第 8 卷　第 4 期
2015 年 8 月

中国光学
Chinese Optics

Vol. 8　No. 4
Aug. 2015

文章编号　2095-1531(2015)04-0557-10

中红外固体激光器研究进展

潘其坤
(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)

摘要:本文介绍了中红外固体激光器中新型的 Fe^{2+}:ZnSe 激光器和基于MgO:PPLN、$ZnGeP_2$晶体的光参量振荡器的发展现状,讨论了它们在发展过程中遇到的技术难题,探讨了中红外固体激光器的未来发展方向。波长为 3 ~ 5 μm 的中红外固体激光器具有效率高、体积小和重量轻等优点,在工业、医疗、军事等方面具有重要应用价值,研制大尺寸、高质量中红外激光晶体和输出波长更长的红外高功率激光泵浦源已成为中红外固体激光器未来发展方向之一。

关　键　词:固体激光器;中红外;Fe^{2+}:ZnSe 激光器;光参量振荡器
中图分类号:TN248.1　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20150804.0557

Progress of mid-infrared solid-state laser

PAN Qi-kun
(*State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter*, *Changchun Institute of Optics*, *Fine Mechanics and Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *panqikun*2005@163.*com*

Abstract: Mid-infrared solid lasers, such as new type of Fe^{2+}:ZnSe laser and Optical Parameter Oscillator (OPO) based on MgO:PPLN, $ZnGeP_2$ crystals, are reviewed in this paper. The scientific and technical problems of the mid-infrared solid laser are analyzed. The technical tendencies of mid-infrared solid laser are summarized. Based on the advantages of high efficiency, light weight and small volume, 3 - 5 μm mid-infrared solid-state laser sources have very important applications in the fields such as industry, medicine and military. The development of mid-infrared laser crystal with large bulk and high quality, and laser pump sources with high power and longer wavelength has become one of the developing trends for mid-infrared solid state laser in the future.

Key words: solid-state laser; mid-infrared; Fe^{2+}:ZnSe laser; Optical Parameter Oscillator (OPO)

收稿日期:2015-02-17;**修订日期**:2015-03-28
基金项目:中国科学院长春光机所创新基金(No. Y44222C150)

1 引 言

中红外波段3～5 μm是良好的大气透射窗口,对应着物体的红外辐射谱,具有对比度高及高湿度条件下穿透能力强等优点,在激光雷达、大气遥感、激光医疗、光谱学、军事等领域具有重要的应用价值[1-8]。

目前,固体激光器实现中红外激光输出有两种常用的技术手段:一是以Fe^{2+}离子掺杂的Ⅱ～Ⅵ族晶体为增益介质的固体激光器;二是采用光学频率变换技术的光参量振荡器(Optical Parameter Oscillator,OPO)。可掺杂Fe^{2+}离子实现中红外激光输出的Ⅱ～Ⅵ族晶体包括ZnS、ZnSe、ZnTe和CdSe等,它们对应的激光光谱范围分别为:3.49～4.65 μm,3.77～5.05 μm,4.35～5.45 μm和4.7～6.1 μm[9-12]。Fe^{2+}:ZnSe固体激光器具有非常宽的吸收带宽,同时它在中红外波段具有很宽的波长调谐范围,且输出激光光束质量好[13-15],因此Fe^{2+}:ZnSe是掺Fe^{2+}固体激光器中最受关注的激光光源。OPO是利用晶体的非线性效应将可见或近红外激光的频率变换到中红外波段。可用于中红外OPO的非线性晶体主要有磷酸氧钛钾(KTP)、硒镓银($AgGaSe_2$)、磷锗锌($ZnGeP_2$)、掺杂氧化镁的周期性极化铌酸锂(MgO:PPLN)等[16-19]。KTP OPO发展较早,但受晶体通光波段限制,其输出波长一般小于4 μm。$AgGaSe_2$ OPO易于实现中红外激光输出,但其非线性晶体热导率小,运转过程中易产生热透镜效应,限制了该激光器的输出功率。MgO:PPLN OPO采用准相位匹配技术周期性地改变非线性极化率,消除了走离效应对光参量变换的影响,同时通过改变MgO:PPLN晶体的极化周期可以方便地实现输出波长调谐。因此,近年来采用MgO:PPLN OPO获得中红外激光输出受到了广泛的关注[20-21]。$ZnGeP_2$晶体具有良好的导热性和较高的非线性系数,发展较为成熟,是实现中红外OPO激光输出较好的技术手段,目前已采用该技术获得了数十瓦的激光输出。

本文重点阐述了Fe^{2+}:ZnSe和基于MgO:PPLN、$ZnGeP_2$晶体的OPO固体激光器实现中红外激光输出的技术途径及研究进展,并分析了限制它们输出性能的主要因素,提出了未来中红外固体激光器的发展趋势。

2 国内外研究现状

2.1 Fe^{2+}:ZnSe激光器

将FeSe掺杂进入ZnSe基质,Fe^{2+}部分取代正四面体晶格中心的Zn^{2+}离子形成Fe^{2+}:ZnSe晶体。Fe^{2+}的外层电子组态为$1s^2 2s^2 2p^6 3p^6 3d^6$,其最外壳层$3d^6$电子的基态5D在ZnSe正四面体晶体场中分裂为二重简并的基态^5E能级和三重简并的激发态$^5T_2$能级,能级间隔对应中红外波段。受到晶体场、自旋-轨道耦合作用,基态^5E能级而分裂成5个等间距的能级结构(Γ_1、Γ_4、Γ_3、Γ_5、Γ_2),能级间隔为15 cm^{-1},而激发态$^5T_2$三重态能级分别分裂成Γ_1、Γ_4、Γ_5、Γ_3、Γ_4、Γ_5 6个能级,Fe^{2+}的能级结构如图1所示。

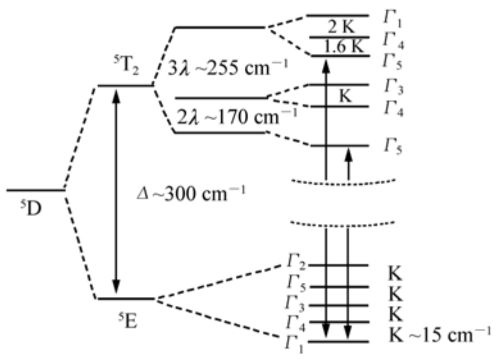


图1 Fe^{2+}:ZnSe能级结构

Fig. 1 Energy level structure of Fe^{2+}:ZnSe

1999年,Adams首次提出了Fe^{2+}:ZnSe固体激光器,并在温度低于18 K条件下,实现了高效率的4.0～4.5 μm激光输出[22],之后,Fe^{2+}:ZnSe固体激光器迎来了蓬勃发展期。以美国和俄罗斯为首的科技强国对该激光器的研究投入了大量精力,受限于Fe^{2+}:ZnSe晶体室温下超短的荧光寿命(370 ns)及短波红外波段窄脉宽固体激光泵浦源的发展,开始几年该激光器只能在低温条件下工作。近年来随着新技术、新机制泵浦源的发展,

室温条件下 Fe^{2+}:ZnSe 激光器逐渐实现了激光输出,且输出能量逐步提升。现将近年来的几个较为重要的成果及发展历程介绍如下。

2011 年,美国阿拉巴马大学 Myoung 等人采用了输出波长为 2.8 μm,脉冲宽度为 20 ns,最大单脉冲能量为 33 mJ 的闪光灯泵浦主动调 Q Er:Cr:YSGG 激光器为泵浦源;利用热扩散法制备了尺寸为 8 mm × 8 mm × 3 mm 的 Fe^{2+}:ZnSe 晶体,掺杂浓度为 $2\times10^{19}\ cm^{-3}$,在 236 ~ 300 K 温度范围内实现了中红外激光输出,实验装置如图 2 所示[23]。在室温 300 K 时获得最大单脉冲能量为 3.6 mJ,斜效率为 15.7%,输出波长为 4.37 μm;在 236 K 时,获得最大单脉冲能量为 4.7 mJ,斜效率为 18.9%,输出波长为 4.3 μm。该实验证实了通过增大泵浦源能量可成倍增加中红外激光输出,并指出泵浦源输出水平是限制 Fe^{2+}:ZnSe 固体激光器能量提升的主要因素。

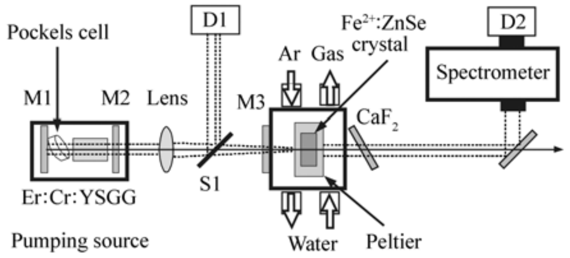


图 2　主动调 Q Er:Cr:YSGG 激光泵浦的 Fe^{2+}:ZnSe 激光器实验装置

Fig. 2　Fe^{2+}:ZnSe laser pumped by active Q-switch Er:Cr:YSGG laser

2012 年,美国空军实验室的 Evans 采用双端面泵浦技术实现了 Fe^{2+}:ZnSe 激光器的中红外连续输出,实验装置如图 3 所示[15]。泵浦源为连续运转的 Er:YAG 激光,输出波长为 2 940 nm,单台平均功率为 1.5 W,总泵浦功率为 3 W,光束质量 $M^2\leq2$。采用热扩散法制备的 Fe^{2+}:ZnSe 晶体掺杂浓度为 $9\times10^{18}\ cm^{-3}$,尺寸为 2 mm × 6 mm × 6 mm。在 77 K 时,Fe^{2+}:ZnSe 激光器获得了 840 mW 的 4.14 μm 连续激光输出,最大斜效率达到了 47%,光束质量 $M^2\leq1.2$。该实验采用两台泵浦源和双端面同步泵浦的技术方案有效提升了泵浦能量,获得了较高的平均功率输出,但实验中 Fe^{2+}:ZnSe 晶体需采用液氮制冷(室温条件无法工作),使得其装置变得复杂,实用性受限。

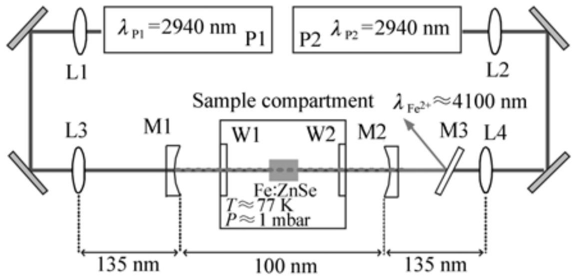


图 3　双端面泵浦的 Fe^{2+}:ZnSe 激光器实验原理图

Fig. 3　Schematic diagram of Fe^{2+}:ZnSe laser with double end pump

2013 年,俄罗斯科学院列别捷夫物理研究所的 Frolov 采用闪光灯泵浦自由运转的 Er:YAG 激光器,获得了高达 8 J 的 2.94 μm 脉冲泵浦源。运用该泵浦源泵浦 Fe^{2+}:ZnSe 晶体(掺杂浓度为 $2.6\times10^{18}\ cm^{-3}$,尺寸为 8 mm × 8 mm × 8 mm),在 85 K 的温度下获得了 2.1 J 的 4.1 μm 激光,其光-光转换效率达到 35%,斜效率达到 51%;在温度为 245 K(采用热电制冷可以获得该温度)时,实现了 1.3 J 的激光输出,其光-光转换效率达到 23%,斜效率达到 19%,实验装置如图 4 所示[24]。受益于该泵浦源的自然尖峰脉冲特性,在 295 K

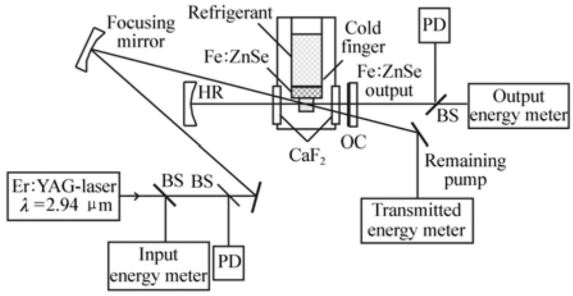


图 4　自由运转 Er:YAG 激光器泵浦的 Fe^{2+}:ZnSe 激光器实验原理图

Fig. 4　Schematic diagram of Fe^{2+}:ZnSe laser pumped by free-running Er:YAG laser

时实现了中红外 4.5 μm 的激光输出,此时泵浦阈值为 1.8 J,最大单脉冲能量为 42 mJ。这是目前固体激光器泵浦 Fe^{2+}:ZnSe 晶体获得的最高输出指标。该实验虽然采用了频率稳定性及幅值稳

定性较差的脉冲泵浦源，但获得了较高的能量输出，验证了 Fe^{2+}:ZnSe 激光器具有实现焦耳量级能量输出的能力。

2014 年，华北光电技术研究所联合哈尔滨工业大学报道了 Fe^{2+}:ZnSe 激光器[25]研究成果。他们以热扩散掺杂技术制备了 Fe^{2+}:ZnSe 晶体，掺杂浓度为 1.27×10^{18} cm^{-3}，晶体尺寸为4 mm×4 mm×2 mm。采用波长为 2.9 μm、重复频率为 1 kHz的泵浦源，当抽运功率为为 1.4 W 时，获得了中心波长为 4.45 μm，脉冲宽度为 25 ns，平均功率67 mW的室温中红外激光输出。这是国内首次报道 Fe^{2+}:ZnSe 固体激光器的实验结果。

受限于 Er^{3+} 离子较长的低能级寿命和较低的泵浦效率，目前研制室温高能量、窄脉宽、高重频的固体 Er:YAG 激光泵浦源（2.94 μm）遇到了较大困难。考虑到 Fe^{2+}:ZnSe 晶体的吸收谱较宽（2.5～4.0 μm），采用其它泵浦源替代 Er:YAG 光源实现 Fe^{2+}:ZnSe 中红外激光室温输出备受关注。

2014，俄罗斯实验物理研究所的 Velikanov 首次报道了采用化学 HF 激光泵浦的Fe^{2+}:ZnSe激光器，实验装置如图 5 所示[26]。非链式化学 HF 激光器在 2.6～3.1 μm 范围内拥有数十条谱线，均在 Fe^{2+}:ZnSe 晶体的吸收谱范围内，且高压脉

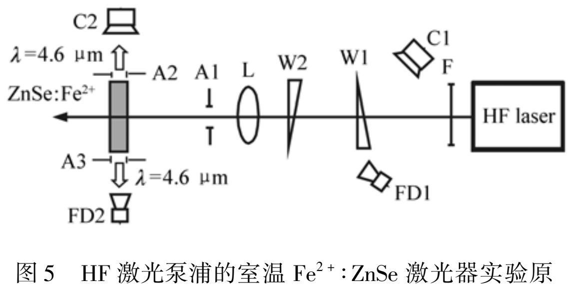


图 5　HF 激光泵浦的室温 Fe^{2+}:ZnSe 激光器实验原理图

Fig. 5　Schematic diagram of Fe^{2+}:ZnSe laser pumped by HF laser at room temperature

冲放电产生的激光脉冲宽度约为 100～200 ns，非常适合于泵浦上能级寿命较短的Fe^{2+}:ZnSe激光器[27-28]。他们采用掺杂浓度高达 10^{20} cm^{-3} 的 Fe^{2+}:ZnSe 晶体，受辐射截面为12 mm×7 mm 时，室温条件下获得的最大中红外激光脉冲能量为 30.6 mJ，光光转换效率为 4.7%。

2014 年，俄罗斯科学院普通物理研究所 Firsov 验证了室温条件下采用化学 HF 激光泵浦 Fe^{2+}:ZnSe激光器，实现更高能量输出及光光转换效率的可行性，实验方案如图 6 所示[14]。通过优化 HF 泵浦激光的光斑尺寸提升了室温下 Fe^{2+}:ZnSe激光器输出性能，当泵浦光斑尺寸为 6.8 mm×7.5 mm 时获得了最大单脉冲能量为 192 mJ，相应的斜效率为 29%；激光泵浦阈值为 0.14 J/cm^2，Fe^{2+}:ZnSe 晶体的损伤阈值为 3 J/cm^2。后来，Firsov 还验证了室温条件下采用重复频率 HF/DF 激光泵浦 Fe^{2+}:ZnSe 激光器的可行性[29]。在室温 200 Hz 的条件下，采用重复频率非链式 HF 激光（2.6～3.1 μm）和 DF 激光（3.5～4.1 μm）泵浦Fe^{2+}:ZnSe晶体，分别获得了 1.2 W、0.7 W 的 4～5 μm 中红外激光输出。采用非链式脉冲 HF/DF 激光器泵浦 Fe^{2+}:ZnSe 晶体易于在室温条件下实现中红外激光输出，验证了 Fe^{2+}:ZnSe 激光器在室温条件下实现高能量输出的可行性，但化学 HF/DF 激光器结构非常庞大、造价高，不利于在工程上推广应用。

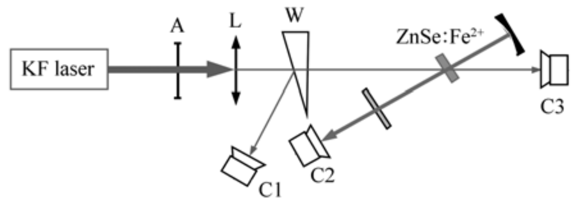


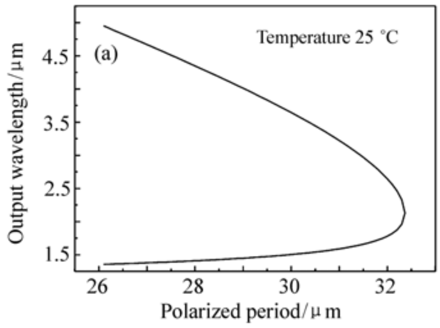
图 6　高能量 HF 激光泵浦的室温 Fe^{2+}:ZnSe 激光器实验原理图

Fig. 6　Schematic diagram of Fe^{2+}:ZnSe laser pumped by high energy HF laser at room temperature

2.2　MgO:PPLN 光参量振荡器

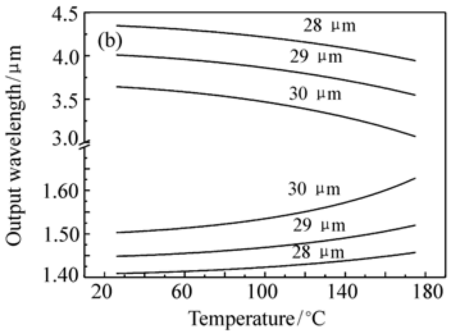
PPLN 晶体具有较高的非线性系数（d_{33} = 27.4 pm/V）、物化性能稳定及不易潮解等优点，是非常理想的非线性晶体。近年来，PPLN 晶体 MgO 掺杂技术的应用大大提高了 PPLN 晶体的光折变损伤阈值（MgO:PPLN 晶体的抗光折变损伤能力是未掺 MgO 的 PPLN 的 100 倍）。这些特性使得基于 MgO:PPLN 的准相位匹配 OPO 具有高效率、高功率、窄线宽、高光束质量中红外激光输

出的潜能。通过控制 MgO：PPLN 的极化周期、温度，可实现 3～5 μm 全波段可调谐输出，图 7 给出了泵浦波长为 1 064 nm 时 MgO：PPLN 晶体极化周期和温度调谐曲线。



(a) 输出波长-极化周期曲线

(a) Curve of output wavelength vs. polarized period



(b) 输出波长-温度曲线

(b) Curves of output wavelength vs. temperature

图 7　基于 MgO：PPLN 的 OPO 波长随晶体极化周期、温度调谐曲线

Fig. 7　Output wavelength tuning curves of MgO：PPLN OPO with polarized periods and temperature

基于 MgO：PPLN 的 OPO 出现较早，受益于其输出波长的可调谐性和易于实现全固态输出，该激光器的发展一直备受关注。近年来，随着高功率光纤泵浦源及大尺寸 MgO：PPLN 晶体生长工艺的发展，基于 MgO：PPLN 的 OPO 激光输出能量逐步提升。现将近年来的几个较为重要的成果及发展历程介绍如下。

2009 年，华中科技大学夏林中等人以 1.064 μm 的 Nd：YAG 激光器为泵浦源，采用 MgO：PPLN 为 OPO 晶体实现了中红外激光输出[30]。声光调 Q Nd：YAG 激光器脉宽为 150 ns，重复频率为 10 kHz，输出平均功率为 8.17 W。MgO 在 PPLN 晶体内的掺杂浓度为 5%，晶体尺寸 40 mm × 10 mm × 2 mm，晶体极化周期范围为 26～31 μm，调谐增量为 0.5 μm。受限于晶体的生长工艺，很难生长出大尺寸 MgO：PPLN 晶体，为此他们将两块 2 mm 厚的晶体并联以增大 MgO：PPLN 晶体体积，其实验原理如图 8 所示。联合极化周期和温度调谐，实现了闲频光在 3～4.95 μm范围内可调谐输出。最大闲频光输出功率为2.23 W（波长为 3.344 μm），光光转换效率为 27.4%。该实验展示了 Nd：YAG 激光泵浦的 OPO 中红外激光的输出能力，并指明 MgO：PPLN 晶体尺寸是限制中红外 OPO 激光输出功率的主要因素。因此，采用多块 MgO：PPLN 晶体并联的技术方案可有效提升激光器的光-光转换效率。

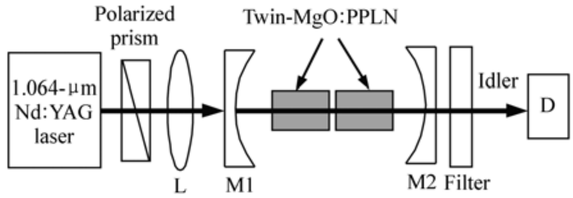


图 8　双 MgO：PPLN 的中红外 OPO 实验原理图

Fig. 8　Experimental setup of the OPO based on twin-MgO：PPLN cascaded

2010 年，西班牙光子科学研究所 Kokabee 等人报道了一种皮秒中红外 OPO 激光器，其实验装置如图 9 所示[31]。泵浦光为被动锁模掺镱光纤激光器（1 064 nm），重复频率为81.1 MHz，脉冲宽度为 20.8 ps，最大泵浦功率为 20 W。MgO：PPLN晶体为台湾 HC 公司提供，晶体长度为 50 mm，厚度为 1 mm，极化周期范围 28.5～30.5 μm。他们采用了四镜驻波腔提升了 OPO 激光的提取效率，在 16 W 的泵浦功率时，获得了 7.1 W（1.47 μm）的信号光和 4.9 W（3.08 μm）的闲频光，总提取效率达到了 68%，激光脉冲宽度为 17.3 ps。2013 年，他们通过增加驻波腔腔长 $\Delta L = L_0/Q$（L_0为相应于泵浦光重复频率的基础腔长，Q 为 OPO 输出相应于泵浦光的 Q 次谐波），实现了中红外激光输出重复频率增加，在泵浦光为 80 MHz 时，实现了 7 GHz 的中红外激光输出[32]。2014 年，他们还报道了采用两块 MgO：PPLN晶体共用一个六镜驻波腔实现双信号

光、双闲频光同步可调谐输出的技术方案，能量提取效率达到了44%[33]。他们的实验研究展示了OPO激光器在超短脉冲、超高频率方面的输出能力和四镜(六镜)驻波腔双谐振输出在提升激光能量提取效率方面的优势，但该实验装置对加工、装调的精准度要求极高，同时对环境(温度、振动等)也有苛刻的要求，工程上难以实现。

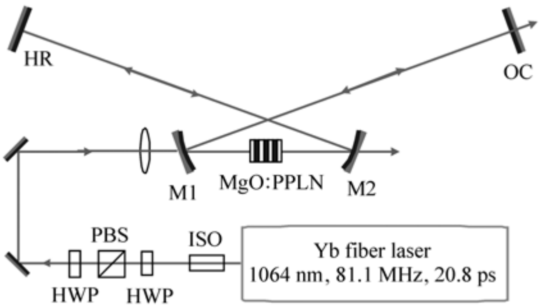


图9　光纤泵浦的ps中红外OPO激光器

Fig.9　Mid-infrared ps OPO laser pumped by fiber laser

2013年，法国约瑟夫傅立叶大学的Kemlin等人报道了。晶体尺寸为5 mm×16 mm×40 mm的MgO:PPLN OPO激光器[34]，调谐周期为28 μm，晶体端面加工成柱面，如图10所示。他们通过旋转晶体改变了晶体的有效调谐周期($d_{eff}=d/\cos\theta$，入射角θ变化范围0~30°)，通过旋转晶体，他们在室温(21 ℃)条件下实现了1.4~4.3 μm全波段可调谐输出。该实验展示了大体积MgO:PPLN晶体在室温条件下的OPO性能，为提升中红外OPO激光输出水平奠定了基础。

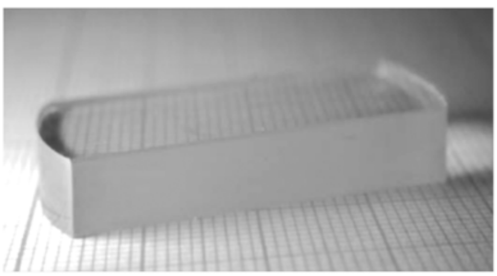


图10　大体积MgO:PPLN晶体

Fig.10　Large bulk MgO:PPLN crystal

2014年，山东大学刘善德等人报道了有益于工程化的单谐振腔中红外OPO激光器，其实验装置如图11所示[35]。泵浦源掺镱光纤激光器的输出功率为20 W，波长为1 064 nm，光束直径为6 mm，M^2因子为1.01。多级MgO:PPLN晶体尺寸为50 mm×1 mm，极化周期范围为28.5~31.5 μm，周期递增量为0.5 μm。通过极化周期和温度调谐，实现了闲频光在3.0~3.9 μm范围内连续调节。在3.0 m波长处获得了3 W的中红外激光输出，在中红外常用的3.8 μm波长处获得了近1 W的激光输出，光-光转换效率高于10%。该实验展示了单谐振OPO激光器的输出性能，并指出泵浦源输出功率是限制中红外OPO激光输出功率的主要因素。该实验采用了功率提升潜力较大、光束质量较好的光纤激光泵浦，结构、装调较为简易，非常利用工程实现。

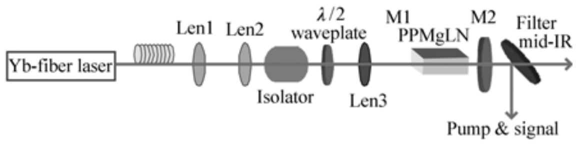


图11　光纤泵浦的单谐振中红外OPO激光器

Fig. 11　Single-resonator mid-infrared OPO laser pumped by Yb-Fiber laser

2.3　$ZnGeP_2$光参量振荡器

$ZnGeP_2$晶体是重要的红外非线性光学材料，它具有非常高的非线性系数($d_{14}=75.0$ pm/V)、良好的热导率和弱热透镜效应，其光损伤阈值达到30 GW/cm^2。由于$ZnGeP_2$晶体优异的性能，利用它作为OPO的非线性光学频率转换材料，可实现中红外激光器的全固态化、大功率输出。但是该晶体中本征点缺陷引起的光吸收和光散射将导致它在近红外1~2 μm波段透过率较低[36]，因此，为了获得高平均功率输出，一般采用波长大于2 μm的泵浦源(Ho:YAG固体激光器和KTP OPO)。近年来，为了简化激光器结构，提升稳定性，研究人员采用掺铥光纤激光器(1.9 μm)直接泵浦$ZnGeP_2$。表1给出了最新报道的中红外$ZnGeP_2$ OPO的主要参数。

表 1　中红外 $ZnGeP_2$ OPO 主要参数

Tab. 1　Main parameters of mid-infrared $ZnGeP_2$ OPO

年代	研究单位	泵浦源(波长、能量/功率、重频、脉宽)	$ZnGeP_2$ 晶体尺寸	中红外输出参数(波长、能量/功率)	转换效率
2010	Norwegiandefence research establishment, Norway[37]	Ho:YAG,2.1 μm, 39 W,45 kHz,32 ns	8.5 mm × 6 mm × 8 mm	信号光 3.9 μm, 闲频光 4.5 μm, 22 W	光光效率 58%, 斜效率 75%
2011	中国工程物理研究院[38]	KTP OPO,2.1 μm, 15 W,8 kHz	8 mm × 6 mm × 18 mm	信号光 4. 1μm,闲频光 4.32 μm, 5.7 W	斜效率 46.6%
2013	Defence Science and Technology Organisation, Australia[39]	Ho:YAG,2.1 μm, 62 W,35 kHz,50 ns	长度 16 mm 的两块 $ZnGeP_2$ 晶体串联	3 ~ 5 μm, 27 W	光光效率 62%, 斜效率 69%
2014	哈尔滨工业大学[40]	Ho:LuAG, 2.1 μm,13.1 W,5 kHz	长度 18 mm	3 ~ 5 μm, 5.51 W	斜效率 59%
2014	University of Central Florida,USA[41]	Tm:fiber,1.98 μm, 0.84 mJ,4 kHz,7 ns	12 mm × 5 mm × 4 mm	3 ~ 5 μm,165 μJ, 峰值功率 28 kW	斜效率 49%
2014	哈尔滨工业大学[42]	Ho:YAG,2.1 μm, 107 W,20 kHz,	23 mm × 6 mm × 6 mm 两块晶体并联	信号光 3.94 μm,闲频光 4.5 μm,41.2 W	斜效率 44.6%
2015	French-German Research Institute of Saint-Louis ISL,France[43]	Tm:fiber,1.98 μm, 20 W,40 kHz,65 ns	18 m × 4 mm × 4 mm	3 ~ 5 μm,6.5 W, 40 kHz,45 ns	光光效率 32%, 斜效率 40%

3　中红外固体激光技术展望

中红外固体激光器是最有希望获得高功率激光输出的小体积激光器件。目前 Fe^{2+}:ZnSe、MgO:PPLN OPO 和 $ZnGeP_2$ OPO 固体激光器均在中红外波段实现了激光输出,输出水平逐渐提升,且两种激光器均有较大的发展空间。

Fe^{2+}:ZnSe 激光器室温时上能级寿命较短,这对其泵浦源脉冲宽度提出了较高的要求。俄罗斯科研工作者采用化学 HF/DF 激光器作为泵浦源有效解决了泵浦难题,在室温条件下,实现了 Fe^{2+}:ZnSe 激光器较高的能量输出。但 HF/DF 激光泵浦的 Fe^{2+}:ZnSe 激光器具有体积大、结构复杂的缺点,因此室温全固态高功率中红外 Fe^{2+}:ZnSe固体激光器成为其发展方向。

基于 MgO:PPLN 的 OPO 固体激光器发展较早,目前国内外科研工作者均采用极化周期及温度调谐的技术手段实现了全波段可调谐输出。受 MgO:PLN 晶体生长工艺的限制,难以获得大体积、高质量的非线性晶体,且该晶体光损伤阈值较低,这些因素都大大限制了泵浦光注入能量,也成为限制中红外 OPO 高功率激光输出的瓶颈技术。目前 OPO 激光光学变换常用的泵浦光 λ_p波长为 1 064 nm,其信号光 λ_s辐射波长为 1.3 ~ 1.6 μm,而中红外激光为闲频光 λ_i,其波长涵盖 3.0 ~ 5 μm。由于三波(泵浦光、信号光、闲频光)变换满足能量守恒,即:$1/\lambda_p = 1/\lambda_i + 1/\lambda_s$,一个泵浦光子通过非线性过程转换成一个信号光子和一个闲频光子,由于波长越短,单光子能量越高,因此 OPO 过程中波长较短的信号光占据多数泵浦能量,这就限制了闲频光的光-光转换效率。采用波长更长的泵浦光可有效提升中红外闲频光的光-光转换效率。综上所述,基于 MgO:PPLN 晶体的 OPO 固体激光器发展方向为研制大体积、高质量的 MgO:PPLN 晶体和输出波长更长的红外高功率激光泵浦源。

基于 $ZnGeP_2$的 OPO 固体激光器发展较为成熟,目前采用该技术获得了最高功率的中红外固体 OPO 输出。但是 $ZnGeP_2$ OPO 实现过程较为复杂,通常的技术方案为采用半导体激光泵浦掺铥激光晶体获得 1.9 μm 激光,进而运用该 1.9 μm 铥激光泵浦掺钬激光晶体获得 2.1 μm 激光,最后用 2.1 μm 钬激光泵浦 $ZnGeP_2$晶体实现中红外 OPO 输出。多级泵浦体制限制了 $ZnGeP_2$ OPO 稳定性、可靠性,增加了成本及技术复杂度。掺铥光

纤激光器直接泵浦 $ZnGeP_2$ OPO 实现了中红外输出,虽然目前该方案输出功率较低,但是省去了铥激光泵浦钬激光这一中间过程,简化了激光器结构,是未来 $ZnGeP_2$ OPO 的发展方向。

4 结束语

纵观近年来 Fe^{2+}:ZnSe 激光器和基于 MgO:PPLN、$ZnGeP_2$晶体的 OPO 固体激光器的发展,它们的输出功率、光光转换效率、波长调谐等方面都取得了长足的进步。Fe^{2+}:ZnSe 激光器是一种新型的固体激光器,目前美国和俄罗斯的发展水平最高,俄罗斯采用了化学 HF/DF 激光泵浦 Fe^{2+}:ZnSe 激光器,获得了室温高峰值功率中红外激光输出。基于 MgO:PPLN 晶体的 OPO 固体激光器采用准相位匹配技术,克服了三波耦合过程的走离效应,获得了较高的光光转换效率。基于 $ZnGeP_2$晶体的 OPO 是目前获得平均功率最高的中红外固体激光输出的技术途径。在中红外固体激光器发展过程中,上述激光器在激光输出功率提升方面均有较大的空间,相信随着晶体生长工艺的提升及高功率短波红外激光泵浦源的发展,中红外固体激光器输出功率水平还将稳步提升。

参考文献:

[1] ROGALSKIA. *Infrared Detectors*[M]. Beijing:China Machine Press, 2014.

[2] 钟鸣,任钢. 3 ~5 μm 中红外激光对抗武器系统[J]. 专家论坛,2007,1:3-6.
ZHONG M,REN G. Weapon system for MIR laser countermeasure[J]. *Expert Forum*,2007,1:3-6. (in Chinese)

[3] VICTOR K,MARGARET L,MICK K,*et al*.. Engineering development of a directed IR countermeasure laser[J]. *Proceedings of SPIE*,2004,5615:48- 53.

[4] GEISER P,WILIER U,SCHADEW. Picosecond mid-infrared LIDAR system[C]. OSA/QELS,Baltimore USA,22-27May 2005: JTHI2.

[5] AGROSKIN V Y,BRAVY B G,CHERNYSHEVY A,*et al*. Aerosol sounding with a lidar system based on a DF laser[J]. *Appl. Phys. B.*,2005,81:1149-1154.

[6] LAZARENKO V I,VELIKANOV S D,PEGOEV I N,*et al*.. Analysis of DF laserapplicability to SO_2 remote sensing in the atmosphere[J]. *SPIE*,2001,4168:232-235.

[7] MALGUTH E,HOFFMANN A,MATTHEW R P. Fe in Ⅲ-Ⅴ and Ⅱ-Ⅵ semiconductors[J]. *Phys. Stat. Sol.* (*b*),2008,245(3):455-480

[8] 谭改娟,谢冀江,张来明,等. 中波红外激光技术最新进展[J]. 中国光学,2013,6(4):501-512.
TAN G J,XIEJ J,ZHANG L L,*et al*.. Recent progress in mid-infrared laser technology[J]. *Chinese Optics*,2013,6(4):501-512. (in Chinese)

[9] KOZLOVSKY V I,KOROSTELIN Y V,LANDMAN A I,*et al*.. Pulsed Fe^{2+}:ZnS laser continuouslytunable in the wavelength range of 3.49 –4.65 μm[J]. *Quantum Electron*,2011,41(1):1-3.

[10] FEDOROV V V,MIROV S B,GALLIAN A,*et al*.. 3.77 –5.05 μm tunable solid statelasers based on Fe^{2+}-doped ZnSe crystals operating at lowand room temperatures[J]. *IEEE J. Quantum Electron*,2006,42(9):907-917.

[11] FROLOV M P,KOROSTELIN YU V,KOZLOVSKY V I,*et al*.. Laser radiation tunable within the range of 4.35 –5.45 μm in a ZnTe crystal doped with Fe^{2+} ions[J]. *J. Russ. Laser Res.*,2011,32(6):528-536.

[12] KOZLOVSKY V I,AKIMOV V A,FROLOV M P,*et al*.. Room-temperature tunable midinfrared lasers on transition-metal doped Ⅱ-Ⅵ compound crystals grown from vapor phase[J]. *Phys. Stat. Sol.* (*b*),2010,247(6):1553-1556.

[13] FROLOV M P,KOROSTELIN Y V,KOZLOVSKY V I,*et al*.. Study of a 2-J pulsed Fe:ZnSe 4 μm laser[J]. *Laser Phys. Lett.*,2013,10:125001.

[14] FIRSOV K N,GAVRISHCHUK E M,KAZANTSEV S Y,*et al*.. Increasing the radiation energy of ZnSe:Fe^{2+} laser at room temperature[J]. *Laser Phys. Lett.*,2014,11:085001.

[15] JONATHAN W E,PATRICK A B,KENNETH L S. 840 mW continuous-wave Fe:ZnSe laser operating at 4140 nm[J].

Optics Letters,2012,37(23):5021-5023.

[16] KOMINEH,FUKUMOTOJM,LONG W H,*et al.*. Noncritically phase matched mid-infrared generation in $AgGaSe_2$[J]. *IEEE J. Selected Topic in Quantum Electronics*,1995,1(1):44-49.

[17] YANG J F,ZHANG B T,HE J L,*et al.*. Intracavity optical parametric oscillator based on GTR-KTP pumped by diode-side-pumped acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Applied Physics B*,2010,98:49-54.

[18] JIANG H L,BIAN J T,NIE J S,*et al.*. Theoretical and experimental investigation on the 2.7 μm laser pumped $ZnGeP_2$ optical parametric oscillator generating 4.3 μm laser[J]. *SPIE*,2010,7655:76551-1-76551-5.

[19] RAMAIAHB V,CHAITANYA K S,EBRAHIM Z M. Fiber-laser-pumped, dual-wavelength, picosecond optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*,2014,39(9):2739-2742.

[20] FELIX R,PETER H,JOHANNES A L. Synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator with integrated sum frequency generation[J]. *Applied Physics Letters*,2008,92(1):011122.

[21] KIMMELMA O,CHAITANYA KS,ADOLFO E M,*et al.*. Multi-gigahertz picosecond optical parametric oscillatorpumped by 80-MHz Yb-fiber laser[J]. *Opt. Lett.*,2013,38(22):4550-4553.

[22] ADAMS J J,BIBEAU C,PAGE R H,*et al.*. 4.0 – 4.5 μm lasing of Fe:ZnSe below 180 K, a new mid-infrared laser material[J]. *Opt. Lett.*,1999,24(23):1720-1722.

[23] NOSOUNGM,DMITRI V M,VLADIMIR V F,*et al.*. Energy scaling of 4.3 μm room temperature Fe:ZnSe laser[J]. *Opt. Lett.*,2011,36(1):94-96.

[24] FROLOV M P,KOROSTELIN Y V,KOZLOVSKY V I,*et al.* Study of a 2-J pulsed Fe:ZnSe 4-μm laser[J]. *Laser Phys. Lett.*,2013,10:125001.

[25] 夏士兴,张月娟,李兴旺,等. Fe^{2+}:ZnSe 激光晶体光学吸收及激光输出性能[J]. 激光与红外,2014,44(9):1000-1002.
XIA S X,ZHANG Y J,LI X W,*et al.*. Optical absorption and laser output performance of Fe^{2+}:ZnSe laser crystal[J]. *Laser & Infrared*,2014,44(9):1000-1002.(in Chinese)

[26] VELIKANOV S D,DANILOV V P,ZAKHAROV N G,*et al.*. Fe^{2+}:ZnSe laser pumped by a nonchain electric-discharge HF laser at room temperature[J]. *Quantum Electronics*,2014,44 (2):141-144.

[27] 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).

[28] PANCHENKO A N,ORLOVSKY V M,TARASENKOV F. Spectral characteristics of nonchain HF and DF electric-discharge lasers in efficient excitation modes[J]. *Quantum Electronics*,2004,34(4):320- 324.

[29] FIRSOV K N,GAVRISHCHUK E M,KAZANTSEV S Y,*et al.*. Spectral and temporal characteristics of a ZnSe:Fe^{2+} laser pumped by a non-chain HF(DF) laser at room temperature[J]. *Laser Phys. Lett.*,2014,11:125004.

[30] XIA L Z,SU H,AND RUANS C. Widely continuous-tunable 2.789-4.957 μm twin-MgO:PPLN cascaded optical parametric oscillator[J]. *Chin. Opt. Lett.*,2009,7(11):1038-1040.

[31] KOKABEE O,ESTEBANM A,EBRAHIM Z M. Efficient, high-power, ytterbium-fiber-laser-pumped picosecond optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*,2010,35(19):3210-3212.

[32] KIMMELMA O,CHAITANYA K S,ESTEBAN-MARTIN A,*et al.* Multi-gigahertz picosecond optical parametric oscillator pumped by 80-MHz Yb-fiber laser[J]. *Opt. Lett.*,2013,38(22):4550-3552.

[33] RAMAIAHB V,CHAITANYA KS,EBRAHIMZ M. Fiber-laser-pumped, dual-wavelength, picosecond optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*,2014,39(9):2739-2741.

[34] VINCENT K,DAVID J,J R MED,*et al.*. Widely tunable optical parametric oscillator in a 5 mm thick 5% MgO:PPLN partial cylinder[J]. *Opt. Lett.*,2013,38(6):860-862.

[35] LIU S D,WANG Z W,ZHANG B T,*et al.*. Wildly tunable, high-efficiency MgO:PPLN mid-IR optical parametric oscillator pumped by a Yb-fiber laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*,2014,31(2):024204.

[36] SETZLER S D, SCHUNEMANN P G, POLLAKT M, *et al*.. Characterization of defect-related optical absorption in $ZnGeP_2$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, 86(12): 6677-6681.

[37] ESPEN L, HELGE F, GUNNAR A, *et al*.. A 22-watt mid-infrared optical parametric oscillator with V-shaped 3-mirror ring resonator[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26475-26483.

[38] PENGY F, WEI X B, WANG W M. Mid-infrared optical parametric oscillator based on $ZnGeP_2$ pumped by 2-μm laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(6): 061403.

[39] ALEXANDER H, JIM R, ALAN D, *et al*.. 99 W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25% duty cycle[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 10062-10069.

[40] SHEN Y J, YAO B Q, CUI Z, *et al*.. A ring $ZnGeP_2$ optical parametric oscillator pumped by a Ho: LuAG laser[J]. *Appl. Phys. B.*, 2014, 117: 127-130

[41] MARTIN G, CHRISTIAN G, PANKAJ K, *et al*.. High peak-power mid-infrared $ZnGeP_2$ optical parametric oscillator pumped by a Tm: fiber master oscillator power amplifier system[J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(5): 1212-1215.

[42] YAO B Q, SHEN Y J, DUAN X M, *et al*.. A 41-W $ZnGeP_2$ optical parametric oscillator pumped by a *Q*-switched Ho: YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(23): 6589-6592.

[43] CHRISTELLE K, ANTOINE B, BRENDA D, *et al*.. 6.5 W $ZnGeP_2$ OPO directly pumped by a *Q*-switched Tm^{3+} doped single-oscillator fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(6): 1101-1104.

作者简介：

潘其坤(1985—),男,河南开封人,博士,助理研究员,2009 年于东北林业大学获得学士学位,2014 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,主要从事中红外激光器及其应用技术方面的研究。E-mail:panqikun2005@163.com