

直接激励中红外固体激光器研究进展

朱灿林¹, 康民强^{1,2}, 邓颖¹, 李威威³, 周松^{1,2}, 李剑彬¹, 郑建刚¹, 朱启华¹

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088;

3. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段中红外激光在遥感、通讯、气体检测、医疗等领域有着广泛的应用前景。直接激励固体激光器具有原理简单、结构轻巧等优势, 是 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段中红外激光产生的重要手段。目前, 这类激光器按照增益介质分类可划分为基于 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Pr^{3+} 等稀土离子掺杂的固体激光器以及以 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 为代表的过渡金属离子掺杂的固体激光器。本文分别介绍这两类直接激励固体激光器近些年来的研究进展, 并对它们的技术路线以及发展前景进行总结。

关键词: 中红外激光; 直接激励; 稀土离子; 过渡金属离子

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2022.07.002

Research progress on directly pumping mid-infrared solid-state lasers

ZHU Can-lin¹, KANG Min-qiang^{1,2}, DENG Ying¹, LI Wei-wei³, ZHOU Song^{1,2},

LI Jian-bin¹, ZHENG Jian-gang¹, ZHU Qi-hua¹

(1. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The $3 \sim 5 \mu\text{m}$ mid-infrared laser has a wide application prospect in remote sensing, communication, gas detection, medical treatment and other fields. Having the advantages of uncomplicated theory and simple structure, directly pumping solid-state lasers are important methods to emit $3 \sim 5 \mu\text{m}$ mid-infrared laser. There are two kinds of directly pumping solid-state lasers, mainly distinguished by their gaining mediums, one is based on rare-earth ions (such as Er^{3+} , Ho^{3+} , Dy^{3+} , Pr^{3+}) doped solid-state lasers, and the other is transition-metal ions doped solid-state lasers. The recent progresses of directly pumping solid-state lasers are introduced and their technical principles and future developments are summarized in this paper.

Keywords: mid-infrared laser; directly pumping; rare-earth ion; transition metal ion

1 引言

波长 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的中红外激光具有三大特性: 位于大气透过率最高的传输窗口, $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 对此波段具有强吸收, 热辐射的能量主要集中在该区

域^[1]。凭借这些特性, $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段中红外激光在大气遥感、空间光通讯、气体检测、医疗手术等领域都有着广泛的应用前景, 是激光领域中备受关注的一项技术^[2-3]。

中红外激光的产生方式包括:①半导体激光器,包括量子阱激光器与量子级联激光器等;②气体激光器,包括卤化氢气体激光器和CO气体激光器等;③自由电子激光器;④随机激光器;⑤直接激励固体激光器;⑥基于非线性技术的中红外激光器^[1]。其中,直接激励型固体激光器原理相对简单,结构轻巧,在高功率、高效率的激光输出方面具有一定的优势,一直是国内外学者研究的热点。

按照增益介质的种类划分,直接激励固体激光器又可以分为两类:一种是稀土离子掺杂的固体激光器;另一种是过渡金属离子掺杂的固体激光器^[4]。本文将介绍这两类直接激励固体激光器近年来的研究进展,并对它们的技术路线以及发展前景进行总结与展望。

2 稀土离子掺杂的固体激光器

稀土离子能级结构丰富,同一种离子通常有多个发射峰^[1]。稀土离子可以掺杂在晶体、陶瓷以及光纤等多种基质中,其优越的光学性能使其成为了激光领域中的一种重要激活离子。可以直接发射产生3~5 μm 波段中红外激光的稀土离子包括 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Pr^{3+} ,下文将分别介绍这几种掺杂离子的特性以及对应激光技术的发展现状。

2.1 掺Er固体激光器

Er^{3+} 具有非常丰富的能级结构,能产生多种辐射波长。其中能产生3.5 μm 激光的能级跃迁为 $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$,由于其激光上能级位置远高于基态,采用直接泵浦的方式,量子亏损较大,量子效率较低。同时由于中间能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 的能级寿命较长,下能级的粒子吸收声子在此处累计,导致基态漂白,从而使直接泵浦的效率较低。直至2013年,Ori Henderson-Sapir首次采用了新的双波长泵浦方式,激光输出性能才有了突破性进展。

双波长泵浦如图1所示,即先采用985 nm的泵浦源 P_1 将 Er^{3+} 泵浦至 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级,由于该能级寿命较长,粒子容易在此积累。然后再利用1973 nm的泵浦源 P_2 将这些粒子泵浦至上能级 $^4\text{F}_{9/2}$,这些粒子产生3.5 μm 的激光(图中L过程)再通过多光子衰减(图中MP过程)回到 $^4\text{I}_{11/2}$,双波长泵浦的方式相对于直接泵浦(图中P过程)而言能有效地提升泵浦效率,Ori Henderson-Sapir采用这种方式在室温下获得了40 mW的输出,斜效率为37%^[3]。第二年,他在室温下采用Er:ZBLAN光纤获得了260 mW的连续激光输出,光光转换效率为16%,斜效率可达52%,波长3.604 μm ,为当时最长波长^[4]。2017

年,Frédéric Maes采用双波长泵浦的方式,并结合布拉格光栅,在1 mol % Er:ZrF₄玻璃光纤(5 m)实现了波长3.55 μm 、输出功率5.6 W的连续激光输出,光光效率26.4%^[5]。2018年,ZhiPeng Qin等采用双波长泵浦方式,同时利用一个含有黑磷的饱和吸收体实现被动调Q和锁模,在1 mol % Er^{3+} :ZBLAN光纤中产生了3.5 μm 的脉冲激光,其平均功率达到了120 mW,单个脉冲能量为1.83 μJ ,脉宽2.05 μs ,重复频率66.33 kHz^[6]。

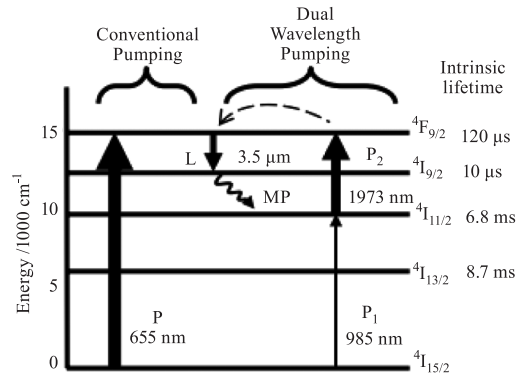


图1 双波长泵浦示意图^[6]

Fig. 1 Diagram of dual-wavelength pumping^[6]

2.2 掺Ho固体激光器

Ho^{3+} 也是稀土元素的一种,它的简化能级如图2所示, Ho^{3+} 中3.9 μm 的辐射发生在 $^5\text{I}_5 \rightarrow ^5\text{I}_6$ 之间,目前通常有两种泵浦方式来产生3.9 μm 的激光,一种是利用890 nm的泵浦源将基态 $^5\text{I}_8$ 上的粒子激发至 $^5\text{I}_5$,直接产生3.9 μm 的辐射输出;另一种是利用530~550 μm 波段的泵浦源将基态粒子激发至 $^5\text{S}_2$ 能级,采用级联激光的方式,同时输出1.4 μm 与3.9 μm 的激光。

由于缺乏高功率泵浦源、吸收截面低(890 nm处吸收截面 $4.3 \times 10^{-22} \text{cm}^2$)、强的热猝灭以及激光自终止效应等,Ho离子3.9 μm 激光研究进展缓慢,目前的研究成果在功率、效率等方面均不理想。1997年,德国的Schneider等在液氮温度下首次实现了Ho-3.9 μm 激光输(对应大气窗口传输损耗极小波段),但输出功率仅11 mW^[7]。近些年, InF_3 玻璃这一材料因其透过波长长(~5 μm)、声子能量低(509cm^{-1}),逐渐成为这一波段的主要基质材料。2015年,德国的Berrou采用889 nm激光泵浦10% Ho: InF_3 玻璃,首次实现了3.9 μm 的脉冲激光输出^[8]。2018年,加拿大的Maes等采用888 nm LD直接泵浦10% Ho: InF_3 光(23 cm),室温下首次实现了3.92 μm 的连续激光输出,输出功率200 mW,这也是目前实现的最高值。此外,光-光

效率达 10.2 %, 斜效率 24 %, 与理论的量子效率持平 (23 %) [9]。

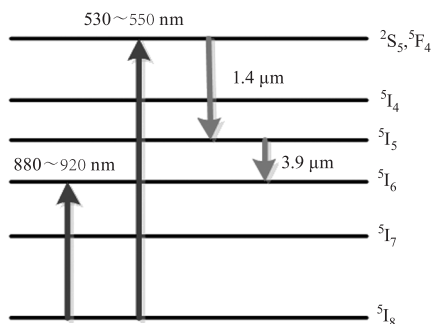


图2 Ho^{3+} 简化能级示意图

Fig. 2 Simplified energy level diagram for the Ho^{3+} ions

2.3 掺 Dy 固体激光器

Dy 同样具有非常丰富的能级结构, 其中 ${}^6\text{H}_{13/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$ 跃迁能覆盖 3.0 ~ 3.3 μm 波段的发光是中红外激光产生的一项重要手段。图 3 为 Dy^{3+} 中 ${}^6\text{H}_{15/2} \leftrightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ 对应的吸收谱和发射谱。该过程为基态与第一激发态之间的跃迁, 吸收与发射谱高度重叠 [10]。图 4 为 Dy^{3+} 的简化能级结构示意图。从图 4 中可以看到 1.1 μm 、1.3 μm 、1.7 μm 以及 2.8 μm 等多个波长的激光均可作为泵浦源。

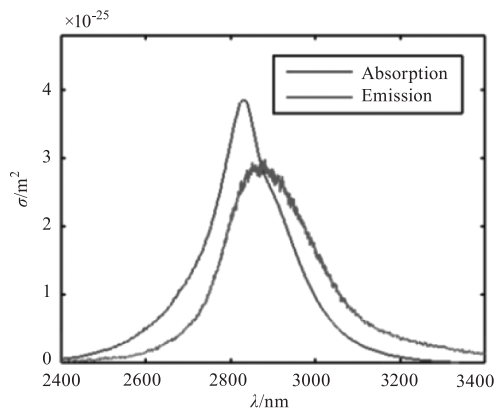


图3 Dy^{3+} 中 ${}^6\text{H}_{15/2} \leftrightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ 对应的吸收谱和发射谱 [10]

Fig. 3 Absorption and emission cross sections of the ${}^6\text{H}_{15/2} \leftrightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ transition of the Dy^{3+} ion [10]

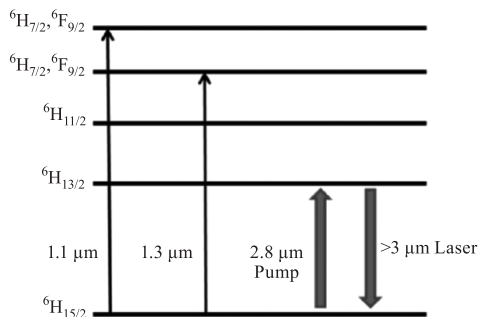


图4 Dy^{3+} 的简化能级结构示意图 [10]

Fig. 4 Simplified energy level diagram for the Dy^{3+} ion [10]

2016 年, Matthew R. 等采用 2.79 μm 的 Er 光纤激光器泵浦 0.2 % Dy : ZBLAN 光纤 (0.92 m), 获得了 3.04 μm 连续激光输出, 输出功率 85 mW, 斜效率 51 %; 当光纤长度增加到 1.4 m 时, 输出波长为 3.26 μm , 输出功率 120 mW, 斜效率 32 %, 结果表明自吸收作用会对激光性能产生明显影响 [10]。2018 年, Matthew R. 等利用 1.7 μm 拉曼激光泵浦, 在 0.2 % Dy : ZBLAN 光纤 (0.6 m) 中实现了 2.8 ~ 3.4 μm (573 nm) 的调谐激光输出。优化光纤长度后 (0.26 m) 获得最大输出 170 mW, 斜效率 21 %, 输出波长 2.95 μm , 同样存在激发态吸收问题 [11]。同年, R. I. Woodward 等采用 2.79 μm 的 Er 光纤激光器作为泵浦源结合飞秒直写布拉格光栅, 在 0.2 % Dy : ZBLAN 光纤 (1.2 m) 实现了 1.06 W 激光输出, 斜效率达 77 %, 输出波长 3.15 μm 。采用带内泵浦的方式可以避免复杂的上转换过程, 但光纤内部的热机械应力限制了功率的进一步提高 [12]。2019 年, Vincent Fortin 等采用 2.79 μm 的 Er 光纤激光作为泵浦, 在 0.2 % Dy : ZBLAN (5.5 m) 中获得了连续激光输出, 输出功率高达 10.1 W, 斜效率 58 %, 输出波长 3.24 μm , 且激光输出未饱和 [13]。在脉冲输出方面也有相关研究, 2019 年, Yuchen Wang 等用 2.82 μm 的 Er 光纤激光器泵浦, 基于被动锁模的方式在掺 Dy 的光纤中实现了脉冲宽度 828 fs, 平均输出功率 204 mW 的 3.1 μm 脉冲激光输出, 重复频率可达 42 ~ 60 MHz [14]。

另外, Dy 离子 ${}^6\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ 能级跃迁的中心波长位于 4.36 μm , 也能产生中红外激光。波长深入到 4 μm 之后, 对基质的要求更高, 氟化物玻璃因其声子能量和透过范围已不再适用, 目前研究重点在 Dy 掺杂的硫系化合物玻璃 ($\sim 300 \text{ cm}^{-1}$)。由于同样存在激光自终止问题, 目前在光纤中尚无激光的报道。这一波段的研究主要集中在 Dy : PbGa₂S₄ ($\sim 200 \text{ cm}^{-1}$) 体系, 单输出功率仅限于数十毫瓦量级, 如表 1 所示。

Dy^{3+} 的上能级 ${}^6\text{H}_{11/2}$ 寿命 (1 μs) 远小于下能级 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 寿命 (500 μs), 严重的自终止效应限制了发光功率的提升。2020 年, 中物院激光聚变研究中心的瞿崇兵、康民强等提出了利用双波长泵浦来去除自终止效应, 产生高功率输出的方法。作者采用 1.7 μm 和 2.3 μm 的两束泵浦光对 Dy : InF₃ 光纤进行抽运, 原理如图 5 所示。1.7 μm 泵浦光将 Dy^{3+} 从基态抽运至上能级 ${}^6\text{H}_{11/2}$, 同时利用 2.3 μm 的泵浦光将下能级 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 上的粒子抽调去更高的能级, 从而实现 ${}^6\text{H}_{11/2}$

和 ${}^6\text{H}^{13/2}$ 能级之间的反转布局,有效地克服了自终止效应。经建模分析,当两个泵浦源的功率分别为

17.5 mW和20 W时,输出功率可达到5.5 W,是产生高功率4.3 μm 激光的一种可行方案^[21]。

表1 Dy^{3+} 掺杂的4.3 μm 激光技术研究进展

Tab. 1 State of Dy^{3+} - doped 4.3 μm lasers

Year	Author	Pump source/ μm	Crystal	Wavelength/ μm	Parameter of Output
1991	Norman P. Barnes ^[15]	Er : YLF 晶体	Dy : YLiF ₄	4.34	200 ~ 125 ns; 10 ~ 20 mJ; 5.2 %
1999	M. C. Nostrand ^[16]	Nd : YAG 晶体	Dy, Na : CaGa ₂ S ₄	4.3 ~ 4.4	75 μs ; 0.1 mJ; 1.6 %
2010	Jan Šulc ^[17]	LD	0.7 % Dy : PbGa ₂ S ₄	4.3	90 μJ ; 1.8 mW; 3 %
2011		Er : YLF 晶体	6 % Dy : PbGa ₂ S ₄	4.3	7 mJ; 8 %
2013	H Jelfinková ^[18~20]	LD	Dy : PbGa ₂ S ₄	4.32	67 mW; 8 %
2016		LD	Dy : PbGa ₂ S ₄	4.3	9.5 mW; 1 %

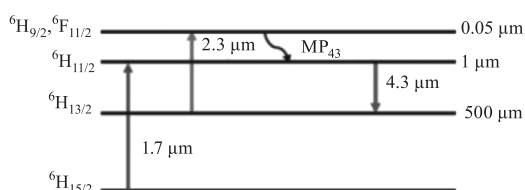


图5 双波长泵浦产生4.3 μm 激光示意图^[21]

Fig. 5 Diagram of dual-wavelength pumped 4.3 μm lasers^[21]

2.4 掺Pr固体激光器

Pr离子能级结构非常复杂,具有各种能级宽度以及多种亚稳能级,产生的能级跃迁覆盖了紫外至中红外波段,如图6所示。

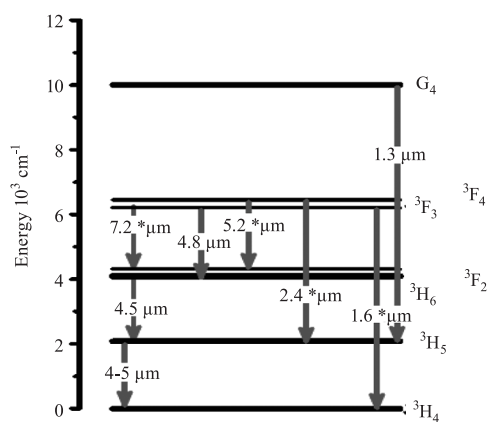


图6 Pr^{3+} 简化能级结构示意图^[22]

Fig. 6 Simplified energy level diagram for the Pr^{3+} ion^[22]

其中,处于中红外波段的跃迁包括 ${}^3\text{F}_3 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ (4.8 μm), ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$ (4.5 μm), ${}^3\text{H}_5 \rightarrow {}^3\text{H}_4$ (4 ~ 5 μm),然而,激光上下能级寿命处于同一数量级,难以形成布居反转^[22]。同时由于上下能级之间间距狭窄,不可避免的多光子弛豫会严重影响Pr离子的发光效率^[28]。早期用于Pr掺杂的晶体材料通常为声子能量低的卤化物或者硫化物等非氧化物玻璃^[29],但这些材料理化性质不稳定,容易出现潮解。这些问题制约了Pr离子掺杂激光器的发展,目前的

研究主要集中在晶体材料的光谱及其潜在激光性能等方面,出光的报道较少。

2009年,A. Ferrier等人制备了一种 Pr^{3+} 掺杂的不易潮解、非对称的单晶体 Ti_3PbBr_5 ,这种晶体在4.7 μm 附近有一个宽的发射带宽以及长的上能级寿命,作者认为这种材料未来将是一种优秀的中红外激光材料^[23]。2012年,Ł. Sójka等人建立了数学模型来研究 Pr^{3+} 掺杂的硫化物光纤,结果表明当光纤损耗能降到1 dB/m时,可以利用2.04 μm 的激光泵浦产生4.89 μm 的输出,效率约为8 % ~ 16 %^[24]。2019年,Hua Chen等人利用Pr掺杂的光纤实现了4.89 μm 的激光输出,其中泵浦源波长2.04 μm ,增益介质为掺Pr的GAGS ($\text{Ge}_{10}\text{As}_{24}\text{Ga}_4\text{Se}_{62}$) 光纤,输出功率达到了1.28 W,效率为25 %^[25]。

3 过渡金属掺杂的固体激光器

Tm^{2+} (二价过渡金属离子)掺杂的II ~ VI族硫化物晶体是目前中红外激光增益介质的重要研究对象和发展方向。这种晶体材料具有以下优点:①Tm离子能级分裂带隙小,其跃迁谱线能延伸至中红外波段;②激发态吸收过程少;③强的电声子耦合,使得 TM^{2+} 谱带展宽,适于宽带调谐和飞秒激光;④无辐射跃迁过程少,室温下有较高的量子荧光效率;⑤化学性质稳定(几乎不含其他价态),非中心对称的四面体中心格位使吸收/发射截面大(10^{-18} cm^2 量级);⑥高质量单晶制备较困难,但多晶可采用CVD大量低成本制备,且光学性能与单晶几乎无差别^[26]。这类材料主要包括Cr(或Fe)掺杂的二元(ZnSe 、 ZnS 、 CdSe 、 CdS 、 ZnTe)以及三元(CdMnTe 、 CdZnTe 、 ZnSSe)硫系晶体,其中又以Fe : ZnSe最受关注。

Fe : ZnSe晶体中中红外波段激光的产生基于 $3d^6$ 电子 ${}^5\text{T}_2$ (第一激发态) $\rightarrow {}^5\text{E}$ (基态)能级跃迁过程,具有

以下优点:①发射光谱为 3.1~5.1 μm ,可调谐带宽宽;②吸收/发射截面大($0.97 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/1.4 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$);③室温下荧光效率高(理论上可达 100%)。但 Fe^{2+} 上能级寿命低(77 K 下寿命为 57 μs ,常温下寿命降至 0.3 μs),因声子能量高引起的无辐射跃迁效应明显,因此只能采用窄脉宽光源抽运,且难以实现室温大能量输出。

1999 年,美国 Adams 等在低温环境下首次实现了 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ (2 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm)晶体的激光输出。实验采用 Er:YAG (2.698 μm , 48 μs , 100 Hz, 150 μJ)作为泵浦源,激光波长随着温度升高发生红移,从 15 K/3.98 μm 到 180 K/4.54 μm ,在 130 K 时获得最高 12 μJ 、48 μs 的脉冲激光,斜效率最高 8.2%^[27]。2011 年, NoSung Myoung 等利用增益可调的 Er:Cr:YSGG 激光器(2.8 μm)作为泵浦源,在 236 K 和 300 K 的温度下分别实现了 4.3 μm /4.37 μm 的输出,能量为 4.7 mJ/3.6 mJ,效率分别为 19%/16%^[28]。2014 年, S. D. Velikanov 等利用 HF 激光器作为泵浦源实现了 125 ns 脉宽, 30.6 mJ 的脉冲输出, 波长为 4.6~4.7 μm ^[29]。2017 年, Velikanov 等又将输出脉冲能量和平均功率提升至 1.67 J 和 20 W。HF 激光器输出的波长范围 2.6~3.1 μm , 脉宽 100~150 ns, 不仅与室温下 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 的吸收特性完美匹配,而且可以高重频运行,是一种优秀的泵浦源,但其体积庞大,价格昂贵,

限制了它的发展^[30]。2020 年, A. V. Pushkin 等首次制成了飞秒锁模 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 激光器,他用石墨烯作为饱和吸收体来实现被动锁模。激光器结构如图 7 所示,其中泵浦源为 Er:ZBLAN 激光器(2.8 μm , 7 W),输出波长 4.4 μm ,重复频率 100 MHz,脉冲宽度为 732 fs,输出功率可达 415 mW^[31]。

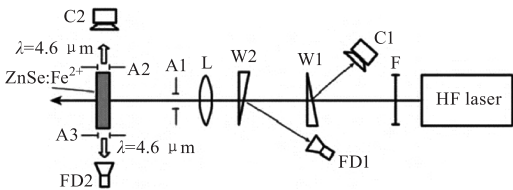


图 7 30.6 mJ 输出的 HF 激光泵浦的 Fe:ZnSe 激光器^[29]
Fig. 7 30.6 mJ, Fe:ZnSe laser pumped by HF laser^[29]

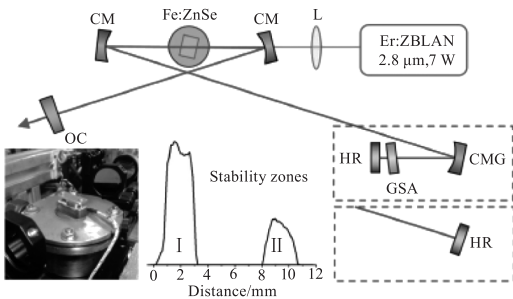


图 8 首台飞秒锁模 Fe:ZnSe 激光器^[31]
Fig. 8 Femtosecond graphene mode-locked Fe:ZnSe Laser^[31]

表 2 列出了目前 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 激光器的主要研究进展。

表 2 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 激光器的主要研究进展
Tab. 2 Research progress of $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ laser

Year	Author	Pump source	Temperature	Wavelength/ μm	Parameter of Output	
1999	Adams ^[27]	Er : YAG	2. 698 μm ,48 μs ,100 Hz, 150 μJ	室温	15 K/3. 98 ~ 180 K/4. 54	130 K; 12 μJ ; 48 μs ; 8. 2%
2008	Voronov ^[32]	Tm 光纤泵浦 Cr3 + ;CdSe	2. 97 μm ,0. 6 W	液氮冷却	4. 04 ~ 4. 08	160 mW;56%
2011	NoSung Myoung ^[28]	Er : Cr : YSGG	2. 8 μm	236 K/300 K	4. 3/4. 37	4. 7 mJ/3. 6 mJ;19%/16%
2012	Berry P ^[33]	Er : YAG	2. 94 μm ,3 W	77 K	4. 14	840 mW;39%
2013	Frolov ^[34]	Er : YAG	2. 94 μm ,750 μs , 8 J	85 K/245 K/285 K	4. 1	2. 1 J;51%/1. 3 J,29%/42 mJ
2013	Fedorov ^[35]	Cr;ZnS2/Er 光纤串联	5. 5 W	80 ~ 180 K	3. 74 ~ 4. 95	1. 5 W
2014	Evans ^[36]	Er : YAG	2. 94 μm ,3 W	77 K	3. 84 ~ 4. 34	850 kHz;64 ns;600 nJ;22%
2014	S. D. Velikanov ^[29]	HF 激光器	2. 6 ~ 3. 1 μm	室温	4. 6 ~ 4. 7	30 mJ;125 ns
2015	Martyshkin ^[37]	Er : YAG	2. 94 μm ,100 Hz,150 μs , 1. 2 J	77 K	3. 8 ~ 4. 2	0. 35 J;100 Hz
2017	S. D. Velikanov ^[30]	HF 激光器	2. 6 ~ 3. 1 μm	室温	4 ~ 5	1. 6 J;20 W
2017	Martyshkin ^[38]	Cr;ZnSe	2. 9 μm ,23 W,线宽 30 nm	77 K	4. 159. 2 W;41. 2%	
2020	A. V. Pushkin ^[31]	Er : ZBLAN	2. 8 μm ,7 W	170 K	4. 4	415 mW;732 fs;100 MHz

4 总结与展望

直接激励固体激光器中增益介质可分为稀土离子掺杂的基质材料和过渡金属离子掺杂的基质材料。

稀土离子能级结构丰富,同种离子具有多个发

射峰,能实现多波长激光输出。目前在 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Dy^{3+} 中已实现了不同波段的输出, Pr^{3+} 中出光的报道仍较少。稀土离子中激光上能级寿命通常远小于下能级,存在严重的自终止效应,限制了其实现高功率、高效率输出,目前可以通过共掺杂、双波长泵浦

等方法来改善这一问题,如在 Dy^{3+} 中采用双波长泵浦可以有效去除自终止效应,是后续产生高功率中红外输出的一种可靠的途径。另外基质材料损伤阈值低、热性能差、稳定性不好也是制约功率提升的问题所在,制备合适的基质材料也是目前急需解决的关键问题。

过渡金属离子掺杂的基质材料以 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 为主要代表,具有可调谐带宽宽、荧光效率高、低无辐射跃迁等优点,可用于可调谐输出和超快输出,目前已实现了单脉冲能量和平均功率 1.6 J 和 20 W 的输出,而在超短脉冲方面,也已实现了飞秒级的输出。但缺乏合适泵浦源,室温下上能级寿命大幅降低,难以实现大能量输出等一系列问题,也在制约着其进一步发展。

直接激励固体激光器原理简单,结构简洁轻巧,虽然目前还存在一些问题,但我们有理由相信,随着基质材料、高效泵浦源、激发方式等的不断发展,直接激励固体激光器的潜力会被进一步发掘,推动中红外激光器朝更高功率,更高效率发展。

参考文献:

- [1] Shen Deyuan, Fan Dianyuan. Mid-infrared lasers [M]. National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
沈德元, 范滇元. 中红外激光器 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [2] Pan Qikun. Progress of mid-infrared solid-state laser [J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 557–566. (in Chinese)
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.
- [3] Henderson-Sapir O, D J Ottaway, J Munch. Development of efficient mid-infrared 3.5 μm fiber laser [J]. Optical Society of America, 2013, 48(6): 6.
- [4] Ori Henderson-Sapir, Jesper Munch, David J. Ottaway. Mid-infrared fiber lasers at and beyond 3.5 μm using dual-wavelength pumping [J]. Optics Letters, 2014, 39(3): 493–496.
- [5] Frédéric Maes, Vincent Fortin, Martin Bernier, et al. 5.6 W monolithic fiber laser at 3.55 μm [J]. Optics Letters, 2017, 42(11): 2054–2057.
- [6] QIN Z, Hai T, Guoqiang X, et al. Black phosphorus Q-switched and mode-locked mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser at 3.5 μm wavelength [J]. Optics Express, 2018, 26(7): 8224–8231.
- [7] Schneide, J, C. Carbonnier, U. B. Unrau. Characterization of a Ho^{3+} -doped fluoride fiber laser with a 3.9 μm emission wavelength [J]. Applied Optics, 1997, 36(33): 8595–8600.
- [8] Antoine Berrou, et al. Mid-infrared lasing from Ho^{3+} in bulk InF_3 glass [J]. Optics Letters, 2015, 40(8): 1699–1701.
- [9] Frédéric Maes, et al. Room-temperature fiber laser at 3.92 μm [J]. Optica, 2018, 5(7): 761–764.
- [10] Majewski M R, S D Jackson. Highly efficient mid-infrared dysprosium fiber laser [J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2173–2176.
- [11] Majewski M R, S D Jackson. Dysprosium-doped ZBLAN fiber laser tunable from 2.8 μm to 3.4 μm , pumped at 1.7 μm [J]. Optics Letters, 2018, 43(5): 971–974.
- [12] R I Woodward, M R Majewski, et al. Watt-level dysprosium fiber laser at 3.15 μm with 73% slope efficiency [J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1471–1474.
- [13] Vincent Fortin, et al. 10 W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24 μm [J]. Optics Letters, 2019, 44(3): 491–494.
- [14] Yuchen Wang, et al. Ultrafast Dy^{3+} : fluoride fiber laser beyond 3 μm [J]. Optics Letters, 2019, 44(2): 395–398.
- [15] Barnes N P, R Allen. Room temperature Dy: YLF laser operation at 4.34 μm [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(2): 277–282.
- [16] Nostrand M C, et al. Room-temperature laser action at 4.3–4.4 μm in $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}$ [J]. Optics Letters, 1999, 24(17): 1215–1217.
- [17] Jan Šulc, et al. Dysprosium-doped PbGa_2S_4 laser excited by diode-pumped Nd: YAG laser [J]. Optics Letters, 2010, 35(18): 3051–3053.
- [18] H Jelínková, et al. Resonant pumping of dysprosium doped lead thiogallate by 1.7 μm Er: YLF laser radiation [J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(5): 349–353.
- [19] Helena Jelínková, et al. Dysprosium-doped PbGa_2S_4 laser generating at 4.3 μm directly pumped by 1.7 μm laser diode [J]. Optics Letters, 2013, 38(16): 3040–3043.
- [20] H Jelinkova, et al. Dysprosium thiogallate laser: source of mid-infrared radiation at 2.4, 4.3, and 5.4 μm [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2016, 122(738): 1–8.
- [21] Qu Chongbing, et al. Theoretical study of 4.3 μm dual-wavelength pumped Dy: InF_3 high-energy mid-infrared fi-

- ber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 1–8. (in Chinese)
- 瞿崇兵, 等. 双波长泵浦 4.3 μm Dy:InF₃ 高能中红外光纤激光理论研究[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 1–8.
- [22] Khamis M A, R Sevilla, K Ennsner. Large mode area Pr³⁺-doped chalcogenide PCF design for high efficiency mid-IR laser[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2018, 30(9): 825–828.
- [23] A Ferrier, et al. Pr³⁺-doped Tl₃PbBr₅: a non-hygroscopic, non-linear and low-energy phonon single crystal for the mid-infrared laser application[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2009, 95(2): 287–291.
- [24] Ł Sójka, et al. Study of mid-infrared laser action in chalcogenide rare earth doped glass with Dy³⁺, Pr³⁺ and Tb³⁺[J]. Optical Materials Express, 2012, 2(11): 1632–1640.
- [25] Hua Chen, Xia K L, Liu Z J, et al. Experimental and numerical investigation of mid-infrared laser in Pr³⁺-doped chalcogenide fiber[J]. 中国物理 B, 2019, 28(2): 253–259.
- [26] Ke Changjun, et al. Research progress on mid-IR Fe:ZnSe laser technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(003): 1–7. (in Chinese)
- 柯常军, 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(003): 1–7.
- [27] Adams, J. J, 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.
- [28] NoSoung Myoung, et al. Energy scaling of 4.3 μm room temperature Fe:ZnSe laser[J]. Optics Letters, 2011, 36(1): 94–96.
- [29] Velikanov S D, Dunilov V P, Zaknarov N G, et al. Fe²⁺: ZnSe laser pumped by a nonchain electric-discharge HF laser at room temperature[J]. Quantum Electronics, 2014, 44(2): 141.
- [30] Velikanov S D, Dunilov V P, Zaknarov N G, et al. Repetively pulsed Fe:ZnSe laser with an average output power of 20 W at room temperature of the polycrystalline active element[J]. Quantum Electronics, 2017, 47(4): 303–307.
- [31] A V Pushkin, et al. Femtosecond graphene mode-locked Fe:ZnSe laser at 4.4 μm [J]. Optics Letters, 2020, 45(3): 738–741.
- [32] Voronov A A, et al. A continuous-wave Fe²⁺:ZnSe laser[J]. Quantum Electronics, 2008, 38(12): 1113–1116.
- [33] Berry P, J Evans, K Schepler. 840 mW continuous-wave Fe:ZnSe laser operating at 4140 nm[J]. Optical Letters, 2012, 37(23): 5021–5023.
- [34] Frolov M P, et al. Study of a 2 J pulsed Fe:ZnSe 4 μm laser[J]. Laser Physics Letter, 2013, 10(12): 1–6.
- [35] Fedorov V, D Martyshkin, Mirov M, et al. Fe-doped II-VI mid-infrared laser materials for the 3 to 8 μm region[J]. Optical Society of America, 2013, 36(2–4): 262–276.
- [36] Evans J W, et al. A passively Q-switched, CW-pumped Fe:ZnSe laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(3): 204–209.
- [37] Martyshkin D V, Fedorov V, Mirov M, et al. High average power (35 W) pulsed Fe:ZnSe laser tunable over 3.8–4.2 μm [J]. Lasers & Electro-Optics, IEEE, 2015: 20160301804424.
- [38] Martyshkin D V, Fedorov V, Mirov M, et al. High power (9.2 W) CW 4.15 μm Fe:ZnSe laser[C]//Cleo: Science & Innovations, 2017: 20181304938178.