
- [56] RUAN P, ZHANG L M, TAN G J, *et al.*. Experimental study on non-chain electric-discharge pulsed DF laser[C]. The 2nd International Symposium on Laser Interaction with Matter, Sept. 9-12, 2012, Xi'an, China, 2012:157.
- [57] 杨勇, 唐玉龙, 徐剑秋, 等. Cr²⁺:ZnSe 的激光输出和调谐性能[J]. *中国激光*, 2008, 35(10):1495-1499.
YANG Y, TANG Y L, XU J Q, *et al.*. Laser output and tuning ability of Cr²⁺:ZnSe[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(10):1495-1499. (in Chinese)
- [58] KORANDA P, ULC J, DOROSHENKO M, *et al.*. Cr:ZnSe laser pumped with Tm:YAP microchip laser[J]. *SPIE*, 2010, 7578:757826.
- [59] KIM C, PEPPERS J M, MARTYSHKIN D V, *et al.*. Chromium doped ZnSe and ZnS gain media for optically and electrically pumped mid-IR lasers[J]. *SPIE*, 2009, 7193:71932R.
- [60] KORANDA P, JEL N KOV H, NEMEC M, *et al.*. Laser action in bulk Cr:ZnSe crystals[J]. *SPIE*, 2008, 6998:69980R.
- [61] 张利明, 周寿桓, 赵鸿, 等. Fe²⁺ 掺杂中红外固体激光器技术综述[J]. *激光与红外*, 2012, 42(4):360-364.
ZHANG L M, ZHOU SH H, ZHAO H, *et al.*. Introduction of Fe²⁺ doped mid-infrared solid state laser[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(4):360-364. (in Chinese)
- [62] KERNAL J, FEDOROV V V, GALLIAN A, *et al.*. 3.9-4.8 μm gain-switched lasing of Fe:ZnSe at room temperature[J]. *Optics Express*, 2005, 13(26):10608-10615.
- [63] FEDOROV V V, MIROV S B, GALLIAN A, *et al.*. 3.77~5.05 μm Tunable solid-state lasers based on Fe²⁺-doped ZnSe crystals operating at low and room temperatures[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 2006, 42(9):907-917.
- [64] AKIMOV V A, FROLOV M P, KOROSTELIN Y V, *et al.*. Room temperature operation of a Fe²⁺:ZnSe laser[J]. *SPIE*, 2007, 6610:661009.
- [65] DOROSHENKO M E, JEL N KOV H, KORANDA P, *et al.*. Tunable mid-infrared laser properties of Cr²⁺:ZnMgSe and

$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ crystals[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, 7(1): 38-45.

- [66] JEL NKOV H, KORANDA P, DOROSHENKO M E, *et al.*. Room-temperature lasing, gain-switched, bulk, tunable Fe: ZnSe laser[J]. *SPIE*, 2010, 7721: 772111.
- [67] MYOUNG N, MIROV M S, FEDOROV V V, *et al.*. High-energy gain-switched mid-IR lasers based on Cr and Fe doped ZnSe[C]//Conference on Laser and Electro-optics, May 1-6, 2011, Baltimore, MD, 2011.
- [68] FEDOROV V V, MARTYSHKIN D V, MIROV M, *et al.*. High Energy 4.1 ~ 4.6 μm Fe: ZnSe laser[C]//Conference on Laser and Electro-optics, May 6-11, 2012, San Jose, CA, 2012.

作者简介:



谭改娟(1985—),女,河北邯郸人,硕士研究生,2011年于武汉理工大学获得学士学位,主要从事激光技术及其应用的研究。E-mail: tangaijuan-1030@163.com



杨贵龙(1966—),男,吉林长春人,研究员,硕士生导师,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事大功率脉冲气体激光器研究。E-mail: yanggl@ciomp.ac.cn



谢冀江(1959—),男,江苏镇江人,学士,研究员,硕士生导师,1983年于哈尔滨科学技术大学获得学士学位,主要从事激光器及其应用技术方面的研究。E-mail: laserxjj@163.com



陈飞(1982—),男,河南南阳人,博士,助理研究员,2005年于长春理工大学获得学士学位,2007年、2011年于哈尔滨工业大学分别获得硕士学位、博士学位,主要从事高功率激光器及非线性频率变化技术等方面的研究。E-mail: feichen@yahoo.cn



张来明(1979—),男,山东青州人,博士,副研究员,硕士生导师,2002年于鲁东大学获得学士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事高功率气体激光器及激光辐射效应方面的研究。E-mail: lightcoming@163.com



杨欣欣(1972—),男,吉林长春人,学士,工程师,主要从事激光加工技术与设备等方面的研究。E-mail: 69918633@qq.com



郭劲(1964—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1986年于吉林工学院获得学士学位,1989年、2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士学位、博士学位,主要从事光电测控技术和光学工程技术方面的研究。E-mail: guojin6957@163.com



阮鹏(1985—),女,湖北宜昌人,博士研究生,2009年于东北林业大学获得学士学位,主要从事非链式DF激光器理论及技术方面的研究。E-mail: ruanpeng911@yahoo.com.cn



邵春雷(1963—),男,黑龙江牡丹江人,研究员,硕士生导师,1984年于东北工学院获得学士学位,主要从事高功率脉冲气体激光器技术的研究。E-mail: sclem@sina.com