

直接抽运中红外固体激光器研究进展

孙 晓, 韩 隆, 王克强

华北光电技术研究所固体激光器技术重点实验室, 北京 100015

摘要 3~5 μm 中红外辐射位于大气传输窗口, 具有广泛的应用前景。目前, 固体激光器获得 3~5 μm 中红外辐射的途径主要是基于光参量振荡(OPO)的方法。与之相比, 以直接抽运为代表的新型中红外固体激光器在总体设计原理和激光器结构上都更为简单。目前, 随着相关晶体材料 and 对应抽运源的逐步成熟, 直接抽运中红外激光器迅速发展。总结了以 Fe:ZnSe、Ho:BYF 和 Dy:PGS 三种晶体材料为代表的直接抽运中红外固体激光器, 详细介绍了其关键技术和国内外主要研究进展, 分析了其发展的重点和难点。

关键词 激光器; 中红外激光; 直接抽运; Fe:ZnSe; Dy:PGS; Ho:BYF

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.050007

Progress in Directly Pumping of Mid-Infrared Solid-State Lasers

Sun Xiao, Han Long, Wang Keqiang

Laboratory of Solid-State Laser Technology, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract Mid-infrared (3-5 μm) is in the range of atmospheric transmission window, which has broad application prospects. So far, the main way to obtain the mid-infrared radiation by solid-state lasers is based on the optical parameter oscillator (OPO) technology. The design principle and structures of new type mid-infrared lasers, especially directly pumping of mid-infrared lasers are not so complicated compared with OPO. With the development of crystal material and relevant pump sources, the directly pumping of mid-infrared lasers develops rapidly. Directly pumping of mid-infrared lasers, their key techniques and recent research advances, represented by Fe:ZnSe laser, Ho:BYF laser and Dy:PGS laser, are summarized. The key and difficult points are analyzed at last.

Key words lasers; mid-infrared laser; directly pumping; Fe:ZnSe; Dy:PGS; Ho:BYF

OCIS codes 140.3580; 140.3070; 140.3480

1 引言

3~5 μm 波段中红外辐射位于大气透过率最高的传输窗口, 理想的大气传输特性使得该波段激光器在大气遥感、激光雷达、空间光通信等领域具有重要的应用价值。由于该波段内有很多生物分子的特征吸收, 因此, 中红外光源也广泛应用于有毒气体探测、光谱分析和环保等领域^[1]。此外, 由于 H₂O 和 CO₂ 在 3 μm 波段附近有较强的吸收峰, 使其在大气环境监测和医疗(如激光手术)方面具有很好的发展潜力^[2]。军事上, 由于飞机和导弹尾焰对应的黑体辐射位于该波段, 所以 3~5 μm 中红外光源在光电对抗等方面也展现出了令人瞩目的发展前景^[3]。

目前, 主要采用自由电子激光器、化学激光器、气体激光器、半导体量子级联激光器(QCL)和固体激光器等来获得 3~5 μm 中红外激光辐射。自由电子激光器体积庞大、价格昂贵; 化学激光器中最为典型的是 HF 和 DF 激光器, 虽然具有很大的输出能量, 但主要缺点为体积大, 会产生难以处理的反应产物; 气体激光器中最为典型的是倍频 CO₂ 激光器和泛频 CO 激光器, 虽然可以有效输出中红外激光, 但效率低、发展缓慢; QCL 因其体积小近年来发展迅速, 但输出的光束质量较差。与这几类激光器相比, 固体激光器具有成熟稳定、光束质量好等优点, 一直是国内外研究人员的热点课题^[4-6]。近年来, 随着中红外波段激光晶体性能的

收稿日期: 2016-12-20; **收到修改稿日期:** 2017-01-12

作者简介: 孙 晓(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: diamondsxsx@126.com

逐步成熟,以直接抽运为代表的新型高效中红外激光技术发展迅速。直接抽运主要是指依靠传统的粒子数反转,受激辐射形成激光,而不是通过非线性效应、自由电子碰撞等方式获得激光输出^[7]。该方法原理相对简单,并逐步展现出了高效率、高可靠性、易于小型化等优点。

与 $1\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 激光相比,中红外波长更长,其对应辐射的能级间隙更小。如果晶体的声子能量较高,非常容易引起声子参与上能级到下能级的无辐射跃迁,导致荧光淬灭^[8]。目前晶体生长技术最成熟的氧化物为 YAG、YVO₄ 等,由于其声子能量较大,不适合 $3\ \mu\text{m}$ 以上中红外激光输出。为此,研究人员将更多的目光投向了硫化物和氟化物这种声子能量更低的基质材料中。目前,对直接抽运中红外激光器的研究主要集中在:1) 以 Fe:ZnSe 为代表的过渡族元素掺杂硫族化合物激光器;2) 以 Ho:BYF 为代表的掺 Ho 的氟化物激光器;3) 以掺杂 Dy 的 PbGa₂S₄ (Dy:PGS) 为代表的 Dy 掺杂激光器。本文针对不同方法直接抽运中红外固体激光器的技术途径和国内外发展现状展开阐述,并对增益晶体材料的基本特性和目前激光器存在的主要技术难度进行分析和总结。

2 固体激光器产生中红外输出的基本方法对比

固体激光器输出 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 中红外激光辐射,从原理上主要分为线性和非线性两种方法。非线性的方法最典型的为光参量振荡(OPO)激光器和光纤拉曼激光器;线性的方法则以直接抽运中红外激光器为代表。OPO 方法是通过磷锗锌(ZGP)或周期极化铌酸锂(PPLN)晶体将 $1\ \mu\text{m}$ 或 $2\ \mu\text{m}$ 的抽运激光通过 OPO 频率变换,实现 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的激光辐射输出^[9-10]。该方法是目前最为成熟的获得中红外辐射的方法,通过对抽运光进行调 Q 可以获得高重复频率的中红外激光输出,输出能量最高可以达几十瓦量级,且输出激光波长可在中红外波段调谐^[11],甚至输出波长大于 $5\ \mu\text{m}$ 的激光。光纤拉曼激光器是近年来发展迅速的激光器,一般采用氟化物或硫化物光纤,通过 $1.5\ \mu\text{m}$ 或 $2\ \mu\text{m}$ 短脉冲抽运,利用拉曼频移效应得到中红外激光,其输出脉宽比较窄,一般在几纳秒或者皮秒,甚至飞秒量级。该激光器的最大优点是光束质量好,但目前得到的激光波长一般都在 $3\ \mu\text{m}$ 附近,要获得更大的波长难度较大,且其输出的能量也比较小,最高为瓦级输出^[12-13]。与之相比,采用线性方法的直接抽运激光器因为没有复杂的频率转换和多级抽运结构,所以其原理更加简单,从而也更加容易实现轻小型化中红外激光光源的高效率输出,尤其适用于车载、机载等对光源体积和效率要求较高的环境。目前,该类激光器的主要难点在于,虽然其最高输出能量可达到焦耳量级,但很难对其进行有效的调 Q,从而使其输出的脉宽较大,很难实现高重复频率输出;另外其输出的波长可调谐范围主要依靠增益晶体本身的增益线宽,所以和非线性方法相比,其输出波长相对固定,很难在较大的范围内进行调谐。

3 以 Fe:ZnSe 为代表的过渡族元素掺杂硫族化合物激光器

将过渡金属掺杂硫化物晶体实现 $2\sim 6\ \mu\text{m}$ 激光的直接激射,是研究人员最早实现直接激射中波激光的方法^[14],其中最为典型的的就是 Fe:ZnSe 激光器。将 FeSe 掺杂进入 ZnSe 基质,Fe²⁺ 离子部分取代正四面体晶格中心的 Zn²⁺ 离子,即可形成 Fe:ZnSe 晶体^[15]。一方面,ZnSe 晶体在中波甚至长波具有良好的透过特性;另一方面,Fe²⁺ 离子在中波波段具有良好的发射谱线。正是基于这样的性质,Fe:ZnSe 激光器一直广受研究人员的关注。

3.1 Fe:ZnSe 晶体基本特性

图1(a)为常温(RT)条件下 Fe:ZnSe 的吸收光谱和发射光谱^[16]。由图 1(a)可知,Fe:ZnSe 吸收光谱峰值位于 $3\ \mu\text{m}$ 附近,吸收截面达到 $0.97\times 10^{-18}\ \text{cm}^2$;Fe:ZnSe 的发射光谱相对较宽,约为 $4\sim 4.7\ \mu\text{m}$,发射截面峰值为 $1.4\times 10^{-18}\ \text{cm}^2$,峰值波长位于 $4.3\ \mu\text{m}$ 附近。图 1(b)为 14 K 和 300 K 温度时,Fe:ZnSe 的吸收截面^[17]。由图 1(b)可知,在低温环境下,Fe:ZnSe 在 $3\ \mu\text{m}$ 附近的吸收截面有所提升。

图2为 4 位不同研究人员对 Fe:ZnSe 在不同温度下的上能级寿命的研究结果^[14]。由图 2 可知,Fe:ZnSe 的上能级寿命随温度上升而迅速下降,在常温下只有 $0.3\ \mu\text{s}$ 左右,在低温(77 K)下,其上能级寿命较大,但也只能达到 $57\ \mu\text{s}$ 。造成常温下 Fe:ZnSe 上能级寿命低的主要原因在于:常温下,晶体材料声子能量高,引起其参与上能级粒子的自发辐射,粒子很难在上能级长时间停留。由于 Fe:ZnSe 上能级寿命较低,所以只

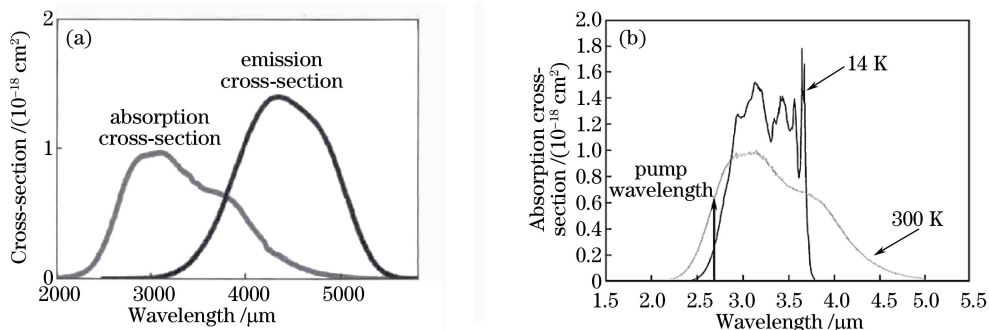


图 1 Dy:PGS 的吸收发射特性。(a) Fe:ZnSe 常温下的吸收和发射截面;(b) Fe:ZnSe 在低温下的吸收截面
Fig. 1 Absorption and emission character of Fe:ZnSe. (a) Absorption and emission cross-section of Fe:ZnSe at room temperature; (b) absorption cross-section of Fe:ZnSe at low temperature

能使用窄脉宽抽运,否则很难实现常温下实现大能量输出。如果想要实现 Fe:ZnSe 的高效振荡,就要对其进行制冷,保证其在低温下工作。

由于 Fe:ZnSe 本身的吸收光谱峰值位于 $3 \mu\text{m}$ 左右,目前还没有 LD 可以直接对应此波长,且要求抽运脉宽较窄,对抽运源要求就更高。目前,Fe:ZnSe 的抽运源主要有掺 Er 的 YAG 激光器、非链式 HF 激光器和掺杂 Cr 的 ZnSe 激光器等 3 种,其输出的中心波长分别为 2940 、 $2.6\sim 3.1$ 、 $2.7 \mu\text{m}$ 。

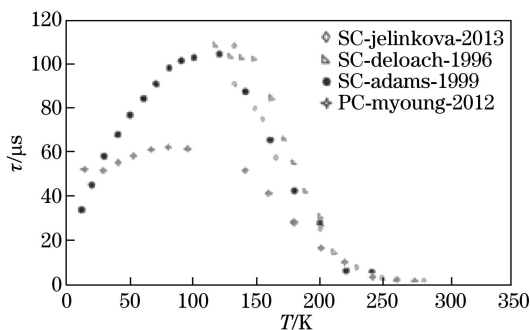


图 2 Fe:ZnSe 的上能级寿命随温度变化
Fig. 2 Upper level life time of Fe:ZnSe versus temperature

目前,对 Fe:ZnSe 晶体研究和制备的研究结果很多,主要采用垂直布里奇曼和高温扩散法。1999 年,Adams 等^[18]采用垂直布里奇曼成功制备了 Fe:ZnSe 晶体。之后,俄罗斯的多家研究结构也采用此方法完成 Fe:ZnSe 晶体的制备^[19-20]。2005 年,Kernal 等^[16]首先采用高温扩散法制备了 Fe:ZnSe 晶体。目前,IPG 公司已经完成了一整套高温扩散法制备 Fe:ZnSe 晶体的设备流程^[21]。国内已有中国电子科技集团第十一研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所等多家研究结构对 Fe:ZnSe 晶体制备进行了研究,并完成了晶体的生长和相应激光实验^[22-23]。

3.2 Fe:ZnSe 激光器的国外研究现状

由于 Fe:ZnSe 具有良好的物理和光谱特性,国外对其研究较多。早在 1999 年,Adams 等^[18]就利用 Er:YAG 激光器对 Fe:ZnSe 进行抽运,并在液氮制冷的条件下,形成了 $4\sim 4.5 \mu\text{m}$ 可调谐的激光振荡,虽然输出的最大能量只有 $12 \mu\text{J}$,但实验证明了 Fe:ZnSe 的中波辐射特性^[15]。之后,越来越多的研究者对 Fe:ZnSe 激光器进行了研究^[16-31]。表 1 为近年来国外对 Fe:ZnSe 激光器的研究情况。

由表 1 可知,以美国和俄罗斯为首的科技强国对 Fe:ZnSe 激光器开展了大量的研究。其中最为典型的研究情况如下。

2011 年,Doroshenko 等^[28]采用 Er:YAG 对低温下的 Fe:ZnSe 进行抽运,采用如图 3(a)所示光路图,得到了脉宽 $150\sim 200 \text{ ns}$ 的 1.5 mJ 中波脉冲,输出中波激光波长为 $4\sim 5 \mu\text{m}$ 的可调谐。对采用垂直布里奇曼法和热扩散法两种不同方法制备的 Fe:ZnSe 的效率进行了对比验证,结果如图 3(b)所示。由图 3 可知,两种不同方法制备的 Fe:ZnSe 效率相近。图 3(c)为输出中波激光的脉冲。

表1 国外 Fe:ZnSe 激光器的研究情况

Table 1 Research status of Fe:ZnSe lasers abroad

Research unit (year)	Author	Pump source	Temperature	Wavelength	Output	Efficiency /%
Lawrence Livermore National Laboratory (1999)	Adams ^[18]	Er:YAG at 2.7 μm	5-180 K	3980-4540 nm	12 μJ (pulsed), 48 μs , 100 Hz	8
University of Alabama (2006)	Akimov ^[24]	Er:YAG at 2.94 μm	RT	3950-5050 nm	370 μJ (pulsed), 60 Hz, 100 ns	4
A M Prokhorov General Physics Institute of RAS (2010)	Doroshenko ^[25]	Er:YAG at 2.94 μm , 160-300 ns	RT	4300-4600 nm	0.58 mJ (pulsed), 1 Hz	7
Czech Technical University (2010)	Kozlovsky ^[26]	Er:YAG at 2.94 μm , 300 ns	RT	4100 nm	6 mJ (pulsed), 1 Hz	20
University of Alabama (2011)	Myoung ^[27]	Er:Cr:YSGG at 2.8 μm , 20 ns	RT	4370 nm	3.6 mJ (pulsed), 6.7 Hz	16
A M Prokhorov General Physics Institute of RAS (2011)	Doroshenko ^[28]	Er:YAG at 2.94 μm (Q-switched)	RT	4-5 μm	1.3 mJ (pulsed), 150-200 ns, 1 Hz	9
IPG photonics Corp. (2013)	Fedorov ^[29]	Er:YAG at 2.94 μm , 250 μs	77 K	4140 nm	0.42 J (pulsed)	32
Air Force Research Laboratory (2012)	Evans ^[30]	Er:YAG at 2.94 μm	77 K	4100 nm	840 mW (coherent)	28
PN Lebedev Physical Institute (2013)	Frolov ^[31]	Er:YAG at 2.94 μm	85 K	4100 nm	2.1 J (pulsed), 0.3-0.5 μs	26
IPG photonics Corp. (2012)	Fedorov ^[21]	Cr:ZnSe at 2.7 μm	77 K	4140 nm	1.5 W (coherent)	27
Russian Federal Nuclear Center (2014)	Velikanov ^[32]	HF at 2.6-3.1 μm	RT	4600-4700 nm	30 mJ (pulsed), 125 ns	3
A M Prokhorov General Physics Institute of RAS (2014)	Firsov ^[33]	HF at 2.6-3.1 μm , 130 ns	RT	—	192 mJ (pulsed), 90 ns	29
Air Force Research Laboratory (2014)	Evans ^[34]	Er:YAG 2936 nm	77 K	4045 nm	515 mW (Q-switched), 64 ns, 850 kHz	22
IPG photonics Corp. (2015)	Martyshkin ^[35]	Er:YAG At 2.94 μm (free running)	77 K	3880-4170 nm	0.35 J (pulsed), 150 μs , 100 Hz	—
Russian Federal Nuclear Center (2016)	Velikanov ^[36]	HF at 2.6-3.1 μm	RT	—	1.2 J (pulsed)	25

2013年, Frolov等^[31]采用闪光灯抽运自由运转的高达8J的2.94 μm 脉冲Er:YAG激光器作为抽运源, Fe:ZnSe晶体尺寸为8 mm \times 8 mm \times 8 mm, 在液氮制冷85 K的温度下获得了2.1 J的中波激光, 其斜效

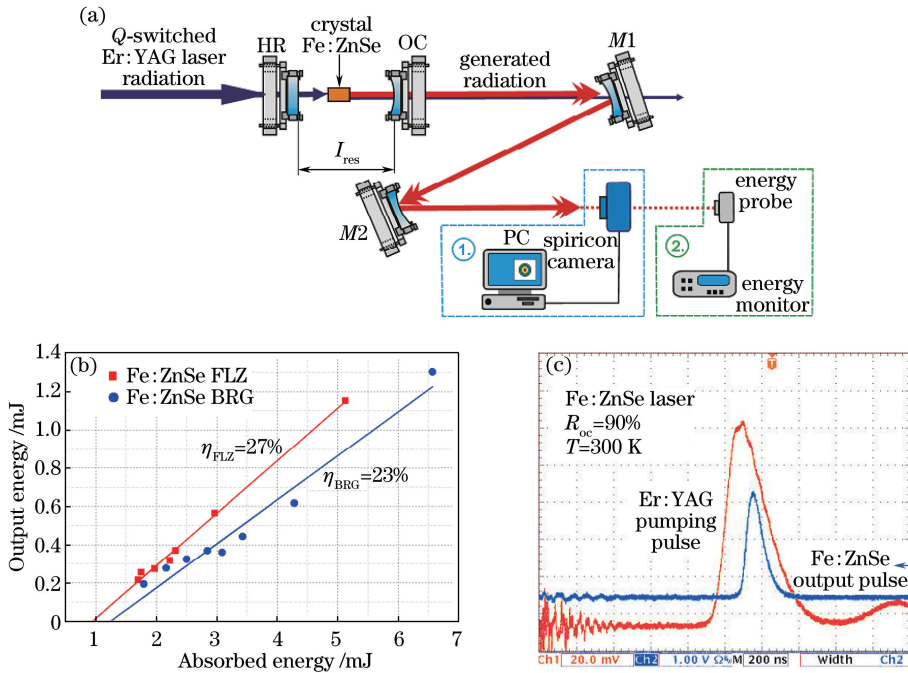


图 3 4~5 μm 的可调谐 Fe:ZnSe 激光器。(a)低温下 Er:YAG 抽运 Fe:ZnSe 激光器光路图;(b)对两种不同方法制备的 Fe:ZnSe 的效率验证;(c)输出中波激光的脉冲

Fig. 3 4-5 μm tunable Fe:ZnSe laser. (a) Beam path diagram of Fe:ZnSe laser pumped by Er:YAG at low temperature; (b) efficiency of Fe:ZnSe grown by two different methods; (c) output pulse shape of mid-infrared laser

率达到了 51%，在采用热电制冷的 245 K 温度时，实现了 1.3 J 的中波激光输出，斜效率为 19%，实验光路如图 4 所示。这是目前固体激光器抽运 Fe:ZnSe 晶体获得的最高输出指标。

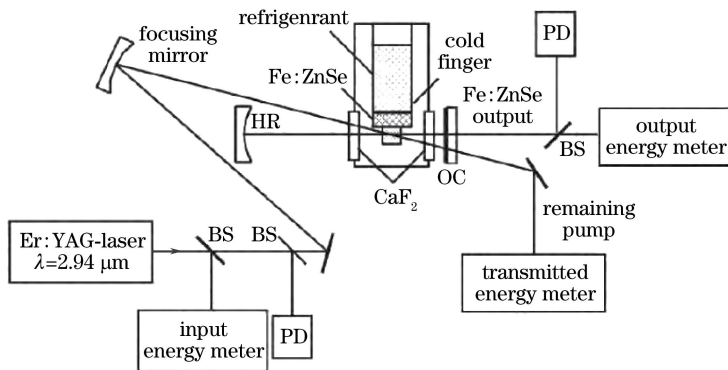


图 4 能量达到 2.1 J 的 Fe:ZnSe 激光器光路图

Fig. 4 Beam path diagram of 2.1 J Fe:ZnSe laser

2014 年, Firsov 等^[33]采用非链式 HF 激光器抽运 Fe:ZnSe, 室温条件下获得了 192 mJ 的输出能量, 斜效率达到 29%, 为常温条件下得到的斜效率最高的 Fe:ZnSe 激光器。这主要得益于其采用脉宽只有 130 ns 的 HF 激光器作抽运源, 实现了在常温下对 Fe:ZnSe 晶体的高效抽运。图 5(a)为实验采用的光路图, 图 5(b)为输出能量随吸收抽运能量的变化曲线。

2014 年, Evans 等^[34]采用 Er:YAG 发出的 2936 nm 光双端泵 Fe:ZnSe 晶体, 在液氮制冷的 77 K 低温下, 采用美国海军研究实验室制备的半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 对其进行调 Q 输出, 获得重复频率为 850 kHz, 脉宽为 64 ns, 平均功率为 515 mW 的中波激光输出, 输出激光中心波长为 4045 nm, 斜效率为 22%, 所用光路如图 6 所示。该报道为第一个采用直接抽运中波激光器的调 Q 高重复频率输出。

2015 年, Martyshkin 等^[35]以灯泵 Er:YAG 作为抽运源, 对 Fe:ZnSe 晶体进行抽运, 得到了波长为 3.8~4.3 μm 、可调谐的、平均功率达到 35 W 的中波激光输出, 为目前得到的平均功率最大的直接抽运中波激光

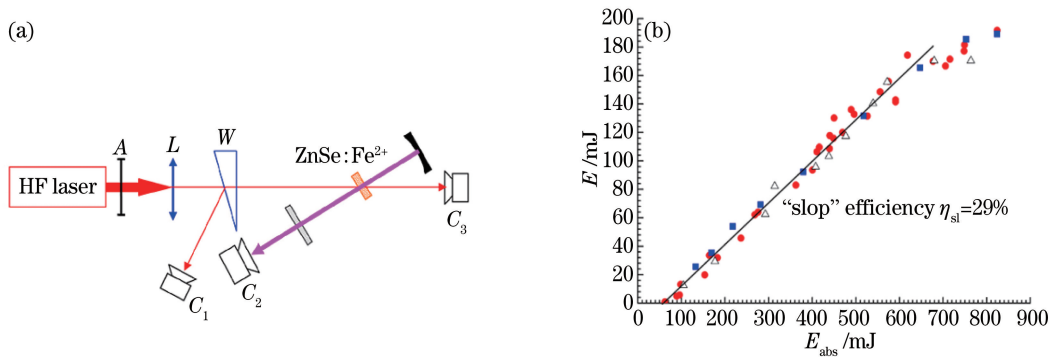


图 5 HF 激光器抽运 Fe:ZnSe 激光器。(a) HF 激光器抽运 Fe:ZnSe 激光实验光路图;(b) 中波激光输出能量和效率曲线

Fig. 5 Fe:ZnSe laser pumped by HF laser. (a) Beam path diagram of Fe:ZnSe laser pumped by HF laser;

(b) output energy and efficiency of mid-infrared laser

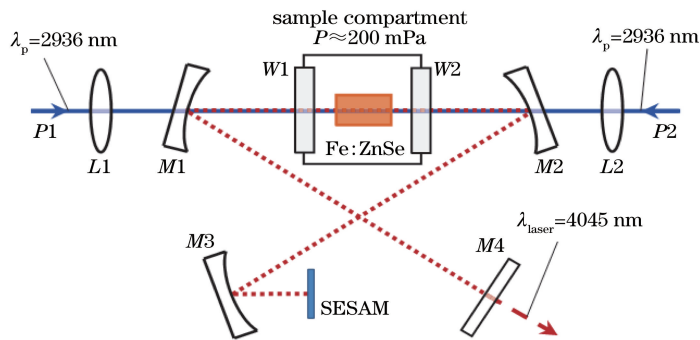


图 6 SESAM 调 Q 的 Fe:ZnSe 激光器光路图

Fig. 6 Beam path diagram of SESAM Q-switched Fe:ZnSe laser

输出。图 7(a)为光路图,图 7(b)为得到的中波脉冲波形。由图 7 可知,输出中波的脉宽在百微秒量级。

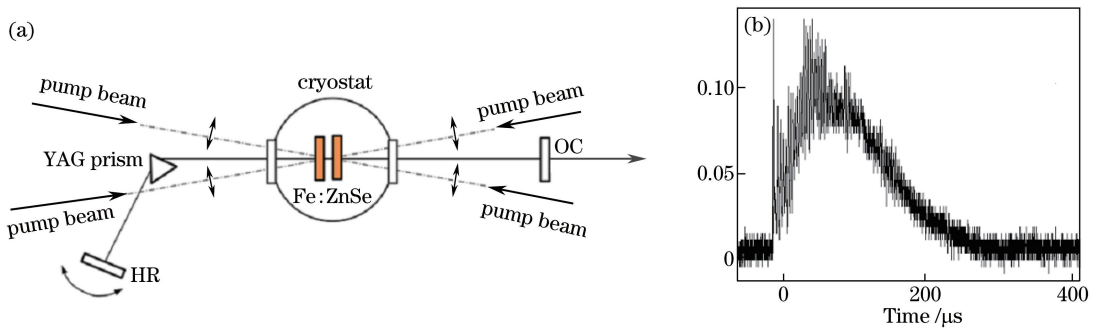


图 7 35 W 的 Fe:ZnSe 激光器。(a)实验光路图;(b)中波激光输出脉冲时间特性

Fig. 7 35 W Fe:ZnSe laser. (a) Beam path diagram; (b) pulse time character of mid-infrared laser

国内对直接抽运的中波激光技术研究起步较晚,目前从事激光器研究的单位较少,研究内容主要还停留在对相关晶体的研制和晶体光谱的研究。

2010 年,中国电子科技集团第十一研究所采用热扩散法生长的 Fe:ZnSe 晶体对直接抽运中波固体激光器进行了研究,采用 KTP OPO 产生的 $2.9 \mu\text{m}$ 激光作为抽运源,实现了中红外波段激光的激光。此外,哈尔滨工业大学姚宝权等^[37]采用尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的 Fe:ZnSe 晶体,在波长为 $2.89 \mu\text{m}$,脉冲重复频率为 1 kHz 的 ZGP 光参量振荡器抽运 Fe:ZnSe 晶体,当注入功率为 1.43 W 时,获得了 53 mW 的激光输出,脉宽为 25 ns ,斜率效率小于 4% ,输出的激光中心波长为 $4.45 \mu\text{m}$,波长范围为 $4.33 \sim 4.61 \mu\text{m}$ 。

中国科学院电子学研究所和上海光学精密机械研究所柯常军等^[38]采用热扩散法制备 Fe:ZnSe 晶体,室温下采用 $2.6 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 、脉宽为 180 ns 的非链式 HF 激光器作为抽运源,当抽运能量为 100 mJ 时,获得了中心波长为 $4.3 \mu\text{m}$,输出功率为 15 mJ ,近场光斑直径为 1 mm 的激光输出,光光转换效率为 15% 。

4 以 Ho:BYF 为代表的掺 Ho 的氟化物激光器

4.1 Ho:BYF 晶体基本特性

Ho:BYF 激光器的增益基质为氟化钇钡(BaY_2F_8),简称为 BYF,为单斜晶系,双轴晶体^[39]。Ho:BYF 的能级和光谱特性如图8所示。

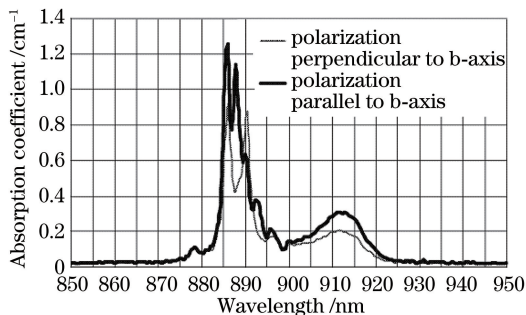


图 8 Ho:BYF 的能级和光谱特性。(a) Ho:BYF 的能级结构图;(b) Ho:BYF 在 890 nm 附近的光谱处的吸收情况

Fig. 8 Energy level and spectrum character of Ho:BYF. (a) Energy level of Ho:BYF;
(b) absorption coefficient of Ho:BYF near 890 nm

Ho:BYF 的能级如图8(a)所示。由图 8 可知, Ho:BYF 通过粒子从 5I_5 到 5I_6 能级跃迁发射出 $3.9\ \mu\text{m}$ 的激光。位于基态 5I_8 能级的粒子可以通过波长为 $889\ \text{nm}$ 的光直接抽运到中波激光上能级,也可以通过采用 $535\ \text{nm}$ 的光抽运粒子到 5S_2 能级,再热弛豫到激光上能级。由于 $889\ \text{nm}$ 的抽运效率更高,且与 Cr:LiSAF 激光器波长相匹配,所以目前主要采用 $890\ \text{nm}$ 的光对其进行抽运。由于抽运波长较小,量子效率也比较低。图 8(b)为 Ho:BYF 在 $890\ \text{nm}$ 附近光谱处,对两个不同偏振方向光的吸收情况。由图可以看出, Ho:BYF 在 $890\ \text{nm}$ 处有较强的吸收峰,且对于两个不同偏振方向的光吸收差别不大。

从图 8(a)还可以看出, Ho:BYF 在 $3.9\ \mu\text{m}$ 处激光上能级 5I_5 寿命只有 $52\ \mu\text{s}$,激光下能级 5I_6 寿命却达到了 $5.4\ \text{ms}$,上能级寿命远远小于下能级寿命,出现了严重的自终止现象^[40],使其非常难以实现激光离子数反转,不利于高重复频率激光输出。想要形成中波激光的高效振荡,就对其抽运源的抽运速率提出了较高的要求。另一方面,其上能级寿命在微秒量级,也很难对其进行有效的调 Q,难以完成中波激光的调 Q 输出。

目前,国内对 Ho:BYF 晶体制备的方法主要集中于提拉法和垂直布里奇曼法。四川大学^[41]采用液相合成方法合成了 Ho:BYF 多晶原料,使用提拉法生长了 Ho:BYF 激光晶体,之后,该课题组又采用垂直布里奇曼法成功制备了该晶体^[42]。长春理工大学^[43-44]共沉淀法合成 Ho:BYF 粉体,并采用提拉法生长了 Ho:BYF 激光晶体。

4.2 Ho:BYF 激光器的国内外研究现状

目前对 Ho:BYF 激光器的研究不多,具有代表性的是美国佛罗里达中心大学和美国空军研究实验室的研究。

2001 年,美国佛罗里达中心大学 Tabirian 等^[45]采用闪光灯抽运的 Cr:LiSAF 激光器输出的 $1\ \text{J}$ 、 $50\ \mu\text{s}$ 长脉冲的 $890\ \text{nm}$ 激光对 Ho:BYF 晶体进行抽运,获得了基横模 $3.9\ \mu\text{m}$ 中红外脉冲激光输出,输出能量为 $30\ \text{mJ}$,斜效率达到 14.5% ,光-光转换效率约为 9.5% 。

2004 年,美国空军研究实验室 Stutz 等^[46]采用 $889\ \text{nm}$ 的 Cr:LiSAF 激光器单端抽运 Ho:BYF 晶体,得到 $55\ \text{mJ}$ 的 $3.9\ \mu\text{m}$ 激光输出,光-光转换效率为 10% ;采用双端抽运时,获得 $90\ \text{mJ}$ 脉冲激光输出。

5 以掺 Dy:PbGa₂S₄ 为代表的 Dy 掺杂激光器

5.1 Dy:PGS 晶体基本特性

Dy^{3+} 的能级结构如图 11 所示^[47]。粒子从能级 $^6H_{11/2}$ 跃迁到 $^6H_{13/2}$ 辐射 $4.3\sim 4.7\ \mu\text{m}$ 的激光。位于基态能级 $^6H_{15/2}$ 的粒子可由 $1.7\ \mu\text{m}$ 波长的光直接抽运到激光上能级 $^6H_{11/2}$ 能级,也可以由 $1.3\ \mu\text{m}$ 的光先抽运至 $^6H_{9/2} + ^6H_{11/2}$ 能级,再通过热弛豫的方式到达中波激光上能级 $^6H_{11/2}$ 。

Dy:PGS 晶体的光谱吸收特性如图 12 所示^[48]。图中 $1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.7\ \mu\text{m}$ 处的吸收峰对应 Dy 能级

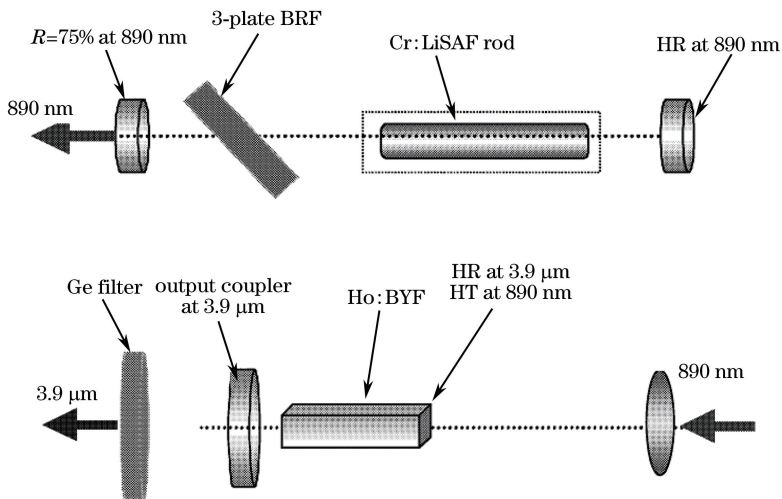


图 9 长脉冲 Li:SAF 激光器抽运 Ho:BYF

Fig. 9 Ho:BYF pumped by long pulse length Li:SAF laser

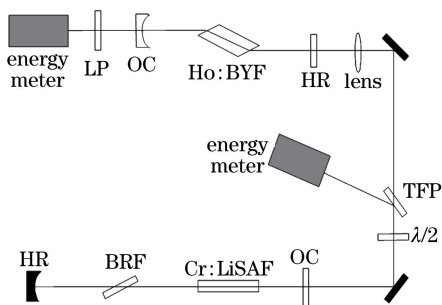


图 10 端泵 Ho:BYF 研究光路图

Fig. 10 Beam path diagram of end-pumped Ho:BYF laser

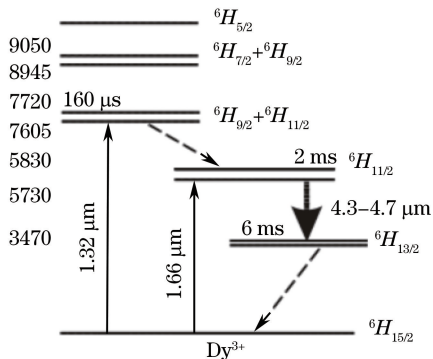


图 11 Dy:PGS 的能级结构

Fig. 11 Energy level of Dy:PGS

中 ${}^6H_{15/2}$ 到 ${}^6H_{11/2}$ 和 ${}^6H_{9/2} + {}^6H_{11/2}$ (另一个吸收峰 $1.1 \mu\text{m}$ 并不对应中波辐射能级)。由图 12 还可以看出, Dy:PGS 对两种不同偏振方向的抽运光吸收波长基本一致。

Dy:PGS 晶体的光谱发射截面如图 13 所示^[49]。

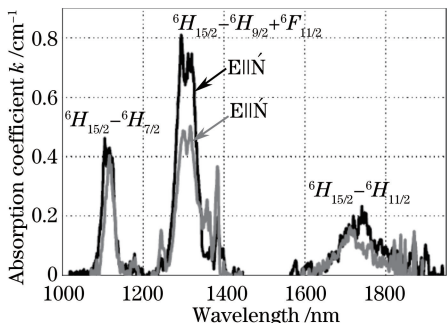


图 12 Dy:PGS 的光谱吸收特性

Fig. 12 Spectral absorption features of Dy:PGS

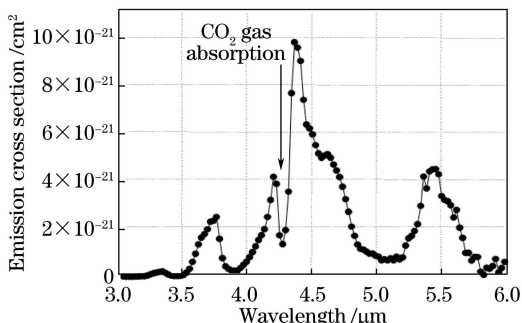


图 13 Dy:PGS 晶体的发射截面

Fig. 13 Emission cross section of Dy:PGS

表 2 Dy:PGS 晶体的中波辐射基本参数

Table 2 Basic parameters of Fe:ZnSe lasers radiation

Mid-infrared energy level	Emission wavelength / μm	Pumping wavelength / μm	Emission cross section / cm^2	Upper level lifetime /ms	Lower level lifetime /ms
${}^6H_{11/2} - {}^6H_{13/2}$	4.3-4.7	1.3/1.7	1×10^{-20}	2	6

Dy:PGS 晶体的中波辐射基本参数如表2所示。由表2可知,Dy:PGS在 $4.3\ \mu\text{m}$ 处有较大的发射截面 $1 \times 10^{-20}\ \text{cm}^2$,吸收峰值波长位于 $1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.7\ \mu\text{m}$,对应的抽运源相对成熟。一方面,目前这两个波长都有对应的LD产品与之匹配;另一方面,Nd:YAG激光器发射 $1.3\ \mu\text{m}$ 激光也很成熟。Dy:PGS的中波辐射上能级寿命为 $2\ \text{ms}$,下能级寿命为 $6\ \text{ms}$,也出现了自终止现象。目前,研究人员一直在开展两个方面的研究:一是通过共同掺杂,改变其能级特性;另一种是增加对其抽运速率。由于其上能级达到了 $2\ \text{ms}$,与下能级寿命并没有量级上的差别,使得Dy:PGS激光器更适合调Q输出。

根据Dy:PGS在 $1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.7\ \mu\text{m}$ 的两个吸收峰,目前对应的主要抽运源有:1) Nd:YAG波长为 $1.32\ \mu\text{m}$ 激光器;2) Er掺杂激光器,如Er:YLF和Er:YAP激光器,其中心波长为 $1.7\ \mu\text{m}$ 附近;3) 波长为 $1.7\ \mu\text{m}$ 的二极管直接抽运。随着 $1.7\ \mu\text{m}$ (包括 $1.3\ \mu\text{m}$)LD技术的成熟,采用LD直接抽运Dy:PGS的研究越来越热。

目前,国内外主要是采用垂直布里奇曼法制备Dy掺杂晶体。国外,美国南佛罗里达大学、汉普顿大学和俄罗斯光纤光学研究中心等开展了关于Dy掺杂的溴化和氟化物晶体的制备研究。布拉格捷克理工大学采用垂直布里奇曼法成功制备了Dy:PGS晶体^[50],并完成了相应了激光实验。国内,中国科学院上海光学精密机械研究所和福建物质结构研究所等也完成了Dy掺杂的的溴化物和氟化物晶体的制备,但国内对Dy掺杂的硫化物制备的研究还相对较少。

5.2 Dy:PGS激光器的国内外研究现状

国外对Dy:PGS激光器的研究中,布拉格捷克理工大学和俄罗斯的普通物理研究所共同组建的课题组对其开展了大量的研究,非常具有代表性。表3列出了国外对Dy:PGS激光器的研究情况。

表3 国外Dy:PGS激光器的研究情况

Table 3 Progress status of Dy:PGSlasers abroad

Year	Author	Pump source	Power /Energy	Efficiency
2005	Basiev ^[47]	Nd:YAG at $1.32\ \mu\text{m}$	$300\ \mu\text{J}$	1%
2009	Doroshenko ^[48]	Er:YAP at $1.66\ \mu\text{m}$	$57\ \mu\text{J}$	0.15%
		Nd:YAG at $1.32\ \mu\text{m}$	$42\ \mu\text{J}$	0.08%
2010	Sulc ^[49]	Nd:YAG at $1.32\ \mu\text{m}$	$1.8\ \text{mJ}$	4%
2010	Basiev ^[50]	Nd:YAG at $1.32\ \mu\text{m}$	$7.5\ \text{mJ}$	2%
2011	Jelinkova ^[51]	Er:YLF at $1.73\ \mu\text{m}$	$3.1\ \text{mJ}$	8%
2011	Jelinkova ^[52]	Er:YLF at $1.73\ \mu\text{m}$	$7\ \text{mJ}$	8%
2011	Sulc ^[53]	Er:YAG at $2.94\ \mu\text{m}$	$18.4\ \text{mW}$	3.8%
2013	Jelinkova ^[54]	LD at $1.7\ \mu\text{m}$	$67\ \text{mW}$	9.3%
2016	Jelinkova ^[55]	Nd:YAG at $1.32\ \mu\text{m}$	$35\ \text{mW}$	3%

2009年,Doroshenko等^[48]进行了大量的Dy:PGS光谱特性研究,并采用 $1.32\ \mu\text{m}$ 和 $1.66\ \mu\text{m}$ 对Dy:PGS进行抽运,得到了中心波长为 $4.3\ \mu\text{m}$ 的脉冲中波输出,最大输出能量为 $5\ \mu\text{J}$ 。图14为采用两种不同抽运波长的抽运效率验证情况。

2010年,Sulc等^[49]采用Nd:YAG激光器输出 $1.32\ \mu\text{m}$ 对Dy:PGS进行抽运,搭建了波长为 $4.3\ \mu\text{m}$,平均功率为 $1.8\ \text{mW}$ 的激光器,其斜率效率为4%,光路如图15所示。

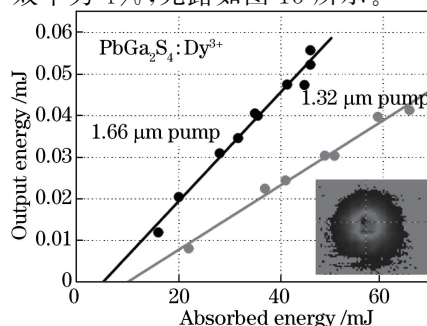


图14 对Dy:PGS两种不同抽运波长的效率验证

Fig. 14 Efficiency of Dy:PGS pumped by two different wavelengths

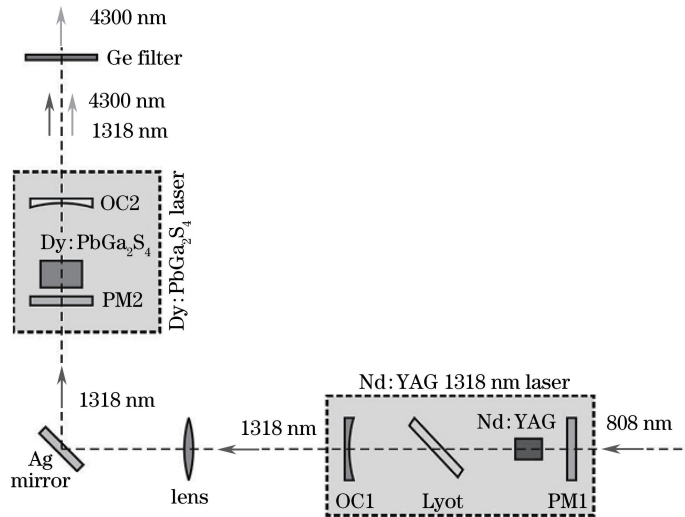


图 15 Nd:YAG 激光器对 Dy:PGS 进行抽运

Fig. 15 Dy:PGS laser pumped by Nd:YAG laser

2011年,在300 K的温度下,采用Er:YLF输出的 $1.73\ \mu\text{m}$ 的激光抽运Dy:PGS,在抽运能量为185 mJ下,获得了7 mJ的激光能量,斜率效率达到8%,输出中波激光波长为 $4.3\ \mu\text{m}$,脉宽为 $80\ \mu\text{s}$ 。图16给出了全反镜反射率不同情况下,Dy:PGS的输出特性^[52]。

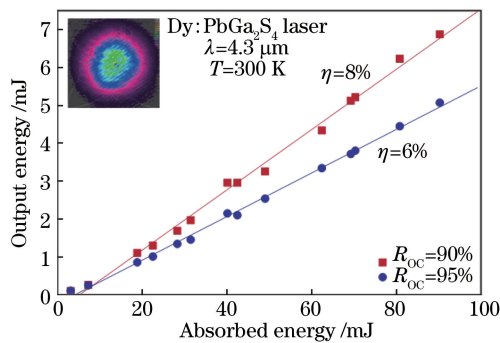


图 16 Er:YLF 激光器对 Dy:PGS 抽运的输出结果

Fig. 16 Output energy of Dy:PGS laser pumped by Er:YLF laser

2013年,该课题组采用输出波长为 $1.7\ \mu\text{m}$ 的激光二极管作为抽运源,采用端泵的形式,抽运一个长为 $12.2\ \text{mm}$,截面为 $2.5\ \text{mm}\times 5.7\ \text{mm}$ 的Dy:PGS,获得了 $67\ \text{mW}$ 的 $4.32\ \mu\text{m}$ 激光,斜率效率为9.3%。这是目前国际上唯一采用LD直接抽运激光晶体形成中波输出的报道,也是目前效率最高的Dy:PGS激光器。其采用的光路如图17(a)所示,得到的输出曲线如图17(b)所示^[54]。

6 结束语

纵观不同方法的直接抽运中波红外固体激光器的近年发展情况可以看出:1) Fe:ZnSe晶体由于发射截面大,很早就受到了研究者的重点关注和研究。该激光器是目前直接抽运中波激光器中最成熟,输出能量最大的技术途径。但其光路复杂,上能级寿命常温下只有纳秒量级,想要得到大能量输出,需要液氮制冷,因此难以实现小型化的需求。另外,其抽运源技术难度也很大;2) Ho:BYF激光器发展相对缓慢,主要原因在于其上能级寿命远远低于下能级寿命;3) Dy:PGS是一种性能优良的中波红外激光晶体,其在 $1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.7\ \mu\text{m}$ 处的吸收峰使得其非常适合采用LD直接抽运,且不需要采用液氮制冷,有利于小型化中波输出,目前研究发展的主要限制因素在于缺少大尺寸的Dy:PGS晶体,且其转化效率还相对较低。

以直接抽运中波红外激光器为主要代表的新型中波激光器以其体积小、效率高的优势一直深受国内外研究人员关注。但目前,3种直接抽运中波激光器的方法都面临着晶体材料制备困难,缺少高效抽运源,晶体材料存在中波辐射缺陷等问题。如何制得大尺寸的晶体材料,并通过掺杂的方法改善其中波辐射特性,以

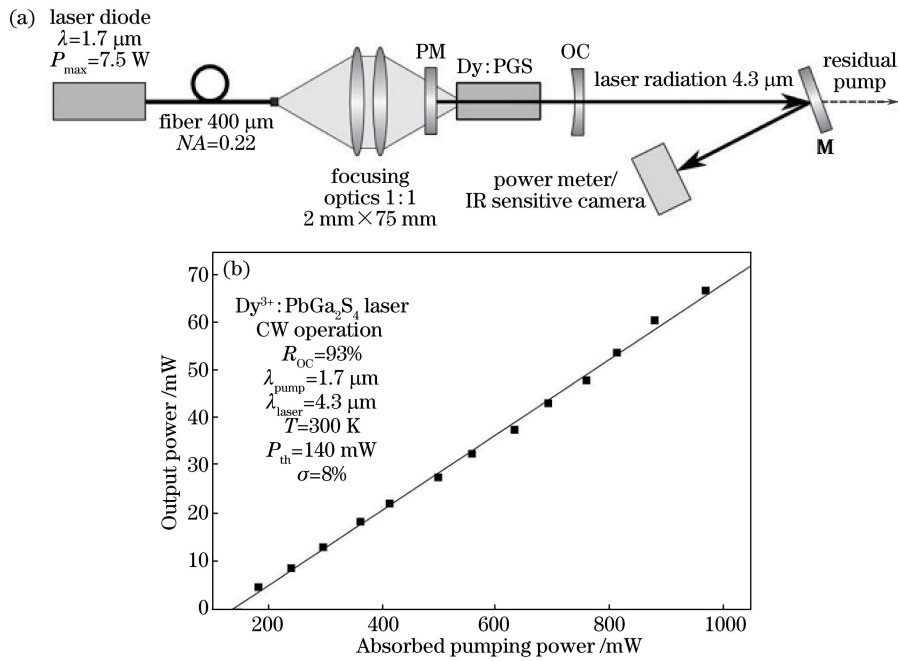


图 17 $1.7 \mu\text{m}$ LD 直接抽运 Dy:PGS。(a) $1.7 \mu\text{m}$ LD 直接抽运 Dy:PGS 光路图；(b) $1.7 \mu\text{m}$ LD 直接抽运 Dy:PGS 输出曲线
Fig. 17 Dy:PGS laser pumped by $1.7 \mu\text{m}$ LD. (a) Beam path diagram of Dy:PGS laser pumped by $1.7 \mu\text{m}$ LD;

(b) output power curves of Dy:PGS laser pumped by $1.7 \mu\text{m}$ LD

及对应抽运源的发展,尤其是对应波长的 LD 开发,将成为未来直接抽运中波激光器的主要研究方向。随着这些问题的解决,直接抽运的新方式的中波激光器也一定会得到更快更广的发展。

参 考 文 献

- [1] Dong Yijing, Ma Xiuhua, Li Shiguang, *et al.* 3-5 μm optical parametric oscillator technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 090004.
董怡静, 马秀华, 李世光, 等. 3~5 μm 光参量振荡技术进展研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 090004.
- [2] Peng Yapei, Jiang Benxue, Fan Jintai, *et al.* Review of in mid-infrared laser materials directly pumped by laser-diode [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 020001.
彭雅珮, 姜本学, 范金太, 等. 激光二极管直接抽运中红外固体激光材料综述[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 020001.
- [3] Fan Jinxiang. Status quo and trend of infrared system and technologies for America's ballistic missile defense system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 536-550.
范晋祥. 美国弹道导弹防御系统的红外系统与技术的发展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 536-550.
- [4] Liu Lei, Li Xiao, Liu Tong, *et al.* Progress of mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillation technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 060002.
刘磊, 李霄, 刘通, 等. 中红外连续波光参变振荡技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 060002.
- [5] Creeden D, Ketteridge P A, Budni P A, *et al.* Mid-infrared ZnGeP₂ parametric oscillator directly pumped by a pulsed 2 μm Tmdoped fiber laser[J]. Optics Letter, 2008, 33(4): 315-317.
- [6] Hemming A, Richards J, Bennetts S, *et al.* A high power hybrid mid-IR laser source[J]. Optics Communication, 2010, 283(20): 4041-4045.
- [7] Ji Encai, Wang Lu, Liu Qiang, *et al.* Review of mid-infrared Ho:BYF laser with direct pumping method[J]. China Science Paper, 2015, 10(5): 503-507.
吉恩才, 汪露, 柳强, 等. 直接泵浦中红外 Ho:YF 激光器综述[J]. 中国科技论文, 2015, 10(5): 503-507.
- [8] Li Y F, Yao B Q, Wang Z G. Tunable CW Tm, Ho:YLF laser at 2 μm [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(8): 470-471.
- [9] Wei Lei, Xiao Lei, Han Long, *et al.* ZGP optical parametric oscillator pumped by Tm:YAP laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702006.

- 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.
- [10] Peng Y F, Wei X, Wang W M, *et al.* High-power 3.8 μm tunable optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN [J]. Optics Communications, 2010, 283(20): 4032-4035.
- [11] Han Long, Yuan Ligang, Chen Guo, *et al.* 26 W mid-infrared solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0302004.
- 韩隆, 苑利钢, 陈国, 等. 26 W 中波红外固体激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302004.
- [12] Wang Ying, Luo Zhengqian, Xiong Fengfu, *et al.* Numerical optimization of 3-5 μm mid-infrared ZBLAN fiber Raman lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 061405.
- 王莹, 罗正钱, 熊凤福, 等. 数值优化 3~5 μm 中红外 ZBLAN 光纤拉曼激光器的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 061405.
- [13] Hao Zhijian, Lei Dajun, Zhao Chujun, *et al.* Generation of mid-infrared supercontinuum in two cascaded fibers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0105009.
- 郝志坚, 雷大军, 赵楚军, 等. 两级光纤中的中红外超连续谱产生[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0105009.
- [14] Ke Changjun, Kong Xinyi, Wang Ran, *et al.* Research progress on mid-IR Fe:ZnSe laser technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 136-142.
- 柯常军, 孔心怡, 王然, 等. 中红外 Fe:ZnSe 激光技术最新研究进展[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 136-142.
- [15] Pan Qikun. Progress of mid-infrared solid-state laser[J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 557-566.
- 潘其坤. 中红外固体激光器研究进展[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 557-566.
- [16] 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.
- [17] Voronov A A, Kozlovskii V I, Korostelin Y V, *et al.* A continuous-wave Fe²⁺:ZnSe laser [J]. Quantum Electron, 2008, 38(12): 1113-1116.
- [18] 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]. Optics Letters, 1999, 24(23): 1720-1722.
- [19] Akimov V A, Voronov A A, Kozlovskii V I, *et al.* Efficient IR Fe:ZnSe laser continuously tunable in the spectral range from 3.77 to 4.40 microns [J]. Quantum Electron, 2004, 34(10): 912-914.
- [20] Voronov A A, Kozlovskii V I, Korostelin Y V, *et al.* Laser parameters of a Fe:ZnSe laser crystal in the 85-255 K temperature range[J]. Quantum Electron, 2005, 35(9): 809-812.
- [21] Fedorov V V, Martyshkin D V, Mirov M, *et al.* High energy 4.1-4.6 μm Fe:ZnSe laser[J]. Lasers & Electro-Optics, 2012: 1-2.
- [22] Xia Shixing, Mo Xiaogang, Li Xingwang, *et al.* Preparation and optical absorption of Fe²⁺:ZnSe crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(10): I0002.
- 夏士兴, 莫小刚, 李兴旺, 等. Fe²⁺:ZnSe 晶体制备及光学吸收[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(10): I0002.
- [23] 王向永, 徐民, 张连翰, 等. 热扩散法制备 Fe²⁺:ZnSe 激光材料及其激光性能[C]. 北京: 全国晶体生长与材料学术会议. 2015.
- [24] Akimov V A, Voronov A A, Kozlovskii V I, *et al.* Efficient lasing in a Fe²⁺:ZnSe crystal at room temperature[J]. Quantum Electron, 2006, 36(4): 299-301.
- [25] Doroshenko M E, Jelinkov H, Koranda P, *et al.* Tunable mid-infrared laser properties of Cr²⁺:ZnMgSe and Fe²⁺:ZnSe crystal[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(1): 38-45.
- [26] Kozlovskiy V I, Akimov V A, Frolov M P, *et al.* Room temperature tunable mid-infrared lasers on transition-metal doped II-VI compound crystals grown from vapor phase[J]. Physica Status Solidi B, 2010, 247(6): 1553-1556.
- [27] Myoung N, Martyshkin D V, Fedorov V V, *et al.* Energy scaling of 4.3 μm room temperature Fe:ZnSe laser[J]. Optics Letters, 2011, 36(1): 94-96.
- [28] Doroshenko M E, Jelinkova H, Basiev T T, *et al.* Fe:ZnSe laser comparison of active materials grown by two different methods [C]. SPIE, 2011, 7912: 79122D.
- [29] Fedorov V V, Martyshkin D, Mirov M, *et al.* Fe-doped II-VI mid-infrared laser materials for the 3 to 8 μm region [C]. CLEO: Science and Innovations, 2013, 23(4): 7946-7956.
- [30] Evans J W, Berry P A, Schepler L L. 840 mW continuous wave Fe:ZnSe laser operating at 4140 nm [J]. Optics Letters, 2012, 37(23): 5021-5023.

- [31] Frolov M P, Korostelin Y V, Kozlovsky V I, *et al.* Study of a 2 J pulsed Fe:ZnSe 4 μm laser[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(12): 125001.
- [32] Velikanov S D, Danilov V P, Zakharov N G, *et al.* Fe²⁺:ZnSe laser pumped by a nonchain electric-discharge HF laser at room temperature[J]. Quantum Electron, 2014, 44 (2): 141-144.
- [33] Firsov K N, Gavrishchuk E M, Kazantsev S Yu, *et al.* Increasing the radiation energy of ZnSe: Fe²⁺ laser at room temperature[J]. Laser Physics Letter, 2014, 11(8): 085001.
- [34] 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.
- [35] Martyshkin D V, Fedorov V V, Mirov M, *et al.* High average power (35 W) pulsed Fe:ZnSe laser tunable over 3.8-4.2 μm [C]. Lasers and Electro-Optics, IEEE, 2015: 1-2.
- [36] Velikanov S D, Zakharov N G, Zotov. E. A, *et al.* Room-temperature 1.2 J Fe:ZnSe laser[J]. Quantum Electronics, 2016, 46(1): 11-12.
- [37] 姚宝权, 夏士兴, 于快快, 等. Fe²⁺:ZnSe 实现中红外波段激光输出[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0119001.
- [38] 柯常军, 王 然, 王向永, 等. 室温 Fe²⁺:ZnSe 激光器获得15 mJ 中红外激光输出[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0219004.
- [39] Jie C, Liu Q, Nie M M, *et al.* Spectroscopic properties of heavily Ho-doped barium yttrium fluoride crystals[J]. Chinese Physics B, 2015 (9): 299-306.
- [40] Schneider J, Carbonnier C, Unrau U. Characterization of a Ho³⁺-doped fluoride fibre laser with a 3.9 μm emission wavelength[J]. Applied Optics, 1997, 36(33): 8595-8600.
- [41] Luo Hui, Qi Lu, Zhu Shifu, *et al.* Study of growth and spectrum of Ho:BaY2F8 crystals[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2012, 41(6): 1502-1509.
罗 辉, 亓 鲁, 朱世富, 等. Ho:BaY2F8 晶体生长及其光谱研究[J]. 人工晶体学报, 2012, 41(6): 1502-1509.
- [42] Luo H, Guan Z, He Z, *et al.* Investigation on growth and defects of Ho³⁺:BaY2F8, crystals grown by Czochralski method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 648: 803-808.
- [43] 刘 旺, 董玮利, 王殿巍, 等. 共沉淀法合成 Ho:BaY2F8 粉体的研究[J]. 长春理工大学学报自然科学版, 2015, 38(5): 76-79.
- [44] Li C, Zeng F, Lin H, *et al.* Optical spectroscopy of low-phonon Ho³⁺ doped BaY2F8 single crystal[J]. Russian Journal of Physical Chemistry A, 2014, 88(12): 2260-2264.
- [45] Tabirian A M, Jenssen B P, Cassanho A. Efficient, room temperature mid-infrared laser at 3.9 μm in Ho: BaY2F8 [J]. Advanced Solid-State Lasers, 2001, 5: 5F4.
- [46] Stutz R, Miller H, Dinndorf K, *et al.* High pulse energy 3.9 μm lasers in Ho: BYF [C]. SPIE, 2004, 5332: 111-119.
- [47] Basiev T T, Doroshenko M E, Osiko V V, *et al.* Mid IR laser oscillations in new low phonon PbGa₂S₄: Dy³⁺ crystal [C]. Advanced Solid-State Photonics, 2005.
- [48] Doroshenko M E, Basiev T T, Osiko V V, *et al.* Oscillation properties of dysprosium-doped lead thiogallate crystal [J]. Optics Letters, 2009, 34(5): 590-592 .
- [49] Sulc J, Jelinková H, Doroshenko M E, *et al.* Dysprosium-doped PbGa₂S₄ laser excited by diode-pumped Nd:YAG laser [J]. Optics Letters, 2010, 35(18): 3051-3.
- [50] Basiev T T, Doroshenko M E, Osiko V V, *et al.* Laser properties of Na⁺ ions Co-doped PbGa₂S₄: Dy³⁺ crystal[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2010.
- [51] Jelinkova H, Doroshenko M E, Jelinek M, *et al.* Resonant pumping of dysprosium doped lead thiogallate by 1.7 μm Er:YLF laser radiation[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8: 349-353.
- [52] Jelinkova H. Dysprosium lead thiogallate crystal resonantly pumped by Er: YLF laser radiation[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2011.
- [53] Šulc J, Jelinkova H, Doroshenko M E, *et al.* High duty cycle and long pulse operation of Dy:PbGa₂S₄ laser excited by diode pumped Nd:YAG[C]. Advanced Solid-State Photonics. 2011.
- [54] Jelinková H, Doroshenko M E, Jelinek M, *et al.* Dysprosium-doped PbGa₂S₄ laser generating at 4.3 μm directly pumped by 1.7 μm laser diode[J]. Optics Letters, 2013, 38(16): 3040-3043.
- [55] Jelinkova H, Doroshenko M E, Osiko V V, *et al.* Dysprosium thiogallate laser: source of mid-infrared radiation at 2.4, 4.3, and 5.4 μm [J]. Applied Physics A, 2016, 122(8): 1-8.