文章编号：1001-3806(2021)03-0271-09

用于光电对抗的高重频中红外激光器综述

刘晓旭，韩聚洪，蔡 和，杨 峰，荣克鹏，安国斐，王 渝*
（西南技术物理研究所，成都 610041）

摘要： 高重频中红外激光器在光电对抗及其它领域具有重要的应用价值，其输出的激光波长覆盖了3μm～5μm，主要包括直接抽运式高重频中红外固体激光器、高重频中红外光纤激光器和高重频中红外光学参量振荡器3种类型。介绍了产生高重频中红外激光的主要技术方案，并讨论了上述3种类型激光器的相关进展状况。最后，对各种技术所存在的问题和未来的发展方向进行了分析与展望。

关键词： 激光器；中红外；调 Q；锁模；光参量振荡器
中图分类号： TN248 **文献标志码：** A **doi**：10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.03.001

Review of high repetition-rate mid-infrared lasers for photoelectric countermeasures

LIU Xiaoxu, *HAN Juhong*, *CAI He*, *YANG Feng*, *RONG Kepeng*, *AN Guofei*, *WANG You*
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: High repetition rate mid-infrared lasers with the wavelength of 3μm～5μm play important roles in the field of photoelectric countermeasures, which are mainly classified into three types: direct pumped high repetition-rate mid-infrared solid-state lasers, high repetition-rate mid-infrared fiber lasers, and high repetition-rate mid-infrared optical parametric oscillators (OPOs). The main technical solutions of generating high repetition-rate mid-infrared lasers have been introduced first, and the related research progress of three types of lasers mentioned above have been discussed in this report. Finally, we also analyze the relative problems and point out some development directions of various technologies in the near future.

Key words: lasers; mid-infrared; Q-switched; mode-locked; optical parametric oscillator

引 言

中红外激光的波长位于3μm～5μm范围内，正好位于大气的传输窗口，在大气环境中传输时其能量衰减较小。因此，中红外激光在遥感、大气监控、环境保护、激光制导、光电对抗等领域具有重要的应用。另外，由于中红外波段存在着众多的分子特征吸收谱线，可广泛应用于气体检测和光谱分析等领域。近年，中红外激光正在逐渐成为相关领域的研究热点。

中红外激光器可以工作在连续或脉冲模式。通常，激光器输出脉冲的重频大于1kHz时，可将其称为高重频激光器。光电对抗系统中最重要的构成部分就包含了高重频中红外激光器，而提高高重频中红外激光器的性能就能够直接增强光电对抗系统的效能。在定向红外对抗中，大多数红外导引头都针对目标实施了时域调制。为了应对这一措施，干扰用激光器必须以脉冲方式工作，其脉冲重频的范围大约是20kHz～50kHz[1]；激光雷达采用了高重频、大动态范围、相干激光测距和测速技术[2]；光子计数激光测距通常采用低能量、高重频激光器，最后通过统计分析得到距离信息，这样能够达到消除噪声影响、抑制虚警概率和提高测距精度的目的[3]。

本文中主要介绍了3类高重频中红外激光器：直接抽运式高重频中红外固体激光器、高重频中红外光纤激光器和高重频中红外光参量振荡器，讨论了这3类激光器的相应研究进展，也对主要相关技术中所存在的问题和中红外激光器未来的发展方向进行了分析和展望。

1 直接抽运式高重频中红外固体激光器

目前，直接抽运式中红外固体激光器的增益介质

基金项目：国家重点研发计划资助项目(2017YFB0405101)
作者简介：刘晓旭(1982-)，男，高级工程师，现主要从事中红外激光技术的研究。
*通讯联系人。E-mail：youwang_2007@aliyun.com
收稿日期：2020-08-31；收到修改稿日期：2020-10-22

主要是 Fe^{2+} 离子掺杂的 ZnS,ZnSe,ZnTe 和 CdSe 等晶体,其中,对 Fe^{2+}:ZnSe 晶体的研究最为深入。因为 Fe^{2+}:ZnSe 晶体具有较宽的吸收带宽,能够输出波长调谐范围较宽、光束质量较好的中红外激光,所以长期以来都是中红外激光研究的焦点。由于 Fe^{2+}:ZnSe 中红外激光器的抽运源激光的重频一般受到很大的限制,所以高重频抽运源激光器的报道相对较少,这直接导致了 Fe^{2+}:ZnSe 中红外激光器的重频通常小于 0.1kHz。在研究初期,Fe^{2+}:ZnSe 激光器只能在低温下运行。近年,受益于抽运源和相关新技术的飞速发展,Fe^{2+}:ZnSe 激光器已经能够工作在相对较高的温度甚至是室温。

1999 年,美国利弗莫尔实验室的 ADAMS 等人利用波长 2.698μm 的 Er:YAG 激光器在低温(15K ~ 18K)条件下抽运 Fe^{2+}:ZnSe 晶体,首次实现了波长调谐范围为 3.98μm ~ 4.54μm 的激光输出,脉冲重频达到了 100Hz[4]。2005 年,美国阿拉巴马大学的 KERNAL 等人利用调 *Q* Nd:YAG 激光器抽运 Fe^{2+}:ZnSe 晶体,首次实现了室温条件下的激光输出,激光脉冲频率为 10Hz,波长调谐范围为 3.9μm ~ 4.8μm[5]。2006 年,美国阿拉巴马大学的 AKIMOV 等人利用 Er:YAG 激光器输出波长2.9364μm 的巨脉冲,抽运 Fe^{2+}:ZnSe 晶体得到了有效的室温激光输出,激光脉冲的重频为 60Hz,脉冲宽度为 100ns,波长在 3.95μm ~ 5.05μm 之间连续可调谐[6]。2014 年,美国空军实验室的 EVANS 等人利用波长 2936nm 的 Er:YAG 激光器双端抽运 Fe^{2+}:ZnSe 晶体,使用半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturable absorber mirrors,SESAM)作为调 *Q* 元件,在低温条件下输出了波长为 4045nm 的激光,脉冲宽度为 64ns,脉冲重频约为 0.85MHz[7]。2015 年,IPG 公司的 MARTYSHKIN 等人报道了在当时具有最高平均功率(35W)的 Fe^{2+}:ZnSe 激光器。温度在 77K 时,波长调谐范围是 3.88μm ~ 4.17μm,脉冲重频为 100Hz,脉冲宽度为 150μs,实验装置如图 1 所示[8]。

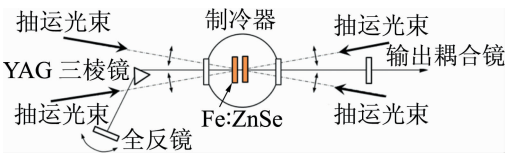

图 1 波长可调谐的掺 Fe^{2+}:ZnSe 激光器的光路图[8]

国内对 Fe^{2+}:ZnSe 中红外激光器的研究开展时间较短,迄今为止,只有几家机构报道了相关研究结果。总的来说,国内关于 Fe^{2+}:ZnSe 中红外激光器的研究仍处于较为初级的阶段。2014 年,华北光电技术研究所的 XIA 等人采用热扩散掺杂技术制备了 Fe^{2+}:ZnSe 晶体,利用波长为 2.9μm,脉冲重频为 1kHz 的中红外激光器抽运 Fe^{2+}:ZnSe 晶体,室温输出了中心波长为 4.45μm,脉冲宽度为 25ns,平均功率为 67mW 的中红外激光[9]。2015 年,哈尔滨工业大学的 YAO 等人采用波长为 2.89μm,脉冲重频为 1kHz 的磷锗锌($ZnGeP_2$,ZGP)光学参量振荡器(optical parametric oscillator,OPO)抽运 Fe^{2+}:ZnSe 晶体,当抽运功率为 1.43W 时,获得激光的平均功率为 53mW,脉冲宽度为 25ns,激光的中心波长为 4.45μm,范围为 4.33μm ~ 4.61μm[10]。同年,中国科学院电子所的 KE 等人采用波长为 2.6μm ~ 3.1μm,脉冲宽度为 180ns 的非链式脉冲 HF 激光器抽运 Fe^{2+}:ZnSe 晶体,室温实现了单脉冲能量为 15mJ 的激光输出,光光转换效率达到 15%[11]。

2 高重频中红外光纤激光器

中红外光纤材料的声子能量较低,中红外光在其中的传输损耗较小。目前,常用的中红外光纤为氟化物光纤和硫化物光纤。氟化物光纤 ZBLAN 的性质稳定,并得到了广泛使用,其成分包括 0.53ZrF_4,0.20BaF_2,0.04LaF_3,0.03AlF_3 和 0.20NaF(数值为摩尔分数)。利用掺杂 Tm^{3+},Ho^{3+},Er^{3+} 等离子的氟化物光纤,已经能够实现波长为 2μm ~ 3μm 的激光输出。目前,波长为 3μm 的高重频光纤激光器主要使用掺 Er^{3+}:ZBLAN 和掺 Ho^{3+}:ZBLAN 作为增益介质,按照工作方式分为调 *Q* 和锁模光纤激光器两种类型。

2.1 调 *Q* 光纤激光器

2.1.1 *主动调 Q* 1994 年,德国布伦瑞克工业大学的 FRERICHS 等人首次报道了掺 Er^{3+}:ZBLAN 光纤激光器在3μm 波段调 *Q* 输出了波长为 2.7μm 的激光,脉冲宽度为 100ns,重频达到 10kHz[12]。2004 年,英国曼彻斯特大学的 COLEMAN 等人利用波长为 972nm 的 LD 抽运 Er^{3+}/Pr^{3+} 共掺 ZBLAN 光纤输出了波长为 2.7μm 的激光,脉冲宽度为 250ns,重频为 19.5kHz[13]。2011 年,日本京都大学的 TOKITA 等人利用波长为 975nm 的 LD 抽运掺 Er^{3+}:ZBLAN 光纤,调 *Q* 输出了波长为 2.8μm 的激光,激光脉冲宽度为 90ns,重频为 120kHz,平均功率为 12W[14]。2012 年,澳大利亚悉尼大学的 HU 等人利用波长为 1150nm 的 LD 抽运源 Ho^{3+}/Pr^{3+} 共掺 ZBLAN 光纤,调 *Q* 输出了波长为 2.867μm 的激光,激光脉冲宽度为 78ns,重频为 40kHz ~ 300kHz,最大平均功率为 0.72W,实验装置如图 2 所

示[15]。2015 年,德国 LISA 激光公司的 LAMRINI 等人利用掺 Ho^{3+} : ZBLAN 光纤,调 Q 输出波长为 2.79μm 的激光,激光脉冲宽度为 53ns,重频为 1kHz,平均功率为 0.56W[16]。

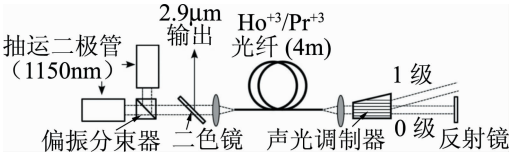

图 2　调 Q 掺 Ho^{3+}/Pr^{3+} 光纤激光器[15]

2012 年,国内的电子科技大学的 LI 等人利用波长为 1150nm 的 LD 抽运掺 Ho^{3+} : ZBLAN 光纤,调 Q 输出波长为 3.005μm 和 2.074μm 两个波长的激光,对应激光脉宽分别为 380ns 和 260ns,重频都为 25kHz[17];2013 年,他们调 Q 实现了波长为 2.97μm ~ 3.015μm 激光的调谐输出,激光脉冲宽度为 300ns ~ 410ns,重频为 40kHz,实验装置如图 3 所示[18]。

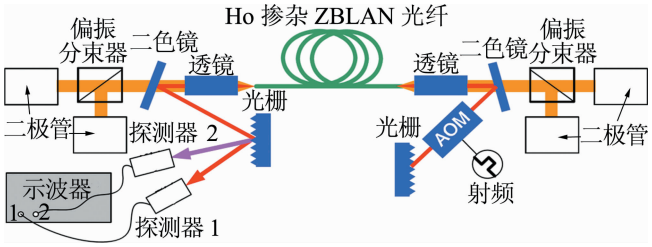

图 3　主动调 Q 掺 Ho^{3+} : ZBLAN 光纤激光器[18]

2.1.2　被动调 Q　1996 年,德国布伦瑞克工业大学的 FRERICHS 等人报道了利用 InAs 外延层作为可饱和吸收体,以被动调 Q 和锁模的方式工作,输出激光波长为 2.7μm 的掺 Er^{3+} : ZBLAN 光纤激光[19]。2012 年,美国亚利桑那大学的 WEI 等人利用 LD 抽运掺 Er^{3+} : ZBLAN 单模光纤,使用掺 Fe^{2+} : ZnSe 晶体被动调 Q,输出激光波长为 2.8μm,单脉冲能量为 2.0μJ,脉冲宽度为 0.37μs,对应的峰值功率为 5.34W,重频达到了 0.161MHz[20];2013 年,他们又利用 LD 抽运掺杂长度为 10m 的 Er^{3+} : ZBLAN 光纤,石墨烯被动调 Q,输出激光波长为 2.78μm,单脉冲能量为 1.67μJ,脉冲宽度为 2.9μs,脉冲重频为 37kHz;当光纤长度缩短到 2m 时,脉冲宽度减小为 1μs[21]。2013 年,美国亚利桑那大学的 ZHU 等人利用波长 1.15μm 的光纤激光器抽运掺 Ho^{3+} : ZBLAN 光纤,实现了被动调 Q 的激光输出,掺 Fe^{2+} : ZnSe 晶体和石墨烯作为可饱和吸收体,分别对应的输出波长为 2.93μm 和 3μm,脉冲宽度分别为 0.82μs 和 1.2μs,重频分别为 105kHz 和 100kHz,图 4 所示为实验装置[22]。

2014 年 ~ 2015 年,电子科技大学的 LI 等人利用

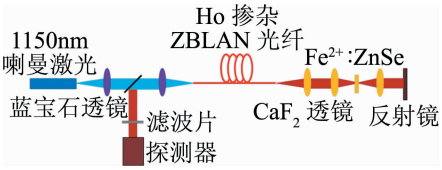

图 4　被动调 Q 掺 Ho^{3+} : ZBLAN 光纤激光器[22]

波长为 1.15μm 的 LD 抽运掺 Ho^{3+} : ZBLAN 光纤,分别用 SESAM、Bi_2Te_3 晶体和掺 Fe^{2+} : ZnSe 晶体作为被动调 Q 元件,输出激光波分别长为 2.971μm,2.9799μm 和2.9191μm ~ 3.0042μm,脉冲宽度分别为 1.68μs,1.37μs 和 1.23μs ~ 2.35μs,脉冲重频分别为 47.6kHz,81.96kHz 和 96.1kHz ~ 43.56kHz[23-25]。2015 年,上海交通大学的 QIN 等人第 1 次报道了采用黑磷(black phosphorus,BP)作为可饱和吸收体,实现波长为 2.8μm 调 Q 运行的光纤激光器。光纤激光器输出最大平均功率为 485mW,对应单脉冲能量为 7.7μJ,脉冲宽度为 1.18μs,脉冲重频为 63kHz[26]。2016 年,四川大学、深圳大学和中国科学院西安光学精密机械研究所的研究人员利用 LD 抽运掺 Er^{3+} : ZBLAN 光纤,分别使用掺 Fe^{2+} : ZnSe 晶体、Bi_2Te_3 晶体和 SESAM 作为调 Q 元件,输出激光波长都在 2.8μm 左右,单脉冲能量为几个微焦,脉冲宽度为几百纳秒,重频分别为 102.94kHz,50kHz 和 146.3kHz[27-29]。同年,电子科技大学的 WEI 等人首次报道了 WS_2 薄膜作为可饱和吸收体,利用 LD 抽运 Ho^{3+}/Pr^{3+} 共掺 ZBLAN 光纤,输出激光波长为 2.8657μm,激光平均功率为 48.4mW,单脉冲能量为 0.37μJ,脉冲宽度为 1.73μs,脉冲重频为 131.6kHz[30]。2018 年,电子科技大学的 LAI 等人利用波长为 976nm 的 LD 抽运掺 Er^{3+} : ZBLAN 光纤,SESAM 被动调 Q 输出激光波长为2.7988μm,最大平均功率为 3.01W,单脉冲能量为 10.82μJ,脉冲宽度为 0.45μs,脉冲重频为 278.5kHz,图 5 所示为实验装置[31]。

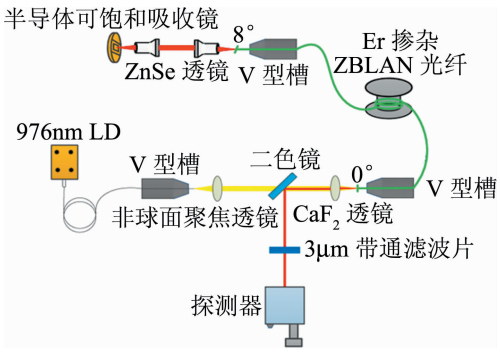

图 5　被动调 Q 掺 Er^{3+} : ZBLAN 光纤激光器[31]

2.2 锁模光纤激光器

2012 年,美国亚利桑那大学的 WEI 等人利用 LD 抽运掺 Er^{3+}:ZBLAN 光纤,掺 Fe^{2+}:ZnSe 晶体被动锁模,输出激光波长为 2.8μm,平均功率为 51mW,脉冲宽度为 19ps,脉冲重频为 50MHz[32]。2014 年~2016 年,加拿大拉瓦尔大学的 HABOUCHA 等人和 DUVAL 等人、澳大利亚悉尼大学的 HU 等人、美国亚利桑那大学的 ZHU 等人分别利用 LD 抽运掺 Er^{3+}:ZBLAN 光纤,输出激光波长为 2.8μm 左右,脉冲宽度分别为 60ps,0.207ps,0.497ps 和 42ps,脉冲重频分别达到 51.75MHz,55.2MHz,56.7MHz 和 25.4MHz[33-36]。图 6 所示为美国亚利桑那大学的 ZHU 等人的实验装置。

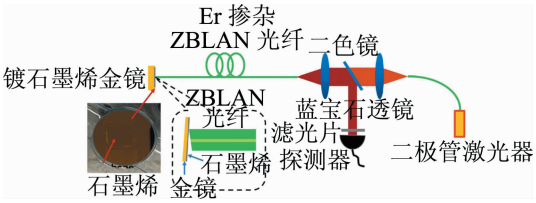

图 6 石墨烯锁模掺 Er^{3+}:ZBLAN 光纤激光器[36]

2012 年和 2016 年,电子科技大学的 LI 等人、国防科技大学的 YIN 等人分别利用 LD 抽运共掺 Ho^{3+}/Pr^{3+}:ZBLAN 光纤,SESAM、Bi_2Te_3 纳米片可饱和吸收体锁模输出激光,波长位于 2.87μm 和 2.83μm,平均功率为 132mW 和 90mW,单脉冲能量为 4.9nJ 和 8.6nJ,脉冲宽度为 24ps 和 6ps,脉冲重频为 27.1MHz 和10.4MHz[37-38]。2015 年,湖南大学的 TANG 等人设计了基于 SESAM 的掺 Er^{3+}:ZBLAN 锁模光纤激光器,输出激光波长为 2.8μm,最高平均功率超过 1W,脉冲宽度为 25ps,脉冲重频达到 22.56MHz[39]。2016 年和 2018 年,上海交通大学的 QIN 等人利用基于 BP 可饱和吸收体的掺 Er^{3+}:ZBLAN 锁模光纤激光器,输出激光波长为 2.8μm 和 3.489μm,平均功率为 613mW 和 40mW,脉冲重频为 24MHz 和 28.91MHz[40-41],图 7 所示为相应的实验装置[41]。

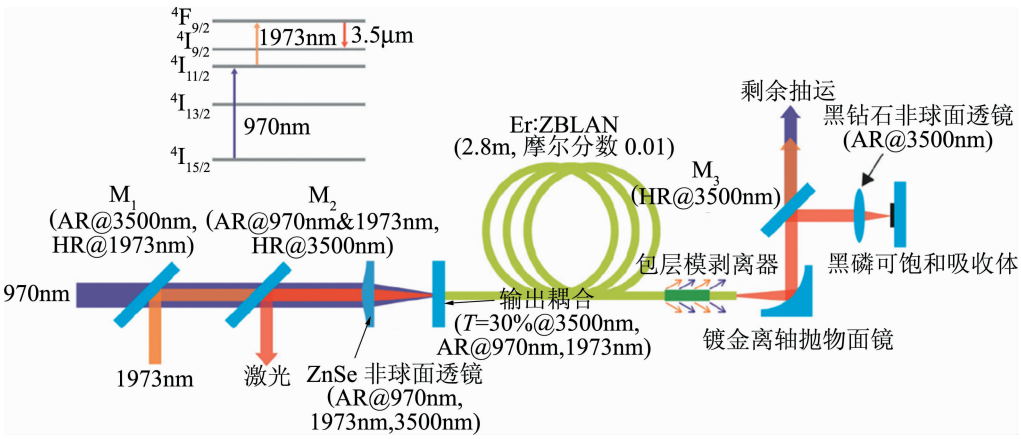

图 7 黑磷调 Q 和锁模掺 Er:ZBLAN 光纤激光器[41]

3 高重频中红外光参量振荡器

晶体中发生的光学参量振荡是一种非线性过程,借此短波激光可以被变换到中红外波段。中红外 OPO 所使用的非线性晶体主要包括磷酸氧钛钾($KTiOPO_4$,KTP)、硒镓银($AgGaSe_2$)、磷锗锌($ZnGeP_2$,ZGP)、周期性极化铌酸锂(periodically poled lithium niobate,PPLN)等。其中,PPLN 和 ZGP 晶体使用最为广泛。PPLN 的特点是具有较高的非线性系数,并且性质很稳定,通过掺杂 MgO 可提高 PPLN 的光折变损伤阈值,这使得 PPLN 成为一种较为理想的非线性晶体。利用这些有利条件,满足准相位匹配(quasi-phase-matching,QPM)条件的 PPLN OPO 就能够高效地输出中红外激光。通过调节 MgO 掺杂 PPLN(MgO-doped PPLN,MgO:PPLN)晶体的温度和极化周期,可以实现中红外全波段的可调谐输出。ZGP 的特点是具有良好的导热性,非线性系数较大,且制备工艺成熟。高功率输出的中红外 OPO 可以采用波长 2μm 的脉冲激光抽运 ZGP 得到。近年来,研究人员采用掺铥光纤激光器直接抽运 ZGP 输出中红外激光,有效地提高了激光器的稳定性,并同时简化了相应的结构。

3.1 PPLN OPO

2010 年,西班牙光子科学研究所的 KOKABEE 等人利用掺镱光纤激光器抽运 MgO:PPLN 晶体,在抽运功率为 16W 时获得了波长为 1.47μm、功率为 7.1W 的信号光和波长为 3.08μm、功率为 4.9W 的闲频光,激光的脉冲宽度为 17.3ps,脉冲重频为 81.1MHz,图 8

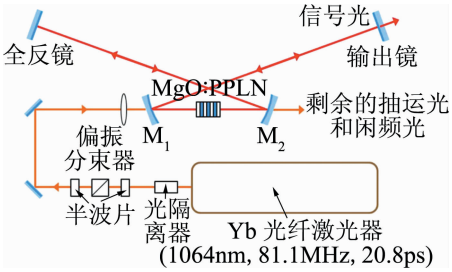

图 8　Yb 光纤激光器抽运皮秒 MgO：PPLN OPO[42]

所示为实验装置[42]。2011 年，法国航空航天实验室的 HARDY 等人利用调 Q Nd: YAG 激光器抽运嵌套腔，双谐振光参量振荡器（nested-cavity，doubly resonant optical parametric oscillator，NesCOPO），输出波长为 3.9μm 的激光，波长调谐范围为 3.8μm ~ 4.3μm，脉冲重频为 4.8kHz[43]。2012 年，英国南安普顿大学的 LIN 等人利用掺 Yb^{3+} 光纤激光器抽运周期极化 MgO 掺杂铌酸锂（periodically poled magnesium-oxide doped lithium niobate，PPMgLN），输出波长为 3.82μm 的激光，功率达到 5.5W，脉冲重频为 100kHz[44]。2013 年，西班牙光子科学研究所的 KIMMELMA 等人利用脉冲重频为 80MHz 的掺 Yb 光纤激光器抽运 MgO: PPLN OPO，输出的中红外激光脉冲重频增大到了 7GHz[45]。2014 年，西班牙光子科学研究所 RAMAIAH-BADARLA 等人报道了采用锁模掺 Yb 光纤激光器抽运两块 MgO: PPLN 晶体，实现了双信号光、双闲频光同步可调谐输出，中红外激光波长调谐范围为 3118nm ~ 3393nm，脉冲重频达到了 160MHz[46]。2015 年，英国南安普顿大学的 XU 等人利用光纤主振功率放大（master oscillator power amplifier，MOPA）系统抽运 MgO: PPLN，输出波长闲频光可调谐范围为 2.3μm ~ 3.5μm，单脉冲能量为 1.5μJ，脉冲重频为 1MHz[47]。2016 年，法国巴黎-萨克雷大学的 RIGAUD 等人利用高能量飞秒掺 Yb 光纤放大器抽运的 MgO: PPLN OPO 输出中红外激光的波长为3.07μm，单脉冲能量为 10μJ，脉冲宽度为 72fs，脉冲重频为 125kHz[48]。2017 年，英国伦敦帝国理工学院的 MURRAY 等人利用掺 Yb/Er 光纤主振荡功率放大系统抽运 MgO: PPLN，中红外激光输出功率大于 6W，波长范围为 3.31μm ~ 3.48μm，脉冲重复频率为 1MHz ~ 50MHz，这是目前单通光纤 MOPA 抽运激光输出的最高水平[49]。

2009 年，华中科技大学的 XIA 等人利用声光调 Q Nd: YAG 激光器抽运单谐振 PPLN OPO 和 MgO: PPLN OPO，通过改变晶体温度和极化周期长度，输出了中红外波段闲频光的波长调谐范围为 2.80μm ~ 4.79μm，脉冲重频为 10kHz[50]。同年，中国工程物理研究院的 PENG 等人利用类似的声光调 Q Nd：YAG 激光器抽运单谐振周期极化 MgO 掺杂同组分铌酸锂晶体（periodically poled MgO-doped congruent $LiNbO_3$ crystal，PPMgO：CLN），晶体温度为 110℃时，波长为 3.84μm 的激光平均功率达到了 16.7W，斜率效率为 19.1%，脉冲重频为 7kHz，M^2 因子在平行和垂直方向分别为 2.03 和 5.89[51]，相应的实验装置如图 9 所示。2010 年，清华大学的 LIU 等人利用高重频声光调 Q Nd: YVO_4 激光器抽运周期极化 MgO 掺杂铌酸锂（periodically-poled MgO doped lithium niobate，PPMgOLN），对应于 3 个不同的极化周期，这种中红外 OPO 输出闲频光的波长分别为 3591nm、3384nm 和 3164nm，平均功率分别为 3.0W，2.7W 和 4.3W，脉冲重频为 76.8kHz[52]。同年，浙江大学的 WU 等人利用输出线偏振激光的声光调 Q Nd：YVO_4 激光器作为抽运源，使用半外腔结构构建了室温工作的高效、高功率中红外 MgO：PPLN OPO，输出激光波长为 3.82μm，功率为9.23W，脉冲重频为 52kHz[53]。2012 年，中国科学院上海光学精密机械研究所的 XU 等人利用波长为1.9μm 的声光调 Q Tm 掺杂氟化钇锂（$LiYF_4$，YLF）Tm：YLF 激光器作为抽运源，首次在室温实现了高效、双振荡 MgO：PPLN OPO，信号光和闲频光的波长约等于3.8μm，功率为 2.9W，脉冲重频为 2kHz[54]。同年，中国工程物理研究院的 PENG 等人利用 Nd: YAG MOPA 偏振激光系统作为抽运源，构建了单谐振 MgO：PPLN OPO，输出波长为 3.91μm 的中红外激光，平均功率达到了 27W，脉冲重频为 10kHz，波长调谐范围为 3.7μm ~ 4.0μm[55]。2014 年，山东大学的 LIU 等人利用掺 Yb 光纤激光器抽运 MgO：PPLN，构建了波长可调谐、高效的中红外耦合输出单谐振 OPO，输出闲频光波长在3.0μm ~ 3.9μm 之间可连续调谐，脉冲重频可达到 50kHz[56]。2015 年，深圳大学的 LIU 等人利用体光栅锁波长的电光调 Q Er：YAG 激光器抽运 MgO：PPLN，输出总平均功率超过 1W。调节 MgO：PPLN 晶体的温度，能够使得信号光和闲频光分别在 2.67μm ~ 2.72μm 和 4.17μm ~ 4.31μm 范围内调谐，脉冲重频可达到 3kHz[57]。同年，华北光电技术研究所的 LI 等人利用

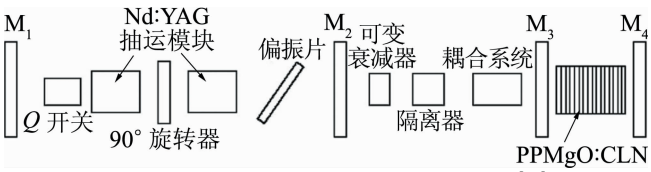

图 9　Nd：YAG 激光器抽运 PPMgO：CLN OPO[51]

Nd:$GdVO_4$振荡器 + MOPA 结构抽运 MgO:PPLN,输出中红外激光波长为 3.81μm,平均功率为5.4W,光光转换效率为 15.88%,脉冲重频为 10kHz[58]。

3.2 ZGP OPO

2010 年,挪威国防研究机构的 LIPPERT 等人利用输出波长为 2.1μm 的 Tm 光纤/Ho:YAG 杂化激光器系统抽运 ZGP 晶体,构建了 V 型三镜环形谐振腔 ZGP OPO,输出信号光和闲频光的波长分别为 3.9μm 和 4.5μm,总功率为 22W,脉冲重频为 45kHz,图 10 所示为相应的实验装置示意图[59]。2013 年,澳大利亚国防科技组织的 HEMMING 等人采用类似的杂化激光系统抽运 ZGP 晶体,输出激光波长为 3μm ~ 5μm,平均功率为 27W,重频为 35kHz[60]。2014 年,美国中弗罗里达大学的 GEBHARDT 等人直接利用纳秒 Tm 光纤 MOPA 系统作为抽运源,构建了双振荡腔 ZGP OPO,输出中红外激光的波长为 3.7μm,脉冲重频为 4kHz[61]。2015 年,法国圣路易斯法德研究所的 KIELECK 等人利用有源 Q 开关掺 Tm^{3+} 单谐振保偏双包层光纤作为抽运源,直接抽运 ZGP OPO,输出中红外激光波长范围为 3μm ~ 5μm,平均功率达到 6.5W,脉冲重频为 40kHz[62]。

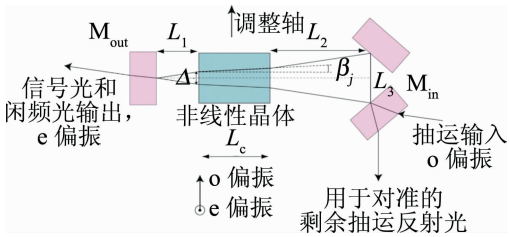

图 10 Ho:YAG 激光器抽运 ZGP OPO[59]

2011 年,中国工程物理研究院的 PENG 等人使用 KTP OPO 输出波长为 2.1μm 激光,进而抽运 ZGP OPO 得到信号光和闲频光的波长分别为 4.1μm 和 4.32μm,总的平均功率为 5.7W,脉冲重频为 8kHz[63]。2014 年,哈尔滨工业大学的 YAO 等人采用 Ho:YAG 激光器和 Ho 掺杂镥铝石榴石($Lu_3Al_5O_{12}$,LuAG)Ho:LuAG 激光器(激光波长都为 2.1μm)抽运 ZGP OPO,输出中红外激光的波长范围为 3μm ~ 5μm,平均功率分别达到 41.2W 和 5.51W,脉冲重频分别为 20kHz 和 5kHz。图 11 所示为 Ho:YAG 激光器抽运 ZGP OPO 的实验装置示意图[64-65]。2015 年,华北光电技术研究所的 HAN 等人利用声光调 Q Ho:YLF MOPA 系统作为抽运源,采用双谐振腔结构构建了 ZGP OPO,输出中红外激光波长为 3.52μm 和 4.9μm,总平均功率为 26.9W,脉冲宽度为 25ns,脉冲重频为 5kHz。通过对 ZGP OPO 进行角度调谐,获得了波长为 3.75μm 和 4.5μm 的激光输出[66]。2018 年,哈尔滨工业大学的 DUAN 等人构建了 Tm:YLF-Ho:LuAG-ZGP 中红外激光系统。Ho:LuAG 激光器在声光调 Q 工作时,输出最大平均功率分别为 34.1W,34.9W 和 35.2W,对应脉冲重频为 10kHz,15kHz 和 20kHz;当 Ho:LuAG 激光器输出平均功率为34.1W 时,ZGP OPO 的输出功率分别为 16.7W,15.3W 和 12.6W,对应脉冲重频分别为 10kHz,15kHz 和 20kHz,最小脉冲宽度分别为 23ns,27ns 和 31ns,最大单脉冲能量分别为 1.7mJ,1.0mJ 和 0.6mJ。这是 Ho:LuAG 激光器抽运 ZGP 输出中红外激光已知的最好性能。ZGP OPO 输出信号光和闲频光的光束质量因子 M^2 分别为 2.2 和 1.9[67]。

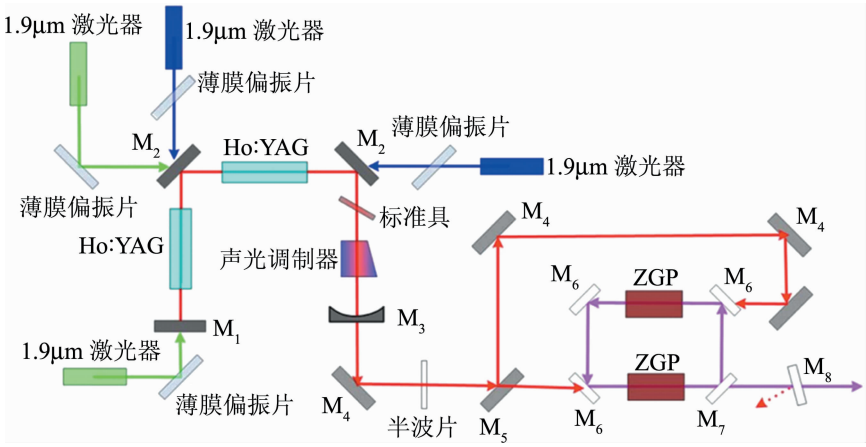

图 11 Ho:YAG 激光器抽运 ZGP OPO[64]

4 结束语

目前,用于光电对抗的固体和光纤高重频中红外激光器仍然是研究的热点。为了提升高重频中红外激光器的性能,需要深入研究并改善中红外激光介质的物理化学性质,发展提高中红外激光器性能的技术。

总体看来,国内在相关领域中理论和技术两方面的研究都略显不足。本文中依照时间先后次序,详细总结了几种高重频中红外激光的研究进展状况,并根据已有研究展望了未来具有发展潜力的几个研究方向。实际上,只有若干的关键技术取得较大突破时,高重频中红外固体和光纤激光器才能得到快速的发展。例如,提高抽运源激光器的脉冲重频,是实现高重频 Fe^{2+}:ZnSe 中红外固体激光器的关键;室温条件下实现中波红外激光的输出以及克服粒子数的瓶颈效应是实现实用型 Er^{3+}:ZBLAN 光纤激光器的关键;喇曼激光器具有波长可变和结构简单等优点,也可作为中红外光纤激光器的一个重要发展类型;制备高质量、大尺寸 OPO 晶体是实现高功率中红外激光器的关键。另外,为了简化中红外激光器的结构,减轻系统的重量,提高运行的稳定性,可采用光纤激光器直接抽运 OPO 晶体的方式,这也是目前高重频中红外 OPO 激光器的研究重点之一。

参 考 文 献

[1] YANG A F, ZHANG J, LI G, *et al*. Technology of MWIR laser in directed infrared countermeasure systems[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(1): 119-125(in Chinese).

[2] WU J. Research of the key technology of coherent range and range-rate detection ladar with large dynamic range and high-repetition-rate [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 1-164(in Chinese).

[3] TIAN Y Zh, ZHAO Sh, GUO J. Analysis of non-cooperative target photon counting laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0514002(in Chinese).

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

[5] KERNAL J, FEDOROV V V, GALLIAN A, *et al*. 3.9 – 4.8μm gain-switched lasing of Fe: ZnSe at room temperature[J]. Optics Express, 2005, 13(26): 10608-10615.

[6] AKIMOV V A, VORONOV A A, KOZLOVSKII V I, *et al*. Efficient lasing in a Fe^{2+}: ZnSe crystal at room temperature[J]. Quantum Electronics, 2006, 36(4): 299-301.

[7] EVANS J W, BERRY P A, SCHEPLER K L. A passively *Q*-switched, CW-pumped Fe: ZnSe laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(3): 204-209.

[8] MARTYSHKIN D V, FEDOROV V V, MIROV M, *et al*. High average power (35W) pulsed Fe: ZnSe laser tunable over 3.8 – 4.2μm [J/OL]. (2015-05-10)[2020-10-21]. https://www.osapublishing.org/abstract.cfm? uri = cleo_si-2015-SF1F.2.

[9] XIA Sh 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).

[10] YAO B Q, XIA Sh X, YU K K, *et al*. Mid-infrared laser output of Fe^{2+}: ZnSe crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0119001(in Chinese).

[11] KE Ch J, WANG D L, WANG X Y, *et al*. 15mJ mid-infrared laser output of Fe^{2+}: ZnSe crystal at room temperature[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0219004(in Chinese).

[12] FRERICHS C H, TAUERMANN T. *Q*-switched operation of laser diode pumped erbium-doped fluorozirconate fibre laser operating at 2.7μm[J]. Electronics Letters, 1994, 30(9): 706-707.

[13] COLEMAN D J, KING T A, KO D, *et al*. *Q*-switched operation of a 2.7μm cladding-pumped Er^{3+}/Pr^{3+} codoped ZBLAN fibre laser [J]. Optics Communications, 2004, 236(4): 379-385.

[14] TOKITA S, MURAKAMI M, SHIMIZU S, *et al*. 12W *Q*-switched Er: ZBLAN fiber laser at 2.8μm[J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 2812-2814.

[15] HU T, HUDSON D D, JACKSON S D. Actively *Q*-switched 2.9μm Ho^{3+} Pr^{3+}-doped fluoride fiber laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2145-2147.

[16] LAMRINI S, SCHOLLE K, SCHAFER M, *et al*. High-energy *Q*-switched Er: ZBLAN fibre laser at 2.79μm[C]//2015 European Conference on Lasers and Electro-Optics-European Quantum Electronics Conference. Washington DC, USA: Optical Society of America, 2015: CJ_7_2.

[17] LI J, HU T, JACKSON S D. Dual wavelength *Q*-switched cascade laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(12): 2208-2210.

[18] LI J, YANG Y, HUDSON D, *et al*. A tunable *Q*-switched Ho^{3+}-doped fluoride fiber laser[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(4): 045107.

[19] FRERICHS C, UNRAU U B. Passive *Q*-switching and mode-locking of erbium-doped fluoride fiber lasers at 2.7 μm[J]. Optical Fiber Technology, 1996, 2(4): 358-366.

[20] WEI Ch, ZHU X, NORWOOD R A, *et al*. Passively *Q*-switched 2.8μm nanosecond fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(19): 1741-1744.

[21] WEI Ch, ZHU X, WANG F, *et al*. Graphene *Q*-switched 2.78μm Er^{3+}-doped fluoride fiber laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3233-3236.

[22] ZHU G, ZHU X, BALAKRISHNAN K, *et al*. Fe^{2+}: ZnSe and graphene *Q*-switched singly Ho^{3+}-doped ZBLAN fiber lasers at 3μm [J]. Optical Materials Express, 2013, 3(9): 1365-1377.

[23] LI J, LUO H, HE Y, *et al*. Semiconductor saturable absorber mirror passively *Q*-switched 2.97μm fluoride fiber laser[J]. Proceedings of the SPIE, 2014, 9135: 913504.

[24] LI J, LUO H, WANG L, *et al*. 3μm mid-infrared pulse generation using topological insulator as the saturable absorber[J]. Optics Letters, 2015, 40(15): 3659-3662.

[25] LI J, LUO H, WANG L, *et al*. Tunable Fe^{2+}: ZnSe passively *Q*-switched Ho^{3+}-doped ZBLAN fiber laser around 3μm[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22362-22370.

[26] QIN Zh, XIE G, ZHANG H, *et al*. Black phosphorus as saturable absorber for the *Q*-switched Er: ZBLAN fiber laser at 2.8μm[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24713-24718.

[27] ZHANG T, FENG G, ZHANG H, *et al*. 2.78μm passively *Q*-switched Er^{3+}-doped ZBLAN fiber laser based on PLD-Fe^{2+}: ZnSe film[J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(7): 075102.

[28] LIU J, HUANG B, TANG P H, *et al*. Volume Bragg grating based tunable continuous-wave and Bi_2Te_3 *Q*-switched Er^{3+}: ZBLAN fiber laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (online). Washington D C, USA: Optical Society of Ameri-

ca, 2016: AW1K.7.

[29] SHEN Y, WANG Y, LUAN K, *et al*. Watt-level passively *Q*-switched heavily Er^{3+}-doped ZBLAN fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 26659.

[30] WEI CH, LUO H, ZHANG H, *et al*. Passively *Q*-switched mid-infrared fluoride fiber laser around 3μm using a tungsten disulfide (WS_2) saturable absorber[J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(10): 105108.

[31] LAI X, LI J, LUO H, *et al*. High power passively *Q*-switched Er^{3+}-doped ZBLAN fiber laser at 2.8μm based on a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(8): 085109.

[32] WEI Ch, ZHU X, NORWOOD R A, *et al*. Passively continuous-wave mode-locked Er^{3+}-doped ZBLAN fiber laser at 2.8μm[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3849-3851.

[33] HABOUCHA A, FORTIN V, BERNIER M, *et al*. Fiber Bragg grating stabilization of a passively mode-locked 2.8μm Er^{3+}: fluoride glass fiber laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3294-3297.

[34] DUVAL S, BERNIER M, FORTIN V, *et al*. Femtosecond fiber lasers reach the mid-infrared[J]. Optica, 2015, 2(7): 623-626.

[35] HU T, JACKSON S D, HUDSON D D. Ultrafast pulses from a mid-infrared fiber laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(18): 4226-4228.

[36] ZHU G, ZHU X, WANG F, *et al*. Graphene mode-locked fiber laser at 2.8μm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 28(1): 7-10.

[37] LI J, HUDSON D, LIU Y, *et al*. Efficient 2.87μm fiber laser passively switched using a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3747-3749.

[38] YIN K, JIANG T, ZHENG X, *et al*. Mid-infrared ultra-short mode-locked fiber laser utilizing topological insulator Bi_2Te_3 nano-sheets as the saturable absorber [J/OL]. (2015-05-23) [2020-10-21]. https://arxiv.org/abs/1505.06322.

[39] TANG P, QIN ZH, LIU J, *et al*. Watt-level passively mode-locked Er^{3+}-doped ZBLAN fiber laser at 2.8μm[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 4855-4858.

[40] QIN Zh, XIE G, ZHAO Ch, *et al*. Mid-infrared mode-locked pulse generation with multilayer black phosphorus as saturable absorber [J]. Optics Letters, 2016, 41(1): 56-59.

[41] QIN Zh, HAI T, XIE G, *et al*. Black phosphorus *Q*-switched and mode-locked mid-infrared Er: ZBLAN fiber laser at 3.5μm wavelength[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 8224-8231.

[42] KOKABEE O, ESTEBAN-MARTIN A, EBRAHIM-ZADEH M. Efficient, high-power, ytterbium-fiber-laser-pumped picosecond optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3210-3212.

[43] HARDY B, BERROU A, GUILBAUD S, *et al*. Compact, single-frequency, doubly resonant optical parametric oscillator pumped in an achromatic phase-adapted double-pass geometry[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 678-680.

[44] LIN D, ALAM S, SHEN Y, *et al*. An all-fiber PM MOPA pumped high-power OPO at 3.82μm based on large aperture PPMgLN[J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8237: 82371K.

[45] KIMMELMA O, KUMAR S C, ESTEBAN-MARTIN A, *et al*. Multi-gigahertz picosecond optical parametric oscillator pumped by 80MHz Yb-fiber laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4550-4553.

[46] RAMAIAH-BADARLA V, KUMAR S C, EBRAHIM-ZADEH M. Fiber-laser-pumped, dual-wavelength, picosecond optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 2014, 39(9): 2739-2742.

[47] XU L, CHAN H, ALAM S, *et al*. Fiber-laser-pumped, high-energy, mid-IR, picosecond optical parametric oscillator with a high-harmonic cavity[J]. Optics Letters, 2015, 40(14): 3288-3291.

[48] RIGAUD P, VAN DE WALLE A, HANNA M, *et al*. Supercontinuum-seeded few-cycle mid-infrared OPCPA system[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26494-26502.

[49] MURRAY R T, RUNCORN T H, GUHA S, *et al*. High average power parametric wavelength conversion at 3.31 – 3.48μm in MgO: PPLN[J]. Optics Express, 2017, 25(6): 6421-6430.

[50] XIA L, RUAN S, SU H. High-power widely tunable singly resonant optical parametric oscillator based on PPLN or MgO-doped PPLN [J]. Proceedings of the SPIE, 2009, 7276: 72760G.

[51] PENG Y, WANG W, WEI X, *et al*. High-efficiency mid-infrared optical parametric oscillator based on PPMgO: CLN[J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 2897-2899.

[52] LIU J, LIU Q, YAN X, *et al*. High repetition frequency PPMgOLN mid-infrared optical parametric oscillator[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(9): 630-633.

[53] WU B, KONG J, SHEN Y. High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN-based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2W at 3.82μm[J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1118-1120.

[54] XU L, ZHANG Sh, CHEN W. Tm: YLF laser-pumped periodically poled MgO-doped congruent $LiNbO_3$ crystal optical parametric oscillators[J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 743-745.

[55] PENG Y F, WEI X B, LI D M, *et al*. High-power mid-infrared tunable optical parametric oscillator based on 3mm-thick PPMgCLN [J]. Laser Physics, 2012, 22(1): 87-90.

[56] LIU Sh, WANG Zh, ZHANG B, *et al*. Wildly tunable, high-efficiency MgO: PPLN mid-IR optical parametric oscillator pumped by a Yb-fiber laser [J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(2): 024204.

[57] LIU J, TANG P, CHEN Y, *et al*. Highly efficient tunable mid-infrared optical parametric oscillator pumped by a wavelength locked, *Q*-switched Er: YAG laser[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20812-20819.

[58] LI H, LIU Z, ZHENG J, *et al*. High power mid-infrared MgO: PPLN optical parametric oscillator [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015, 13(1): 64-67(in Chinese).

[59] LIPPERT E, FONNUM H, ARISHOLM G, *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.

[60] HEMMING A, RICHARDS J, DAVIDSON A, *et al*. 99W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25% duty cycle[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 10062-10069.

[61] GEBHARDT M, GAIDA C, KADWANI P, *et al*. High peak-power mid-infrared $ZnGeP_2$ optical parametric oscillator pumped by a Tm: fiber master oscillator power amplifier system[J]. Optics Letters, 2014, 39(5): 1212-1215.

[62] KIELECK C, BERROU A, DONELAN B, *et al*. 6.5 W $ZnGeP_2$ OPO directly pumped by a *Q*-switched Tm^{3+}-doped single-oscillator fiber laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(6): 1101-1104.

[63] PENG Y, WEI X, WANG W. Mid-infrared optical parametric oscillator based on $ZnGeP_2$ pumped by 2μm laser[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(6): 061403.

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

[65] SHEN Y, YAO B, CUI Zh, *et al*. A ring $ZnGeP_2$ optical parametric oscillator pumped by a Ho: LuAG laser[J]. Applied Physics, 2014, B117(1): 127-130.

[66] HAN L, YUAN L G, CHEN G, *et al*. 26W mid-infrared solid-state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0302004(in Chinese).

[67] DUAN X, LI L, SHEN Y, *et al*. Efficient middle-infrared ZGP-OPO pumped by a *Q*-switched Ho: LuAG laser with the orthogonally polarized pump recycling scheme[J]. Applied Optics, 2018, 57(27): 8102-8107.