2.8 μm Er∶ZBLAN 中红外光纤激光器研究

赵文凯,王雨辰,李彦潮,张龙飞,刘瑞特,周志明,张 龙,姜益光
(中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

摘要:中红外波段激光光源在环境监测、材料加工、外科手术、军事等领域发挥重要作用。泵浦低损耗、高浓度 Er^{3+} 掺杂 ZBLAN(Er∶ZBLAN)光纤是产生近 3 μm 激光输出的主要手段之一,相较于其他同波段固态激光器,Er∶ZBLAN 光纤激光器具有易集成、效率高,可采用激光二极管直接泵浦等优势,性能日渐提升的 Er∶ZBLAN 光纤激光器有望成为 3 μm 波段最先发展成熟、走向应用的激光光源。本文主要介绍 Er∶ZBLAN 光纤激光器工作原理和发展现状,对三种不同的 Er∶ZBLAN 光纤激光器存在的问题进行分析和总结,最后对 Er∶ZBLAN 光纤激光器发展趋势进行展望。

关键词:中红外;激光输出;能级结构;Er∶ZBLAN 光纤;连续光纤激光器;脉冲光纤激光器;波长可调谐光纤激光器

中图分类号:TN248 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-1625(2022)11-3733-12

Research Progress on Er∶ZBLAN Mid-Infrared Fiber Lasers Emitting at 2.8 μm

ZHAO Wenkai, WANG Yuchen, LI Yanchao, ZHANG Longfei, LIU Ruite, ZHOU Zhiming, ZHANG Long, JIANG Yiguang
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The mid-infrared (MIR) region plays an important role in the fields of environmental monitoring, material processing, surgery and defense. Currently, low-loss high-concentration Er^{3+}-doped ZBLAN (Er∶ZBLAN) fiber is one of the main promising gain media for 3 μm MIR laser sources. Er∶ZBLAN fiber lasers have the advantages of being easily integrated, highly efficient and directly diode-pumped in comparison to other 3 μm-class lasers. With improving performance, Er∶ZBLAN lasers are expected to reach maturity and commercialized at wavelength of near 3 μm firstly. The working principle and status of Er∶ZBLAN fiber laser were briefly described in this paper, and the existing problems of three different Er∶ZBLAN fiber lasers were analyzed and summarized. Finally, the development trends were also prospected.

Key words: mid-infrared; laser output; energy level structure; Er∶ZBLAN fiber; continuous fiber laser; pulsed fiber laser; wavelength-tunable fiber laser

0 引 言

工作波长位于 3 μm 附近波段的中红外激光器在大气遥感[1-2]、环境检测[3-4]、材料加工[5]和军事领域[6]广泛应用。目前中红外波段激光产生主要分两种形式:(1)可以在中红外波段直接发射的激光器如量子级联激光器(quantum cascade laser, QCLs)[7]和稀土掺杂氟化物光纤激光器[8];(2)通过光学非线性转化将近红外激光光源下转换到中红外波段[9-10]。量子级联激光器是由两种或两种以上半导体合金材料制备的多层结构,其工作原理是基于电子在半导体量子阱中导带子带件跃迁和声子辅助共振隧穿,理论上通过人为设

收稿日期:2022-08-12;**修订日期**:2022-09-20
基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3500901)
作者简介:赵文凯(1995—),男,工程师。主要从事中红外特种光纤的研究。E-mail:zhaowenkai@siom.ac.cn
通信作者:姜益光,博士,青年特聘研究员。E-mail:jiangyiguang@siom.ac.cn

计,QCLs 的输出波长可以覆盖中远红外波段[11]。QCLs 的有源区是由多周期纳米级外延层形成的超晶格结构,电子的跃迁需要通过在外部施加足够偏压进行激发,低电光转换效率使有源区产生大量的焦耳热且热量无法有效耗散,会进一步产生电子泄露或电子回填,使激光器增益下降,甚至导致器件退化,大大缩短激光器寿命,因此解决有源区发热量巨大的问题是能够让 QCLs 在室温下运行的关键[12-13]。目前利用非线性转化实现中红外波段输出通常采用光参量振荡(optical parametric oscillation, OPO)[14]和光学参量放大(optical parametric amplifier, OPA)[15]两种方式。非线性频率转化主要通过红外晶体的非线性效应将泵浦光转变为中红外信号光或闲频光,因此非线性红外晶体是关键器件。常见的红外非线性晶体主要有 $AgGaS_2$[16]、$AgGaSe_2$[17]、$ZnGeP_2$[18]等,得益于晶体制备水平的提高,目前中红外固体激光器在 3 ~5 μm 已经实现百瓦级的输出[19],单脉冲能量不小于 200 mJ[20],基本能满足应用需求。尽管 OPO 和 OPA 在输出频率的获取上具有一定的灵活性,这些系统在工作的过程中均需要高功率、高光束质量的泵浦激光器和非线性光转换器,这使得系统非常复杂且成本昂贵。

中红外光纤激光器相较于上述两种中红外激光器,具有光束质量好、转换效率高、散热性能好等特点,同时具有体积小、质量轻、易于集成等优点[21],未来有望成为 3 μm 附近的主流激光器。对于光纤激光器,其核心是稀土离子掺杂的增益光纤。现阶段,中红外增益光纤主要有硫系光纤、重金属氧化物光纤和氟化物光纤三种,其中氟化物光纤具有低的声子能量、高的稀土离子溶解度、适中的损伤阈值、优异的成纤性能等优点,被认为是最有前景的中红外增益光纤,目前公认最稳定的氟化物光纤组分为 53% ZrF_4-20% BaF_2-3% LaF_3-4% AlF_3-20% NaF(ZBLAN)。稀土离子掺杂 ZBLAN 光纤是 3 μm 附近光纤激光器的首选增益光纤,常见的稀土掺杂粒子包括 Er^{3+}、Ho^{3+}、Dy^{3+}。980 nm 激光器已经实现商业化,且该波长抽运 Er^{3+} 具有较高的量子效率,因此 Er^{3+} 掺杂 ZBLAN 光纤激光器的研究最为广泛,而 Ho^{3+}、Dy^{3+} 掺杂 ZBLAN 光纤激光器缺乏成熟稳定的泵浦源,因此相关研究相对匮乏[22-23]。

本文系统综述了国内外 Er:ZBLAN 光纤激光器的研究进展并论述制约激光器性能进一步提升的关键因素,最后对中红外 Er:ZBLAN 光纤激光器的发展趋势进行展望。

1　Er^{3+} 能级结构

Er 作为稀土元素具有丰富的能级结构。Er^{3+}/Pr^{3+} 部分能级结构和 ETU、ET 过程示意图如图 1 所示,粒子通过基态吸收(ground-state absorption, GSA)在泵浦波长 655 nm、790 nm 和 980 nm 处被激发到较高能级,通过辐射跃迁从 $^4I_{13/2}$ 能级跃迁至 $^4I_{15/2}$ 能级可以产生 1.55 μm 的发射,由 $^4I_{11/2}$ 能级向 $^4I_{13/2}$ 能级跃迁产生 2.8 μm 的发射,粒子从 $^4F_{9/2}$ 能级向 $^4I_{9/2}$ 能级跃迁能够产生 3.5 μm 发射。1.55 μm 是主要通信波段之一,相关研究主要集中在 Er 掺杂光纤放大器,而 3.5 μm 的发射由于激光阈值高且缺乏成熟的泵浦条件,因此关于 Er:ZBLAN 光纤激光器研究较少,目前相关研究主要集中在 2.8 μm 波长激光输出。

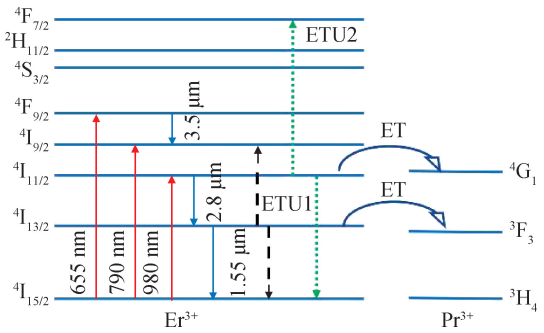


图 1　Er^{3+}/Pr^{3+} 部分能级结构和 ETU、ET 过程示意图

Fig. 1　Partial energy level diagram of Er^{3+} and Pr^{3+} in ZBLAN glass indicating ETU, ET process

Er 的上能级寿命($^4I_{11/2}$,τ_2 = 7.5 ms)明显短于下能级寿命($^4I_{13/2}$,τ_1 = 9.4 ms),因此 Er^{3+} 的 2.8 μm 发射实质上是一个自终止过程,这导致 Er:ZBLAN 光纤激光器难以实现稳定高效的激光输出[24]。解决这个问题的核心思想是转移 $^4I_{13/2}$ 能级的粒子实现 2.8 μm 激光的粒子数反转。实现该想法的途径有三种:一是利用 1.55 μm 和 3 μm 激光级联激射,由于 1.55 μm 的激光辐射发生在能级 $^4I_{13/2}$ 和基态 $^4I_{15/2}$ 之间,通过 1.55 μm 的激光辐射使能级 $^4I_{13/2}$ 上粒子数的显著减少进而实现 2.8 μm 激光的粒子数反转,该方法一般采用泵浦低浓度 Er:ZBLAN 光纤并且泵浦长度较长,激光器的效率比较低。二是利用 Pr^{3+} 作为钝化剂,通过 Er^{3+} 的 $^4I_{13/2}$ 与 Pr^{3+} 的 $^3F_3$ 之间的能量转移(energy transfer, ET),减少 Er^{3+} 的 $^4I_{13/2}$ 能级的粒子数并形成反转,这种

方法只能将每个泵浦光子转化为一个激光光子,导致激光器斜率效率最高只能达到斯托克斯极限[25]。三是通过提高 Er^{3+} 掺杂浓度利用 Er^{3+} 与 Er^{3+} 之间的能量转移上转换(energy transfer upconversion, ETU),ETU 主要包括 $^4I_{13/2}$,$^4I_{13/2}\rightarrow{}^4I_{9/2}$,$^4I_{15/2}$(ETU1)和 $^4I_{11/2}$,$^4I_{11/2}\rightarrow{}^4F_{7/2}$,$^4I_{15/2}$(ETU2)两个过程,高浓度掺杂下 ETU1 过程发生概率更大,可以使较低能级的粒子快速耗尽形成粒子数反转。更为重要的是 ETU1 过程通过对 $^4I_{13/2}$ 能级的能量回收使得激光器的斜率效率最高两倍于斯托克斯极限[26],因此通过高浓度掺杂 Er:ZBLAN 光纤获得 2.8 μm 激光是目前的主流方法。

2　Er:ZBLAN 中红外光纤激光器

根据输出模式可将 Er:ZBLAN 光纤激光器大体分为连续波激光器和脉冲激光器。连续波激光器在材料加工、外科手术等方面有很大的应用前景,还可作为更有效的长波泵浦光源,因此引起了广泛的关注。经过几十年的研究改进,连续波激光器已经从最初的毫瓦级发展到现在的最高近百瓦输出[27],尽管输出功率得到了很大的提升,但现有的中红外光纤激光器输出水平相较于 2 μm 波长以下的近红外激光器还有很大的提升空间。进一步提高激光器的输出功率主要受限于 ZBLAN 光纤的化学稳定性、损耗等,因此进一步优化改进 Er:ZBLAN 光纤性能将是未来实现中红外光纤激光器高功率、稳定输出的主要研究方向之一。典型的脉冲激光器主要分为调 Q 和锁模两类,一般来说,调 Q 光纤激光器能够产生微秒或纳秒量级的脉冲,而锁模光纤激光器能够产生更短的皮秒或飞秒量级的脉冲,峰值功率可达数十千瓦,更高的峰值功率使其可以作为超连续谱的泵浦光源,也可以应用于材料改性等领域。可调谐激光器能够在一定波长范围内实现调谐输出,很多分子在中红外波段具有强烈的特征吸收,通常这些分子在中红外波段的吸收强度远大于近红外波段,因此检测灵敏度高,可用于痕量检测、精密光谱分析等领域,发展中红外可调谐光纤激光器意义重大。

2.1　Er:ZBLAN 连续光纤激光器

1988 年 Brierley 报道了第一台 2.7 μm Er^{3+} 掺杂光纤激光器[28]。得益于高功率半导体激光器的发展,1999 年 Er:ZBLAN 光纤激光器的输出功率实现了瓦级的突破,Jackson 等[29]利用 Er^{3+}/Pr^{3+} 共掺 ZBLAN 光纤实现了 1.7 W 的激光输出,同年 Sandrock 等[30]利用 Er^{3+} 掺杂 M 型光纤实现了 1 W 的2.8 μm 激光输出,斜率效率达 25%。随着高功率半导体激光器的发展,2007 年 Zhu 等[31]实现了输出功率 10 W 级的突破,他们采用 980 nm 二极管激光器泵浦 4 m 长 Er^{3+} 掺杂浓度 6%(摩尔分数)ZBLAN 双包层光纤实现了 >9 W 的激光输出。实验发现随着泵浦功率的提高,可能是由于光纤中热量累积,输出功率表现出类似脉冲的波动性,甚至损伤光纤尾端断面,严重影响光纤激光器运行的稳定性。为了进一步提高光纤激光器的输出功率,提高泵浦功率是必然的选择,由于 Er:ZBLAN 光纤的热学性能较差,损耗相对较高,高功率泵浦时由于 Er^{3+} 的 ETU 过程会产生大量热量,在光纤中产生热累积进而影响激光器的性能,所以解决光纤冷却问题变得尤为迫切。日本京都大学 Tokita 等[32]采用液冷的方式,实现了 24 W 的 3 μm 波长的连续激光输出,斜率效率达 14.5%。激光器在24 W 功率下稳定输出 5 min,实验装置如图 2 所示。采用 975 nm 激光器双泵浦长 4.2 m,掺杂浓度为 6%(摩尔分数)的 D 型双包层 Er:ZBLAN 光纤,光纤整体浸入氟碳液体冷却剂中,通过冷却剂的循环使光纤始终处于 20 ℃的环境,光纤末端由带有 V 形凹槽的光纤夹头固定。为防止激光在冷却液中吸收并传导冷却光纤末端,光纤的两端都经过球形抛光,并紧贴在厚度为 1 mm 的 CaF_2 窗口。尽管对光纤采取了主动冷却,当输出功率 >5 W 时激光器输出功率仍出现了一定的波动。

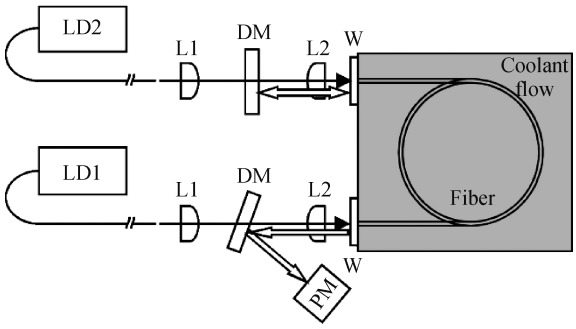
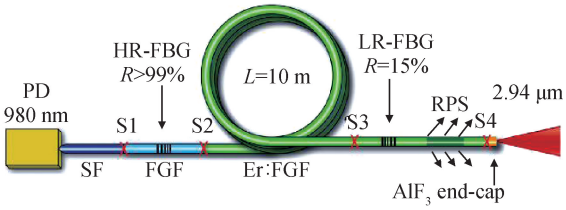


图 2　氟碳冷却双泵浦中红外光纤激光器结构示意图[32]

Fig. 2　Structure schematic of fluorocarbon-cooled double-pumped MIR fiber laser[32]

上述工作均采用空间耦合的方式实现对工作介质的泵浦,采用空间耦合的方式存在耦合效率低、容易导致端面损伤等缺点,泵浦过程中光纤端面存在热负荷,光纤端面裸露在大气中极易受 OH^- 侵蚀,导致光纤尾

端端面损伤,一般在光纤尾端熔接 CaF_2 或 AlF_3 端帽能够明显提高损伤阈值。Goya 等[33]在光纤尾端熔接 CaF_2 端帽,实现了 30 W 的 2.8 μm 激光 60 min 稳定输出。激光器结构全光纤化能够提高耦合效率、保护光纤端面并提高激光器的稳定性。加拿大拉瓦尔大学于 2007 年首次报道在 ZBLAN 光纤上利用 800 nm 飞秒激光器完成光栅结构刻蚀[34],两年后利用光纤光栅刻蚀技术实现了 5 W 的中红外激光输出,光光转换效率达 32%,功率的进一步提升受限于光纤尺寸(芯层直径 6 μm)和泵浦功率(36 W)[23]。2011 年他们利用芯径 16 μm,掺杂浓度为 7%(摩尔分数)的 Er:ZBLAN 多模光纤实进一步将输出功率提升到 20.6 W,值得注意的是,由于激光斜率效率高达 35.4%,激光泵浦过程中并未采用主动冷却装置[35]。2015 年他们再次打破纪录,通过单端泵浦实现了 30.5 W 的激光输出,装置结构如图 3 所示,在 ZBLAN 光纤和 Er:ZBLAN 光纤分别刻蚀高反光栅(high-reflective fiber bragg grating, HR-FBG)和低反光栅(low-reflective fiber bragg grating, LR-FBG)构成 10 m 长的谐振腔,光纤尾端接有 AlF_3 端帽以减轻水汽的侵蚀,提高激光器稳定性[36]。2018 年该团队直接在整段 Er:ZBLAN 光纤内完成光栅刻蚀,利用双泵浦方式实现了 41.6 W 的激光输出[37],装置结构如图 4 所示,这是 Er:ZBLAN 中红外光纤激光器已知报道的最高输出功率。



(PD: pumped using 980 nm laser diodes; SF: silica fiber; FGF: fluoride glass fiber; RPS: residual pump stripper)

图 3　单泵浦 FBG 刻蚀全光纤中红外激光器示意图[36]

Fig. 3　Schematic diagram of single-pumped all-fiber MIR laser with laser written FBG[36]

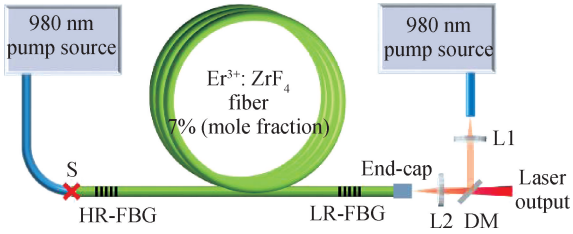


图 4　双泵浦 FBG 刻蚀全光纤中红外激光器示意图[37]

Fig. 4　Schematic diagram of dual-pumped all-fiber MIR laser with laser written FBG[37]

2.2　Er:ZBLAN 脉冲光纤激光器

2.2.1　Er:ZBLAN 调 Q 光纤激光器

调 Q 技术是产生脉冲激光的常用手段之一,Q 值的大小由谐振腔的腔内损耗和反射镜光学反馈能力两个因素决定。调 Q 技术分为主动调 Q 和被动调 Q,主动调 Q 主要包括转镜调 Q、电光调 Q 和声光调 Q 等,被动调 Q 一般采用可饱和体吸收实现调 Q 操作[38-40]。

主动调 Q 具有脉冲频率可控、脉冲能量高、峰值功率高等优点备受研究者关注[41]。2011 年日本京都大学 Tokita 等[42]利用声光调 Q 首次实现平均功率大于 10 W 的中红外调 Q 激光输出,脉冲能量 100 μJ,重频 120 kHz,脉宽 90 ns,相对应的脉冲峰值功率达 900 mW。2017 年 Shen 等[41]利用机械调 Q 进一步将脉冲的峰值功率提高到 1.6 kW,实验利用光栅和镀金反射镜进行反馈并做对比实验,发现以金镜进行反馈峰值功率最高只能达到 1 kW,利用光栅能抑制 Er^{3+} 的放大自发辐射(amplified spontaneous emission, AES)效应,因此能够获得更高峰值能量的激光脉冲,在重频 10 kHz 下获得最大脉冲能量 0.15 mJ。2020 年 Sojka 等[43]采用 30 W 的 975 nm 激光泵浦芯径 15 μm 7%(摩尔分数)Er:ZBLAN 双包层光纤,在重复频率 10 kHz 时实现光纤激光器在 ~2.8 μm 波长下的声光调 Q 输出。实验探究了泵浦功率、增益光纤长度和重复频率对调 Q 脉冲脉宽、峰值功率的影响,最终在 1.1 m 长 Er:ZBLAN 光纤实现脉冲能量 46 μJ 的激光输出,脉冲的峰值功率 0.821 kW,脉宽 56 ns。2021 年他们采用芯径 35 μm 的 Er:ZBLAN 多模光纤,在一定程度上牺牲了光束质量进一步缩短脉宽至 26 ns,峰值功率提高到 12.7 kW,此时脉冲输出的能量高达 330 μJ[44]。这一纪录在 2021 年被 Shen 等[45]打破,他们利用电光调 Q 首次实现了 ~2.8 μm 的脉冲激光输出。实验装置如图 5 所示,采用芯径 33 μm 掺 Er 浓度为 6%(摩尔分数)的 ZBLAN 光纤作为增益介质,光纤数值孔径(numerical aperture, NA)为 0.12。在 Er:ZBLAN 光纤和光栅之间加入电光调制器,电光调制器由偏振器、$RbTiOPO_4$(RTP)晶体和四分之一波长波片组成,通过外部的周期电场作用于 RTP 晶体实现 Q 开关。激光器输出脉冲脉宽 13.1 ns,脉冲能量达 205.7 μJ,相应的峰值功率达 15.7 kW,功率的进一步提高受限于激光器的占空

比,这是目前已知最高峰值功率 Er:ZBLAN 调 Q 光纤激光器的报道。

尽管主动调 Q 具有峰值能量高的优势,但是需要在设备内放置调制器,导致设备的结构复杂、难集成,而被动调 Q 光纤激光器利用价格低廉、易制备的可饱和吸收体(saturable absorber, SA)进行调 Q,其设备结构简单、紧凑。一般用于被动调 Q 的可饱和吸收体有:石墨烯、黑磷、过渡金属二硫化物等。石墨烯具有零带隙、线性能量色散关系、易制备等特性,使其表现出跨越可见光到中红外宽波段的可饱和吸收。2013 年日本京都大学的 Tokita 等[46]首次利用石墨烯实现 2.8 μm Er:ZBLAN 光纤激光器调 Q 输出,激光脉冲能量为 6.4 μJ,重频 59 kHz,脉宽 400 ns。由于制备的石墨烯均匀性较差,只能在特定条件下获得调 Q 模式输出。Chen 等[47]在 2013 年在硅基光纤端面引入石墨烯作为可饱和吸收体,在 980 nm 下泵浦 10 m 8%(摩尔分数) Er:ZBLAN 光纤,当泵浦功率达到 207.2 mW 光纤激光器开始实现调 Q 操作,进一步提高泵浦功率至406.4 mW 激光器稳定输出脉冲。最终激光器的输出脉宽为 2.9 μs,脉冲能量达 1.67 μJ,重频 37 kHz,减少增益光纤长度可以进一步缩短脉冲宽度。黑磷是一种新型的二维材料,其带隙由黑磷的层数控制,通过机械剥离法或液相剥离法可实现黑磷带隙可控制备,多层黑磷的结构性能与石墨烯类似,因此也可以作为 SA 用于实现调 Q 操作。2015 年 Qin 等[48]利用液相剥离法成功制备多层黑磷并引入到镀金反射镜形成饱和吸收镜,首次实现了对 2.8 μm 波长的调 Q 激光输出,激光器最大平均功率 485 mW,脉宽 1.18 μs,重复频率63 kHz,脉冲能量 7.7 μJ。2016 年 Tang 等[49]利用拓扑绝缘体 Bi_2Te_3 作为吸收体,实现了 2.8 μm Er:ZBLAN 光纤激光器调 Q 输出,最大输出平均功率 856 mW,脉宽 1.3 μs,重复频率 92 kHz,脉冲能量为 9.3 μJ。同年 Shen 等[50]基于半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturable absorption mirror, SESAM)获得了平均输出功率达瓦级的调 Q 输出,脉冲峰值功率达 21.9 W。2019 年,Lai 等[51]利用 SESAM 作为 SA 设计了 Er:ZBLAN 光纤被动调 Q 激光系统,激光器最大平均输出功率达 3.01 W,脉宽 0.45 μs,脉冲能量 10.82 μJ,峰值功率 24.45 W,这是目前已知基于 SESAM 的 Er:ZBLAN 光纤激光器被动调 Q 最高平均输出功率。Wang 等[52]探究了过渡金属二硫化物作为饱和吸收体对调 Q 性能的影响,将多层 MoS_2 引入镀金反射镜作为 SA,MoS_2 SA 的调制深度为 5%,激光脉冲宽度 806 ns,平均输出功率140 mW,峰值功率 2.48 W,脉冲能量达 2 μJ。

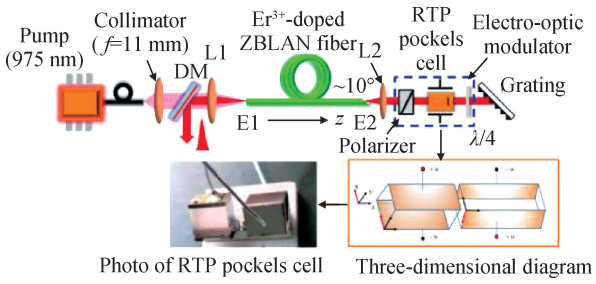


图 5　电光调 Q 脉冲光纤激光器结构示意图[45]

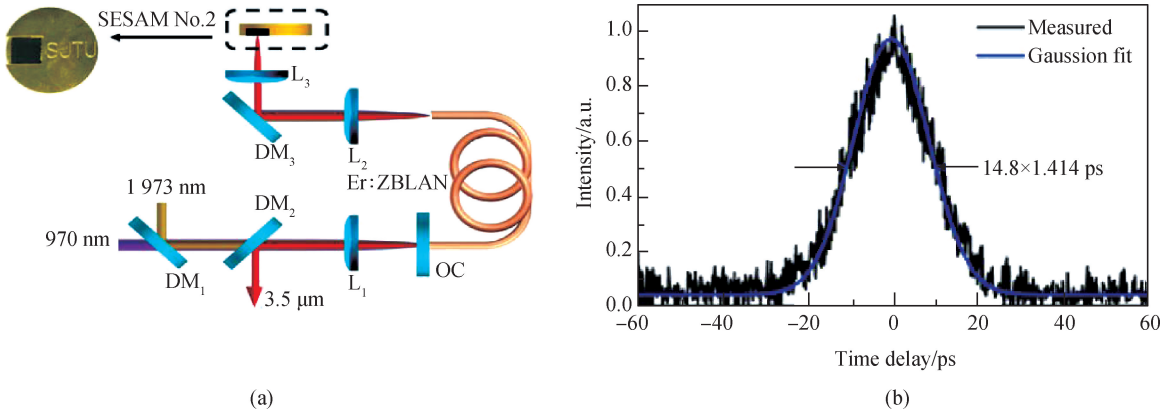
Fig. 5　Structure diagram of electro-optical Q-switched pulsed fiber laser[45]

2.2.2　Er:ZBLAN 锁模光纤激光器

锁模激光器通过对激光器中纵模进行相位锁定,经相干叠加产生超短脉冲。激光锁模技术分为主动锁模和被动锁模两种,主动锁模通过外部向激光器提供调制信号来周期性地改变激光器的增益或损耗,从而达到锁模的目的,该技术能实现高重频且稳定性高,但是设备结构复杂。而被动锁模则是利用自然或人造可饱和吸收体来产生超短脉冲,一般只需要在腔内加入 SA 即可,激光器的结构紧凑且成本低。目前绝大多数的光纤激光器研究工作均采用被动锁模技术,主要采用以下两种:(1)以具有光学可饱和吸收特性的材料作为锁模器件(真实 SA)。由于材料对不同强度的光线具有不同的透过率,脉冲在谐振腔内不断振荡并发生时域窄化,最终达到平衡状态形成稳定的脉冲输出。典型的材料 SESAM,金属掺杂晶体如 Fe:ZnSe 以及二维纳米材料如石墨烯、黑磷(black phosphorus, BP)和过渡金属二硫化物(transition metal dichalcogenide, TMD)等;(2)利用光学非线性效应等方式产生等效可饱和吸收体,也称为人造可饱和吸收体,代表结构有非线性偏振旋转(nonlinear polarization rotation, NPR)、非线性光学环形镜(nonlinear optical loop mirror, NOLM)等。下面分别介绍两类被动锁模技术应用在 Er:ZBLAN 光纤激光器的进展。

由于缺乏中红外饱和吸收体,3~5 μm 锁模光纤激光器鲜有报道。2012 年亚利桑那大学 Wei 等[53]报道利用 Fe:ZnSe 晶体作为 SA 实现 2.8 μm Er:ZBLAN 光纤激光器锁模输出,以长度为 1.6 m、掺杂浓度为 8%(摩尔分数)的双包层 ZBLAN 光纤作为增益介质,光纤尾端以一定角度切割减少菲涅尔反射的影响,Fe:ZnSe 晶体放置在 CaF_2 棱镜和高反射镜之间实现锁模操作,激光最终输出平均功率为 51.4 mW,脉宽

19 ps,脉冲能量只有 0.93 nJ,该工作并未对激光器的稳定性进行测试。两年后 Haboucha 等[54]重复了 Wei 的工作,认为腔内的光学反馈仅由光纤端面的弱宽带菲涅尔反射提供,因此腔内的脉冲能量无法达到足够高的值来获得稳定的锁模机制,以 SESAM 作为可饱和吸收体,同时在 Er∶ZBLAN 光纤内刻入布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)以提供高质量、可控的光谱反射,减少因插件引起的损耗,提高光纤激光器的稳定性,基于此实现了激光器在数小时内保持连续锁模输出,平均输出功率为 440 mW,脉宽 60 ps,重频 51.75 MHz。值得注意的是技术上很难在氟化物光纤中刻蚀 FBG,而且窄带 FBG 的刻入也会严重限制激光器输出脉冲功率,因此 Tang 等[55]并未采用刻蚀 FBG 的方法来提升激光器的稳定性,而是在光学输出端和 SESAM 中间引入了一套凹面镜系统,实现了瓦级的 2.8 μm 的锁模脉冲激光的稳定输出,激光脉宽 25 ps,峰值功率 1.86 kW,激光器功率进一步提高受限于 SESAM 的阈值。最终激光器在 1.05 W 输出功率下稳定锁模输出 4 h。虽然可以通过材料设计实现对 SESAM 的调制深度和带宽的调节,但是传统的 SESAM 受限于材料最小带隙,近年来鲜有基于 SESAM 长波锁模激光输出的报道。2022 年,上海交通大学 Qin 等[56]利用分子束外延生长技术制备了 InAs/GaSb 超晶格(superlattice, SL)SESAM,通过对 InAs/GaSb SL 的设计可以灵活调整可饱和吸收体的响应范围、饱和能量密度和恢复时间等参数,激光器具体结构如图 6(a)所示,主要包括双泵浦源、双色镜(dichroic mirror, DM)、透镜、输出耦合器(output couplers, OC)、Er∶ZBLAN 光纤和 InAs/GaSb 超晶格 SESAM,基于此实现了 3.5 μm 的 Er∶ZBLAN 光纤激光器的稳定锁模输出,输出脉宽 14.8 ps(如图 6(b)所示),平均功率 149 mW,重复频率 36.56 MHz,经过长达 8 h 的锁模输出激光波动率小于 1.4%。



(a)　　(b)

图 6　基于 InAs/GaSb 超晶格(SL)SESAM 锁模光纤激光器结构(a)及脉冲自相关轨迹(b)[56]

Fig. 6　Structure of a mode-locked fiber laser based on InAs/GaSb superlattice (SL) SESAM (a) and autocorrelation trace of mode-locked pulses (b)[56]

尽管利用 SESAM 在中红外波段进行锁模操作取得了一定进展,但是 SESAM 制作过程复杂、成本昂贵且适用的工作波长范围窄,因此研究人员开始寻求低成本、易制备的新材料来实现中红外光纤激光器的锁模操作。近年来一些新型的二维纳米材料如石墨烯[57]、黑磷[58]、过渡金属硫化物[59]等材料因具备超快的宽带可饱和吸收、易制备等特性,引起学者对其应用在中红外波段锁模特性的研究兴趣。以石墨烯为 SA 在 1~2.5 μm 波段已实现锁模操作,展现出低饱和强度、超快弛豫时间和大调制深度等特性,有望应用于长波的锁模操作[60]。Zhu 等[61]采用化学气相沉积法在镀金反射镜上制备多层石墨烯薄膜,首次实现基于石墨烯 SA 在 2.8 μm 的锁模脉冲输出。脉冲平均功率 18 mW,脉宽 42 ps,重复频率 25.4 MHz,脉冲能量 0.7 nJ。受限于石墨烯的低损伤阈值,目前尚未有基于石墨烯 SA 更高功率的锁模输出报道。黑磷作为一种典型的二维材料其显著特点是利用制备手段可实现带隙从 0.2 eV 到 2 eV 的扩展调控、电子迁移率高、制备工艺简单且成本低,作为光纤锁模激光器的可饱和吸收体的特性被广泛研究[62]。2016 年 Qin 等[63]利用机械剥离法将黑磷薄片引入到镀金反射镜上,首次实现了基于黑磷 SA 在 2.8 μm 波长处的 Er∶ZBLAN 光纤激光器锁模脉冲输出,脉冲平均功率达 613 mW,脉宽 42 ps,重频 24 MHz,信噪比达 60 dB。两年后该组利用 970 nm 和 1 793 nm 双波长泵浦首次实现了大于 3 μm 的锁模输出,尽管输出功率只有 40 mW,该成果揭示了黑磷作为 SA 实现 3 μm 以上长波激光输出的巨大潜力。TMD 相较于传统的 SA 具有更大的调制深度,目前常见的

TMD 包括 WS_2、WSe_2 等并已实现近红外波段的调 Q 输出[64-65]。基于 TMD 在 2.8 μm 波长获得锁模脉冲输出的工作在 2019 年由 Guo 等[66]报道,利用 CVD 生长 WSe_2 薄膜作为 SA 并转移至镀金反射镜形成 WSe_2-SAM,基于此利用 980 nm 激光泵浦 6%(摩尔分数)Er:ZBLAN 光纤,实现脉宽 21 ps,重频 42.43 MHz,平均功率 360 mW 的锁模脉冲。

NPR 技术是借助光纤本身的非线性克尔效应对不同方向的偏振光施加不同非线性相移,从而实现可饱和吸收锁模。利用 NPR 技术实现可饱和吸收需要构建人造 SA,其结构一般由起偏器、半波片、四分之一波片、双折射光纤和检偏器组成。利用可饱和吸收材料进行锁模虽然结构简单,但是产生的脉冲一般很难突破到飞秒级,同时峰值功率较低难以满足实际应用需求,如材料改性、超连续谱产生等,NPR 技术的出现给高峰值功率飞秒激光器的研究注入新的活力。2015 年 Duval 等[10]首次实现 2.8 μm 的 Er:ZBLAN 光纤激光器的飞秒锁模输出,同年 Hu 等[67]利用 NPR 技术实现脉宽 497 fs 的锁模输出。2019 年上海交通大学 Qin 等[68]采用 Ge 棒进行色散管理进一步将锁模脉宽缩短至 215 fs,脉冲能量 9.3 nJ,峰值功率达 43.3 kW。次年上海交通大学 Gu 等[69]报道了基于 NPR 技术实现 2.8 μm 的 Er:ZBLAN 光纤激光器的 131 fs 锁模输出。经过实验和数值模拟证实了减短增益光纤长度是缩短脉宽的有效途径,在牺牲阈值的条件下获得脉宽 131 fs,峰值功率 22.68 kW 的孤子脉冲,脉冲能量 3 nJ。该工作为 Er:ZBLAN 锁模光纤激光器产生亚 100 fs 中红外脉冲提供了思路。目前暂未实现通过 NPR 技术直接获得瓦级平均功率,脉宽低于 100 fs 的锁模脉冲,因此研究人员采用脉冲种子源 + 非线性放大技术来进一步压缩脉宽,获得更高功率的脉冲输出。2020 年 Huang 等[70]利用 NPR 技术在 980 nm 下泵浦 3.3 m 长 Er:ZBLAN 光纤实现脉宽 ~126 fs,脉冲能量 ~10 nJ 的锁模输出,为了进一步压缩脉宽,将上述锁模输出作为种子光源并采用马丁内兹展宽器进行色散调节管理,结合 Er:ZBLAN 放大器和 ZBLAN 非线性光纤进一步压缩脉宽至 15.9 fs,最终脉冲峰值功率达 ~500 kW。2021 年,上海交通大学 Zhou 等[71]报道了 2 MW 峰值功率的锁模输出。同年,Cui 等[72]报道了一种高功率结构紧凑的中红外激光系统,在不使用任何外部脉冲压缩器或色散管理展宽器下实现了脉宽 ~85 fs,平均功率高达 2.4 W,脉冲能量 >40 nJ 的激光输出。随着脉冲能量的增加,由于拉曼效应的影响主脉冲经历孤子裂变,低脉冲平均功率,可通过调整输入偏振来提高放大器的拉曼阈值。2022 年 Yu 等[73]利用 2.4 m 长掺杂浓度达 7%(摩尔分数)的 Er:ZBLAN 光纤制备脉宽 283 fs 的脉冲种子光源,利用非线性放大技术在放大器中将线性极化转变为椭圆极化,进一步将脉宽压缩到 59 fs,获得的脉冲平均功率高达 4.13 W,是迄今为止亚 100 fs 锁模光纤激光器最高的平均输出功率,其结构示意图如图 7 所示。

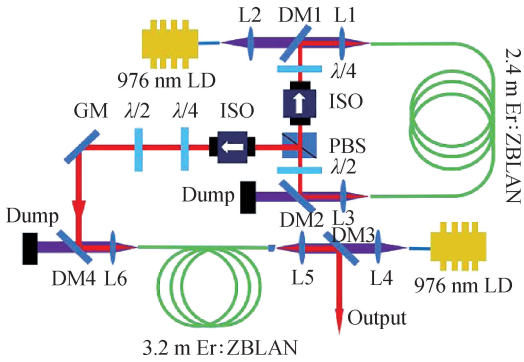


图 7　~59 fs 锁模中红外光纤激光器结构[73]

Fig. 7　Structure of mode-locked MIR fiber laser with ~59 fs output pulse[73]

2.3　Er:ZBLAN 波长可调谐光纤激光器

波长可调谐激光器是指输出波长在一定范围内连续可调的,在光谱学、光通信、频率计量等领域有着广泛的应用前景。尽管利用非线性频率转化技术如光参量振荡(optical parametric oscillation, OPO)、差频产生(difference frequency generation, DFG)已被应用于实现波长可调谐的中红外激光器,但是转化效率低、设备结构复杂、维护成本高等缺点限制了其应用场景。以稀土掺杂光纤作为增益介质通过光栅实现调谐输出波长,该系统简单、高效同时具有出色的散热能力和光束质量,因此波长可调谐光纤激光器极具应用潜力。

首个 3 μm 波长可调谐光纤激光器于 2000 年被报道[74],采用 20 m 长 2%(摩尔分数)Er:ZBLAN 光纤实现 2.71 ~2.83 μm 的波长调谐,但是只有 30 mW 的输出功率且效率不高,限制了其在诸多场景的实际应用。随着光纤制备技术的发展推动,2007 年 Zhu 等[75]采用 Er 掺杂浓度更高(6% 摩尔分数)的 ZBLAN 光纤实现了波长可调谐光纤激光器的输出功率和效率的进一步提升。在 2 705 ~2 805 nm 波长范围内激光器的输出功率达 1.14 W,但是进一步提高泵浦功率至 20 W,调制范围缩短至 20 nm(2 780 ~2 800 nm)。激光器效率的提高(效率效率为 10%)是由于 Er 掺杂浓度的提高大大提升了 ETU 过程。三年后日本京都大学 Tokito

等[76]将输出功率提升并突破至 10 W 级。该课题组对激光器系统多项结构进行改进优化,激光装置如图 8 所示,激光系统采用主动冷却的方式使光纤处于 20 ℃恒温环境,大大增加光纤承受高功率泵浦能力。为了提高输出端部热传导,将输出端面抛光成球形并紧贴在厚度为 2 mm 的蓝宝石板上,同时为了防止空气中的水汽侵蚀输出端面导致激光器工作过程中出现端面损伤,在端面处始终有 N_2 吹拂,泵浦端光纤端面切以 15°角以防止寄生激光的产生。与之前工作不同的是,泵浦功率的提高并未导致激光器调制范围严重变窄,而是调制中心波长往长波方向偏移。最终在 93 W 泵浦功率下实现 2 770 ~ 2 880 nm 波长范围内 11 W 的可调谐输出,激光器斜率效率为 12.2%。Liu 等[77]研究了体光栅对 Er:ZBLAN 光纤激光器调 Q 输出模式下波长调谐的影响,最终获得 62 nm(2 762 ~ 2 824 nm)的调谐效果。Wei 等[78]首次报道增益开关 Er:ZBLAN 光纤激光器实现 170 nm 宽的波长调谐。

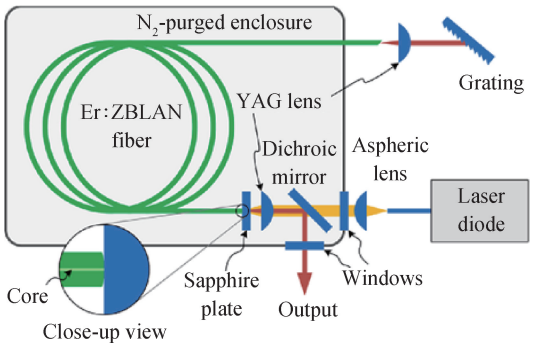


图 8　波长可调谐 Er:ZBLAN 光纤激光器结构示意图[75]

Fig. 8　Structure diagram of wavelength-tunable Er:ZBLAN fiber laser[75]

综上所述,Er:ZBLAN 波长可调谐光纤激光器存在输出功率低、调制范围窄、斜率效率低等缺点。导致激光器效率低的主要原因是内包层含有少量的 Er^{3+} 引起大量额外的吸收损耗,因此提高光纤制备工艺水平能够进一步提高激光器的效率。Er^{3+} 单掺波长可调谐光纤激光器的输出功率和调制范围彼此矛盾,提高泵浦功率能提高激光器的输出功率,但是会导致调制范围严重收缩,主要表现为失去对短波调谐,对该现象产生的可能原因解释如下:一方面,在高功率泵浦下,ETU1 过程不能有效的耗尽 $^4I_{13/2}$ 的粒子数,导致有助于短波发射的 $^4I_{13/2}$ 能级中更低的斯塔克分裂能级与 $^4I_{11/2}$ 能级间粒子数反转变弱;另一方面因为 Er^{3+} 下能级 $^4I_{13/2}$ 寿命比上能级 $^4I_{11/2}$ 寿命长,因此在连续光泵浦下 $^4I_{13/2}$ 能级上存在大量的激发粒子,导致在短波方向存在很强的吸收($^4I_{11/2}\leftarrow{}^4I_{13/2}$),在这两种机制的影响下引起高泵浦功率时激光器失去对短波长的调谐能力。该问题可以通过 Pr^{3+}、Dy^{3+} 共掺解决。如当采用 980 nm 激光器泵浦 Dy^{3+}/Er^{3+}:ZBLAN 光纤,Er^{3+} 粒子从基态受激到激发态,由于 Dy^{3+} 的 $^6F_{9/2}$ 能级与 Er^{3+} 的 $^4I_{11/2}$ 能级接近,因此部分能量从 Er^{3+} 的 $^4I_{11/2}$ 能级转移到 Dy^{3+} 的 $^6F_{9/2}$ 能级,由于 Er^{3+} 和 Dy^{3+} 的共同作用,理论上可实现 2.7 ~ 3.4 μm 的波长可调谐。

2021 年 Wang 等[79]利用 0.25%(摩尔分数)Dy^{3+}/4%(摩尔分数)Er^{3+} 共掺 ZBLAN 光纤实现了从 2 709.2 nm 到 3 373.6 nm 波段的调谐。实验装置如图 9 所示,采用商用 980 nm 激光二极管作为泵浦源,使用一对焦距为 2.54 cm 的 CaF_2 透镜对泵浦光进行准直,并将泵浦耦合到 4.5 m 长的 D 型 Dy^{3+}/Er^{3+} 共掺杂 ZBLAN 光纤,在光纤耦合端放置双色镜(具有在 70% 的高反射率@3 μm,高透过率@980 nm 特性),在光纤输出端放置透镜用以准直 3 μm 激光,在距离该透镜 3 cm 处放置闪耀光栅将特定波长的衍射光束反射进光纤纤芯,另一个双色镜以 45°放置在泵浦端 CaF_2 透镜组之间,将 3 μm 激光传输到探测器。该激光系统实现了 674.4 nm 的调谐宽度,但是输出功率和效率比较低,需要进一步优化稀土离子掺杂浓度和泵浦条件。需要注意的是,以上工作均采用块状光栅来实现波长调谐,这导致谐振腔难以实现全光纤化使激光系统稳定性下降。

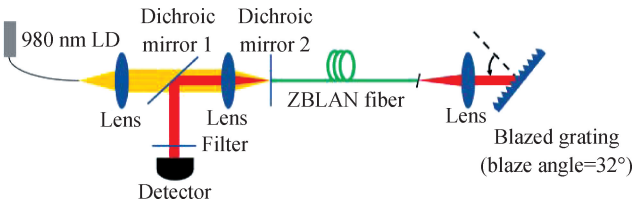


图 9　Er^{3+}/Dy^{3+} 共掺 ZBLAN 可调谐光纤激光器结构示意图[78]

Fig. 9　Schematic of Er^{3+}/Dy^{3+} co-doped ZBLAN wavelength-tunable fiber laser[78]

3　结语与展望

Er:ZBLAN 光纤激光器经过几十年的发展,在性能上已经取得了长足进步,但仍未达到实用水平,因此需要进一步优化激光器结构提升性能。

对 Er:ZBLAN 连续光纤激光器而言,如何进一步稳定提升光纤激光器的输出功率是未来的主要研究方向。目前能够实现数十瓦的激光输出,更高功率(百瓦级)的激光输出主要受限于光纤材料本身的性能和相关的处理技术,应关注以下三个方面:(1)发展优化光纤拉制技术,制备超低损耗、稳定性高的 Er:ZBLAN 光纤提高光纤激光器的输出能力;(2)在泵浦过程中由于热量在端面累积导致光纤端面损伤、激光输出不稳定等问题,需要寻求更有效的冷却方式,降低光纤内热量对激光器稳定性的影响,或是发展光纤光栅刻蚀技术、光纤熔接技术等,促进光纤激光器全光纤化;(3)研究影响激光器斜率效率的内在机制,如泵浦方式、Er^{3+}的掺杂浓度、增益光纤长度等因素对激光器斜率效率的影响,提升斜率效率有望进一步提高光纤激光器的输出功率。

对 Er:ZBLAN 脉冲光纤激光器而言,调 Q 是获得短脉冲(微秒~纳秒量级)的有效手段。短脉冲兼具高峰值功率和高脉冲能量的特点在高效组织切割、红外制导致盲等方面有实际应用需求。相关前沿研究主要集中在利用二维纳米材料作为可饱和吸收体来实现被动调 Q 操作,目前存在以下问题:(1)光器输出脉冲能量低。主要原因在于所制备的二维材料 SA 损伤阈值低,提高泵浦功率会导致 SA 出现热解现象,需要进一步优化改进 SA 的制备工艺提高其损伤阈值。(2)激光器稳定性差。这可能是剩余泵浦功率在光纤中和 SA 表面的热累积导致,因此需要对激光器的谐振腔参数、泵浦条件和 SA 的调制深度、恢复时间等方面进行调整优化。超短脉冲(皮秒~飞秒级)的获取可以通过锁模操作实现。目前 Er:ZBLAN 锁模激光器最优性能指标均由 NPR 锁模技术实现,该技术理论上不受材料带隙和时间弛豫的影响,是目前最适合产生飞秒脉冲的方法,但是会引入空间偏振器件使结构复杂化的同时对环境扰动敏感,激光器全光纤化是有效解决方案。需要注意的是,虽然利用非线性展宽及放大技术可以获得高峰值功率和超短脉宽,其包含增益提取、色散补偿、非线性展宽等诸多过程,大大增加了系统的复杂程度,因此能否从锁模振荡器直接产生数十飞秒的中红外超短脉冲是简化系统的关键,仍需要大量的实验实践和理论探索。波长可调谐光纤激光器的研究开展的还不多且还处于实验室研制阶段,提升激光器输出功率和扩大波长调谐范围是未来需要突破的方向。

参　考　文　献

[1] JOULLIÉ A, CHRISTOL P, BARANOV A N, et al. Mid-infrared 2~5 μm heterojunction laser diodes[J]. Solid-State Mid-Infrared Laser Sources, 2003: 1-61.

[2] ZHANG H L, BIAN J T, SUN D L, et al. Er^{3+}-doped LuYSGG crystal as a potential 2.79 μm radiation-resistant laser material[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108121.

[3] FRAYSSINOUS C, FORTIN V, BÉRUBÉ J P, et al. Resonant polymer ablation using a compact 3.44 μm fiber laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 813-820.

[4] MAES F, FORTIN V, POULAIN S, et al. Room-temperature fiber laser at 392 μm[J]. Optica, 2018, 5(7): 761.

[5] WANG Z H, ZHANG B, LIU J, et al. Recent developments in mid-infrared fiber lasers: status and challenges[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106497.

[6] EDWARDS G S. Mechanisms for soft-tissue ablation and the development of alternative medical lasers based on investigations with mid-infrared free-electron lasers[J]. Laser & Photonics Review, 2009, 3(6): 545-555.

[7] SCHWAIGHOFER A, BRANDSTETTER M, LENDL B. Quantum cascade lasers (QCLs) in biomedical spectroscopy[J]. Chemical Society Reviews, 2017, 46(19): 5903-5924.

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

[9] LEINDECKER N, MARANDI A, BYER R L, et al. Octave-spanning ultrafast OPO with 26~61 μm instantaneous bandwidth pumped by femtosecond Tm-fiber laser[J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7046.

[10] PENWELL S B, WHALEY-MAYDA L, TOKMAKOFF A. Single-stage MHz mid-IR OPA using $LiGaS_2$ and a fiber laser pump source[J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1363-1366.

[11] MALIS O, GMACHL C, SIVCO D L, et al. The quantum cascade laser: a versatile high-power semiconductor laser for mid-infrared applications[J]. Bell Labs Technical Journal, 2005, 10(3): 199-214.

[12] 张泽涵,蒋 涛,湛治强,等.量子级联激光器的热管理研究进展[J].太赫兹科学与电子信息学报,2021,19(2):193-200.
ZHANG Z H, JIANG T, ZHAN Z Q, et al. The progress of quantum cascade lasers thermal management[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(2): 193-200 (in Chinese).

[13] JACKSON S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 423-431.

[14] VODOPYANOV K L, GANIKHANOV F, MAFFETONE J P, et al. $ZnGeP_2$ optical parametric oscillator with 3.8 ~ 12.4 μm tunability[J]. Optics Letters, 2000, 25(11): 841-843.

[15] HONG Z F, REZVANI S, ZHANG Q B, et al. Ultrafast mid-IR laser pulses generation via chirp manipulated optical parametric amplification[J]. Applied Sciences, 2018, 8(5): 744.

[16] DOUILLET A, ZONDY J J. Low-threshold, self-frequency-stabilized $AgGaS_2$ continuous-wave subharmonic optical parametric oscillator[J]. Optics Letters, 1998, 23(16): 1259-1261.

[17] IWAKUNI K, PORAT G, BUI T Q, et al. Phase-stabilized 100 mW frequency comb near 10 μm[J]. Applied Physics B, Lasers and Optics, 2018, 124(7): 128.

[18] LV Z, SHEN Y, ZONG N, et al. 1.53 W all-solid-state nanosecond pulsed mid-infrared laser at 6.45 μm[J]. Optics Letters, 2022, 47(6): 1359-1362.

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

[20] LIPPERT E, FONNUM H, HAAKESTAD M W. Laser source with high pulse energy at 3 ~ 5 μm and 8 ~ 12 μm based on nonlinear conversion in $ZnGeP_2$[C]//SPIE Security + Defence. Proc SPIE 9251, Technologies for Optical Countermeasures XI; and High-Power Lasers 2014: Technology and Systems, Amsterdam, Netherlands. 2014, 9251: 61-68.

[21] ZHOU P, WANG X, MA Y, et al. Review on recent progress on mid-infrared fiber lasers[J]. Laser Physics, 2012, 22(11): 1744-1751.

[22] LI J F, STUART D J, CHEN M, et al. Optimized design of high power mid-infrared Er^{3+}, Pr^{3+}-codoped ZBLAN fiber laser[C]//2010 Photonics Global Conference. Orchard, Singapore. IEEE, 2010: 1-5.

[23] BERNIER M, FAUCHER D, CARON N, et al. Highly stable and efficient erbium-doped 28 μm all fiber laser[J]. Optics Express, 2009, 17(19): 16941.

[24] ZHU X S, JAIN R. Demonstration of ≥8 Watt output from laser diode pumped mid-infrared fiber lasers[C]//2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference. Long Beach, CA, USA. IEEE, 2006: 1-2.

[25] POLLNAU M, JACKSON S D. Energy recycling versus lifetime quenching in erbium-doped 3 μm fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(2): 162-169.

[26] GOLDING P, JACKSON S, KING T, et al. Energy-transfer processes in Er^{3+}-doped and Er^{3+}, Pr^{3+}-codoped ZBLAN glasses[J]. Physical Review B, 2000, 62: 856-864.

[27] NEWBURGH G A, DUBINSKII M. Power and efficiency scaling of Er:ZBLAN fiber laser[J]. Laser Physics Letters, 2021, 18(9): 095102.

[28] BRIERLEY M C, FRANCE P W. Continuous wave lasing at 2.7 μm in an erbium-doped fluorozirconate fibre[J]. Electronics Letters, 1988, 24(15): 935.

[29] JACKSON S D, KING T A, POLLNAU M. Diode-pumped 1.7 W erbium 3 μm fiber laser[J]. Optics Letters, 1999, 24(16): 1133-1135.

[30] SANDROCK T, FISCHER D, GLAS P, et al. Diode-pumped 1 W Er-doped fluoride glass M-profile fiber laser emitting at 2.8 μm[J]. Optics Letters, 1999, 24(18): 1284-1286.

[31] ZHU X S, JAIN R. 10-W-level diode-pumped compact 278 μm ZBLAN fiber laser[J]. Optics Letters, 2006, 32(1): 26.

[32] TOKITA S, MURAKAMI M, SHIMIZU S, et al. Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3062-3064.

[33] GOYA K, UEHARA H, KONISHI D, et al. Stable 35-W Er: ZBLAN fiber laser with CaF_2 end caps[J]. Applied Physics Express, 2019, 12(10): 102007.

[34] BERNIER M, FAUCHER D, VALLÉE R, et al. Bragg gratings photoinduced in ZBLAN fibers by femtosecond pulses at 800 nm[J]. Optics Letters, 2007, 32(5): 454-456.

[35] FAUCHER D, BERNIER M, ANDROZ G, et al. 20 W passively cooled single-mode all-fiber laser at 2.8 μm[J]. Optics Letters, 2011, 36(7): 1104-1106.

[36] FORTIN V, BERNIER M, BAH S T, et al. 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm[J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2882-2885.

[37] AYDIN Y O, FORTIN V, VALLÉE R, et al. Towards power scaling of 2.8 μm fiber lasers[J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4542-4545.

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

[39] WANG J T, WEI J C, LIU W J, et al. 2.8 μm passively Q-switched Er:ZBLAN fiber laser with an Sb saturable absorber mirror[J]. Applied Optics, 2020, 59(29): 9165-9168.

[40] YU Y J, CHEN X Y, WANG C, et al. A 200 kHz Q-switched adhesive-free bond composite Nd:YVO_4 laser using a double-crystal RTP electro-

optic modulator[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(2): 024206.

[41] SHEN Y L, WANG Y S, LUAN K P, et al. High peak power actively Q-switched mid-infrared fiber lasers at 3μm[J]. Applied Physics B, 2017, 123(4): 1-6.

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

[43] SOJKA L, PAJEWSKI L, LAMRINI S, et al. Experimental investigation of actively Q-switched Er^{3+}:ZBLAN fiber laser operating at around 2.8 μm[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(16): 4642.

[44] SÓJKA L, PAJEWSKI L, LAMRINI S, et al. High peak power Q-switched Er:ZBLAN fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(20): 6572-6578.

[45] SHEN Y L, WANG Y S, ZHU F, et al. 200 μJ, 13 ns Er:ZBLAN mid-infrared fiber laser actively Q-switched by an electro-optic modulator[J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 1141-1144.

[46] TOKITA S, MURAKAMI M, SHIMIZU S, et al. Graphene Q-switching of a 3 μm Er:ZBLAN fiber laser[C]//Advanced Solid-State Lasers Congress. Paris. Washington, D.C.: OSA, 2013: AF2A.9.

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

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

[49] TANG P H, WU M, WANG Q K, et al. 2.8 μm pulsed Er^{3+}:ZBLAN fiber laser modulated by topological insulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(14): 1573-1576.

[50] SHEN Y L, WANG Y S, LUAN K P, 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: 26659.

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

[52] WANG S W, TANG Y L, YANG J L, et al. MoS_2 Q-switched 2.8 μm Er:ZBLAN fiber laser[J]. Laser Physics, 2019, 29(2): 025101.

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

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

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

[56] QIN Z P, CHAI X L, XIE G Q, et al. Semiconductor saturable absorber mirror in the 3 ~ 5 μm mid-infrared region[J]. Optics Letters, 2022, 47(4): 890-893.

[57] CIZMECIYAN M N, KIM J W, BAE S, et al. Graphene mode-locked femtosecond Cr:ZnSe laser at 2 500 nm[J]. Optics Letters, 2013, 38(3): 341-343.

[58] SOTOR J, SOBON G, KOWALCZYK M, et al. Ultrafast thulium-doped fiber laser mode locked with black phosphorus[J]. Optics Letters, 2015, 40(16): 3885-3888.

[59] MAO D, SHE X Y, DU B B, et al. Erbium-doped fiber laser passively mode locked with few-layer $WSe_2/MoSe_2$ nanosheets[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 23583.

[60] MA J, XIE G Q, LV P, et al. Graphene mode-locked femtosecond laser at 2 μm wavelength[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2085-2087.

[61] ZHU G W, ZHU X S, WANG F Q, et al. Graphene mode-locked fiber laser at 2.8 μm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(1): 7-10.

[62] PAWLISZEWSKA M, GE Y Q, LI Z J, et al. Fundamental and harmonic mode-locking at 2.1 μm with black phosphorus saturable absorber[J]. Optics Express, 2017, 25(15): 16916-16921.

[63] QIN Z P, XIE G Q, ZHAO C J, et al. Mid-infrared mode-locked pulse generation with multilayer black phosphorus as saturable absorber[J]. Optics Letters, 2016, 41(1): 56-59.

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

[65] YAN Z Y, LI T, ZHAO J, et al. Passively Q-switched 2.85 μm Er: Lu_2O_3 laser with WSe_2[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(8): 085802.

[66] GUO C Y, WEI J C, YAN P G, et al. Mode-locked fiber laser at 2.8 μm using a chemical-vapor-deposited WSe_2 saturable absorber mirror[J]. Applied Physics Express, 2020, 13(1): 012013.

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

[68] QIN Z P, XIE G Q, GU H A, et al. Mode-locked 2.8 μm fluoride fiber laser: from soliton to breathing pulse[J]. Advanced Photonics, 2019,

1: 065001.

[69] GU HONGAN, QIN Z P, XIE G Q, et al. Generation of 131 fs mode-locked pulses from 2.8 μm Er: ZBLAN fiber laser[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(3): 031402.

[70] HUANG J, PANG M, JIANG X, et al. Sub-two-cycle octave-spanning mid-infrared fiber laser[J]. Optica, 2020, 7(6): 574.

[71] ZHOU Y C, QIN Z P, YUAN P, et al. 2-MW peak-power pulses from a dispersion-managed fluoride fiber amplifier at 2.8 μm[J]. Optics Letters, 2021, 46(20): 5104.

[72] CUI Y F, CHEN M S, DU W Z, et al. Generation of 85 fs mid-IR pulses with up to 2.4 W average power using an Er: ZBLAN fiber mode-locked oscillator and a nonlinear amplifier[J]. Optics Express, 2021, 29(26): 42924.

[73] YU L P, LIANG J H, HUANG S T, et al. Average-power (4.13 W) 59 fs mid-infrared pulses from a fluoride fiber laser system[J]. Optics Letters, 2022, 47(10): 2562-2565.

[74] LIBATIQUE N J C, TAFOYA J D, VISWANATHAN N, et al. A "field-usable" diode-pumped/spl sim/120-nm wavelength-tunable CW mid-IR fiber laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000). Technical Digest. Postconference Edition. TOPS Vol. 39 (IEEE Cat. No. 00CH37088). San Francisco, CA, USA. IEEE,: 548-549.

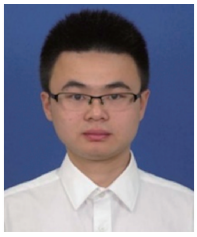
[75] ZHU X S, JAIN R. Compact 2 W wavelength-tunable Er: ZBLAN mid-infrared fiber laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2381-2383.

[76] TOKITA S, HIROKANE M, MURAKAMI M, et al. Stable 10 W Er: ZBLAN fiber laser operating at 2.71 ~ 2.88 μm[J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 3943-3945.

[77] 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. San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2016: AW1K.7.

[78] WEI C, LUO H Y, SHI H X, et al. Widely wavelength tunable gain-switched Er^{3+}-doped ZBLAN fiber laser around 28 μm[J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8816.

[79] WANG J F, ZHU X S, NORWOOD R A, et al. Widely wavelength tunable Dy^{3+}/Er^{3+} co-doped ZBLAN fiber lasers[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 38646.



姜益光,男,博士,中科院上海光机所副研究员,博士生导师。长期致力于低声子氟化物光功能材料的应用研究,以第一/通信作者身份在 *Mater. Design*, *J. Eur. Ceram. Soc.*, *J. Am. Ceram. Soc.*, *Opt. Lett.* 等期刊上发表 SCI 论文 16 篇,博士论文获中国硅酸盐学会优秀博士学位论文提名奖。入选中国科协"青年人才托举工程"、中科院"青促会"、上海市"超级博士后"和"扬帆计划"、上海光机所"卓越尚光青年创新人才"等。获上海市技术发明一等奖、中科院院长奖、宝钢奖、上海市优秀毕业生等奖项。