

3 μm 中红外稀土掺杂光纤激光器研究进展

李维炜, 张小金, 王航, 罗正钱*

厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005

摘要 介绍了 3 μm 光纤激光器常用的光纤基质和稀土增益离子, 分析了 3 μm 稀土掺杂光纤激光器的工作原理, 并且从不同研究视角回顾了 3 μm 稀土掺杂光纤激光器的研究进展。其中, 锁模中红外光纤激光器、小型化全光纤中红外激光器和 3~4 μm 更长波长的中红外光纤激光器是目前研究的主要趋势和热点。随着 3 μm 中红外光纤激光相关技术的迅速发展, 结构更紧凑、性能更优异的 3 μm 光纤激光器不断涌现, 必将大大推动其商业化和实用化的进程, 更好地满足不同领域的应用需求。

关键词 激光器; 光纤激光器; 中红外; 稀土离子; 氟化物光纤; 小型化

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170605

Research Progress of Mid-Infrared Rare Earth Ion-Doped Fiber Lasers at 3 μm

Li Weiwei, Zhang Xiaojin, Wang Hang, Luo Zhengqian*

Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Fujian, Xiamen 361005, China

Abstract Herein, fiber hosts and rare earth gain ions commonly used in 3- μm fiber lasers are introduced, and the working principle of 3- μm rare earth ion-doped fiber lasers is briefly analyzed. Further, research progress on various 3- μm rare earth ion-doped fiber lasers is reviewed, revealing that mode-locked mid-infrared fiber lasers, miniaturized mid-infrared all-fiber lasers, and mid-infrared fiber lasers with long wavelengths of 3-4 μm are currently hot research topics. With the rapid development of 3- μm mid-infrared fiber lasers in recent years, 3- μm fiber lasers with a compact structure and excellent performance are emerging, which will greatly promote their commercialization and practical application in addition to fulfilling the requirements of different fields.

Key words lasers; fiber lasers; mid-infrared; rare-earth ion; fluoride fiber; miniaturization

OCIS codes 140.3510; 140.3070; 060.2390; 160.5690

1 引言

从 1917 年爱因斯坦首次提出受激辐射理论, 到 1960 年美国工程师梅曼制造出世界上第一台激光器, 再到 2018 年诺贝尔物理学奖授予激光物理学的“啁啾脉冲放大技术”和“光学镊子”, 整整 100 年的时间, 光学的应用领域因为激光技术的出现发生了巨大的变化。相比于传统光源, 激光具有很好的方向性、单色性、相干性, 以及高亮度和大能量等优势, 这些优势使得激光器在航天、军事、医疗、工业加工

等诸多领域发挥着至关重要的作用。

尤其是工作波长位于 3 μm 的中红外激光器, 因水分子以及大气中很多气体分子的吸收峰波长恰好位于 3 μm 而被广泛应用于遥感、大气监测、光谱学和军事领域。由于人体组织中的主要成分是水分子, 所以 3 μm 激光器还是激光医疗领域所需的理想光源, 并已被应用于各种激光手术当中^[1]。目前, 常见的 3 μm 中红外激光器主要包括传统的固体激光器^[2]、量子级联激光器^[3]、光学参量放大器^[4], 以及使用稀土离子掺杂的氟化物光纤作为增益介质的

收稿日期: 2019-06-03; 修回日期: 2019-07-09; 录用日期: 2019-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(61475129)、福建省特殊支持“双百计划”青年拔尖人才项目、厦门大学中央高校基本科研业务费(20720180057)

* E-mail: zqluo@xmu.edu.cn

光纤激光器^[5]这几种类型。近年来,3 μm 中红外光纤激光器由于具有稳定的工作状态、较好的光束质量、较高的转换效率和低成本等优势而受到青睐,并经过广泛的研究得到迅速发展。

本文对3 μm 稀土离子掺杂光纤激光器常用的光纤基质和增益离子进行介绍,进而分析激光产生机理,接着从不同方面对3 μm 光纤激光器的研究进展进行归纳和总结,并且阐述本课题组在3 μm 光纤激光器领域所做的研究工作,最后展望3 μm 光纤激光器未来的发展趋势和应用前景。

2 稀土掺杂3 μm 光纤激光器的增益介质

2.1 增益光纤基质

自从1961年第一台光纤激光器诞生^[6]以来,不同种类的光纤被陆续应用于光纤激光器中,其中,最常用且发展最成熟的是石英光纤。石英光纤虽然在近红外波段的激光应用中大放异彩,但是对2.5 μm 以上波长的激光具有强烈的本征吸收,并且具有过高的声子能量,这大大限制了其中红外波段的应用。相比之下,被称为“软玻璃光纤”的氟化物光纤却在3 μm 以及更长波长的中红外区域具有很好的透明性。因此,3 μm 中红外光纤激光器通常采用稀土离子掺杂的氟化物光纤作为激光增益介质。氟化物光纤最常采用的材料是一种叫做“ZBLAN”的多组分氟化物玻璃,这种材料是稳定性最好、最容易制备的红外玻璃之一,其经典组分(摩尔分数)为53% ZrF_4 ,20% BaF_2 ,4% LaF_3 ,3% AlF_3 和20% NaF ,为了增大光纤纤芯的折射率,常常会加入一定量的 PbF_2 。在3 μm 光纤激光器经历的三十年发展历程中,大多数研究都是采用ZBLAN光纤作为增益光纤基质。除了ZBLAN光纤,近年来也有一些新型的氟化物光纤被用于中红外光纤激光器的相关研究中,如氟化铝光纤和氟化铟光纤,其中,氟化铟光纤在大于3.5 μm 的波长范围展现出比ZBLAN光纤更低的声子能量、更低的损耗和更好的透明度,被视为长波长中红外光纤激光器的更优选择。

除了氟化物光纤,锗酸盐光纤、碲化物光纤、硫化物光纤在中红外波段也具有很好的透明性,在中红外光纤激光器中也有应用潜力。然而,锗酸盐光纤和碲化物光纤中氢氧根含量仍有待降低,而硫化物光纤面临着金属阳离子掺杂困难的挑战^[1],这些问题都会阻碍中红外激光的产生,因此,基于这几种光纤的稀土离子掺杂中红外光纤激光器还未

见报道。

2.2 增益离子

工作在3 μm 波段的中红外光纤激光器使用的增益光纤主要包括掺 Er^{3+} ($\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$)、掺 Ho^{3+} ($\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$)和掺 Dy^{3+} 的氟化物光纤,借助 Er^{3+} 的能级跃迁 ${}^4\text{I}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ (图1)、 Ho^{3+} 的能级跃迁 ${}^5\text{I}_6 \rightarrow {}^5\text{I}_7$ (图2),以及 Dy^{3+} 的能级跃迁 ${}^6\text{H}_{13/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$ (图3)来实现3 μm 波段的激光发射。

对掺 Er^{3+} 光纤激光器^[7-101]而言,如图1所示,主要使用650,790,980 nm等波长的激光作为抽运源,当使用波长为650 nm和790 nm的激光抽运时,基态(${}^4\text{I}_{15/2}$)粒子吸收抽运光之后分别跃迁到 ${}^4\text{F}_{9/2}$ 能级和 ${}^4\text{I}_{9/2}$ 能级,经过短暂的弛豫之后无辐射跃迁到3 μm 激光上能级 ${}^4\text{I}_{11/2}$,而波长为980 nm的抽运光可以直接将基态粒子抽运到 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级,因此理论上具有更高的量子效率,也是最常用的抽运波长。激光上能级的粒子最后经过受激辐射跃迁到激光下能级 ${}^4\text{I}_{13/2}$,同时产生3 μm 激光。需要注意的是,3 μm 激光的上能级寿命($\tau_1 \approx 6.9$ ms)相比下能级寿命($\tau_2 \approx 9$ ms)明显更短, Er^{3+} 能级系统中3 μm 激光的受激辐射实际上是一个自终止的过程,由此提高了对抽运速率和激光阈值的要求,降低了激光器的效率^[22]。为了克服粒子数瓶颈这个问题并提升3 μm 激光的输出功率,人们提出三种不同的解决途径。第一种途径是使激光器发生3 μm 和1.55 μm 激光的级联激射^[22],因为1.55 μm 激光的受激辐射发生在3 μm 激光下能级 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 与基态 ${}^4\text{I}_{15/2}$ 之间,能够有效消耗 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级的粒子数,从而有助于实现3 μm 激光激射所需的粒子数反转。这种方法适用于低掺杂和单包层增益光纤,不适用于高功率或双包层的掺 Er^{3+} 光纤激光器。第二种途径是使用 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺的氟化物增益光纤^[41],其中, Er^{3+} 作为提供3 μm 激光增益的激活离子, Pr^{3+} 作

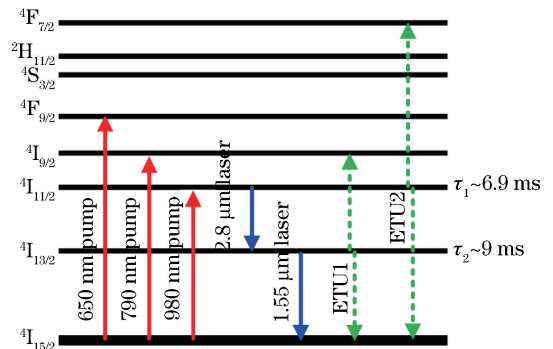


图1 Er^{3+} 简化能级跃迁图

Fig. 1 Simplified energy-level transition diagram of Er^{3+}

为钝化剂,通过 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级与 Pr^{3+} 的 $^3\text{F}_3$ 能级之间的能量转移减少 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级(即 $3\ \mu\text{m}$ 激光下能级)的粒子数。第三种途径是使用高掺杂浓度的增益光纤^[42],通过高掺杂浓度增强 Er^{3+} 与 Er^{3+} 之间的能量转移上转换(ETU),ETU 过程主要包括 $^4\text{I}_{13/2}$, $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{I}_{15/2}$ (ETU1) 和 $^4\text{I}_{11/2}$, $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}$, $^4\text{I}_{15/2}$ (ETU2) 同时存在的上转换过程,如图 1 所示。这种方法已被证明能有效减轻粒子数瓶颈问题,并显著提高 $3\ \mu\text{m}$ 掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器的工作效率。

对掺 Ho^{3+} 光纤激光器^[102-152] 而言,如图 2 所示,常常采用 $640, 890, 1150\ \text{nm}$ ($1.15\ \mu\text{m}$) 等波长的激光作为抽运源,其中, $640\ \text{nm}$ 抽运光可以将 Ho^{3+} 从基态 $^5\text{I}_8$ 能级抽运到 $^5\text{F}_5$ 能级, $890\ \text{nm}$ 抽运光可以将 Ho^{3+} 抽运到 $^5\text{I}_5$ 能级,而 $1150\ \text{nm}$ 波段的抽运光可以直接将 Ho^{3+} 抽运到 $3\ \mu\text{m}$ 激光的上能级,即 $^5\text{I}_6$ 能级,由于抽运效率很高, $1150\ \text{nm}$ 抽运光是目前 $3\ \mu\text{m}$ 掺 Ho^{3+} 氟化物光纤激光器中最常用的抽运源。与 Er^{3+} 类似,在 Ho^{3+} 的能级系统中, $3\ \mu\text{m}$ 激光的上能级寿命 ($\tau_1 \approx 3.5\ \text{ms}$) 明显短于下能级寿命 ($\tau_2 \approx 12\ \text{ms}$), 因此,掺 Ho^{3+} 氟化物光纤激光器同样存在粒子数瓶颈的问题,是一个自终止过程^[104]。解决这个问题的方案也与前文所述相似:一是通过谐振腔结构的设计,使激光器实现 $3\ \mu\text{m}$ 激光与 $2\ \mu\text{m}$ 激光的级联激射^[105], $2\ \mu\text{m}$ 激光的上能级 $^5\text{I}_7$ 正好是 $3\ \mu\text{m}$ 激光的下能级,因此 $2\ \mu\text{m}$ 激光的产生能有效减少 $3\ \mu\text{m}$ 激光下能级的粒子数,有利于实现 $3\ \mu\text{m}$ 激光能级的粒子数反转;二是使用 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺的氟化物增益光纤^[107],通过 Ho^{3+} 与 Pr^{3+} 之间的能量转移过程 $^5\text{I}_7 \rightarrow ^3\text{F}_2$, $^3\text{H}_6$ 消耗 $3\ \mu\text{m}$ 激光下能级的粒子数,高能级的 Pr^{3+} 随后通过多声子辐射跃迁回到基态;三是高掺杂 Ho^{3+} 的增益光纤中同样存在着能量转移上转换过程^[108],如图 2 所示,在高

掺杂 Ho^{3+} 的光纤中, $^5\text{I}_7$, $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_6$, $^5\text{I}_8$ (ETU1) 与 $^5\text{I}_7$, $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_5$, $^5\text{I}_8$ (ETU2) 这两种过程同时存在,并可同时减少 $3\ \mu\text{m}$ 激光下能级粒子数。

Dy^{3+} 是 $3\ \mu\text{m}$ 激光领域发展最晚的增益离子,也是近两年研究最热、最受瞩目的增益离子。如图 3 所示, $3\ \mu\text{m}$ 掺 Dy^{3+} 光纤激光器^[153-167] 可以使用波长为 $1.1, 1.3, 1.7\ \mu\text{m}$ 的激光作为抽运源。其中, $1.1\ \mu\text{m}$ 的抽运光可以将位于基态 $^6\text{H}_{15/2}$ 的粒子抽运到 $^6\text{H}_{7/2}$ 能级和 $^6\text{F}_{9/2}$ 能级, $1.3\ \mu\text{m}$ 的抽运光可以将位于基态 $^6\text{H}_{15/2}$ 的粒子抽运到 $^6\text{H}_{9/2}$ 能级和 $^6\text{F}_{11/2}$ 能级,而基态粒子吸收 $1.7\ \mu\text{m}$ 的抽运光后可以跃迁到 $^6\text{H}_{11/2}$ 能级。被抽运到高能级的粒子经过无辐射跃迁到达 $3\ \mu\text{m}$ 激光的上能级 $^6\text{H}_{13/2}$, 最终受激辐射产生 $3\ \mu\text{m}$ 激光,同时回到基态能级。随着半导体激光器抽运的掺 Yb^{3+} 光纤激光器和掺 Nd^{3+} 固体激光器不断发展成熟, $1.1\ \mu\text{m}$ 和 $1.3\ \mu\text{m}$ 波长的激光开始被用作 $3\ \mu\text{m}$ 掺 Dy^{3+} 光纤激光器的抽运源^[153-154]。然而,这两种波长的抽运光也会引入激发态吸收和上转换过程,导致抽运效率相对较低,激光阈值较高。于是,人们开始探索更高效的抽运波长, $1.7\ \mu\text{m}$ 激光因具有更低的量子损耗而被视为一种新的选择^[161],但是目前仍然缺乏商业化和发展成熟的 $1.7\ \mu\text{m}$ 激光源。由于输出波长为 $2.8\ \mu\text{m}$ 的中红外掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器不断发展成熟且能够获得较高输出功率,近年来,也有报道将其作为激光抽运源^[156-158],并带内抽运掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器,产生更长波长(如 $3.2\ \mu\text{m}$) 的中红外激光。

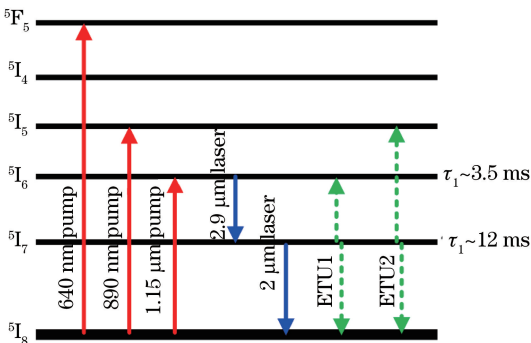


图 2 Ho^{3+} 简化能级跃迁图

Fig. 2 Simplified energy-level transition diagram of Ho^{3+}

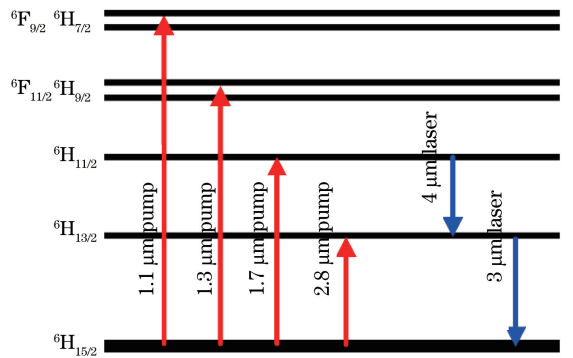


图 3 Dy^{3+} 简化能级跃迁图

Fig. 3 Simplified energy-level transition diagram of Dy^{3+}

3 稀土离子掺杂 $3\ \mu\text{m}$ 光纤激光器的研究进展

3.1 $3\ \mu\text{m}$ 光纤激光器输出功率的发展

本部分将介绍 $3\ \mu\text{m}$ 光纤激光器在输出功率方

面的进展。首先,总结三种不同的 $3\ \mu\text{m}$ 光纤激光器输出功率提升的典型报道,如表 1 所示。

由表 1 可以看出,关于提升 $3\ \mu\text{m}$ 光纤激光器输出功率的相关探索大多围绕掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器展开,这主要是因为掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器通常采用 $980\ \text{nm}$ 半导体激光器来抽运,相比掺 Ho^{3+} 和掺 Dy^{3+}

的光纤激光器具有成本更低、更易获得的高功率抽运源。而 $980\ \text{nm}$ 的商用半导体激光器的发展成熟也进一步推动了掺 Er^{3+} 中红外光纤激光器的迅速发展,目前掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器是中红外光纤激光器家族中发展最成熟的一种类型,不同性能、不同特征的 $3\ \mu\text{m}$ 掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器被陆续研究报道。

表 1 $3\ \mu\text{m}$ 光纤激光器输出功率提升的典型报道

Table 1 Typical reports on improvement of output power of $3\text{-}\mu\text{m}$ fiber lasers

Year	Gain ion	Pump wavelength /nm	Output power /W	Slope efficiency /%	Laser wavelength / μm	Reference
1988	Er^{3+}	476.5	—	—	2.7	[7]
1990	Er^{3+}	792	330×10^{-6}	3	2.71-2.78	[10]
1995	Er^{3+}	791	158×10^{-3}	22.6	2.71	[21]
1999	$\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	790	1.7	17.3	2.71	[29]
2004	Er^{3+}	976	3.5	—	2.8	[39]
2007	Er^{3+}	975	9	21.3	2.785	[41]
2009	Er^{3+}	975	24	14.5	2.8	[47]
2015	Er^{3+}	980	30.5	16	2.938×10^{-3}	[64]
2018	Er^{3+}	980	41.6	22.9	2.824×10^{-3}	[91]
1990	Ho^{3+}	640	12.6×10^{-3}	4.4	2.83-2.95	[102]
1999	Ho^{3+}	1150	1.4	30	—	[105]
2004	Ho^{3+}	1100	2.5	29	2.86	[109]
2015	Ho^{3+}	1150	7.2	29	2.83×10^{-3} - 2.98×10^{-3}	[130]
2003	Dy^{3+}	1100	0.275	4.5	2.9	[153]
2006	Dy^{3+}	1300	0.18	20	2.96	[154]
2018	Dy^{3+}	2830	1.06	73	3.15	[162]
2019	Dy^{3+}	2830	10.1	58	3.24	[165]

早在 20 世纪 80 年代初,人们就在以晶体为掺杂基质的激光器中获得了 $3\ \mu\text{m}$ 中红外激光^[168-170]。到了 1988 年,基于掺 Er^{3+} 块状氟化物玻璃的 $2.7\ \mu\text{m}$ 中红外激光器被报道^[171],同年, Brierley 等^[7]报道了第一台工作波长位于 $2.7\ \mu\text{m}$ 的中红外连续光(CW)运转的掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器,他们采用 $476.5\ \text{nm}$ 波长的氩离子激光器作为抽运源,位于激光下能级($^4\text{I}_{13/2}$)的粒子通过激发态吸收跃迁到 $^4\text{G}_{7/2}$, $^2\text{K}_{15/2}$, $^4\text{G}_{9/2}$ 能带,这个方法有效保证了激光上下能级粒子数的反转状态。此后,不同波长的抽运光被相继用于 $2.7\ \mu\text{m}$ 的掺 Er^{3+} 光纤激光器。1990 年, Allen 等^[11]首次报道了半导体激光器抽运的中红外掺 Er^{3+} 光纤激光器,获得了中心波长位于 $2.71, 2.75, 2.78\ \mu\text{m}$ 处的连续激光,他们在 $792\ \text{nm}$ 的抽运波长处获得了 $4\ \text{mW}$ 的低激光阈值。1993 年, Frerichs 等^[13]采用 $650, 795, 980\ \text{nm}$ 三种波长的光源分别抽运 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺的氟化物增益光纤,获得了接近 $30\ \text{mW}$ 的输出功率^[17]。1995 年, Pollnau 等^[21]报道的 $1.72\ \mu\text{m}$ 和 $2.71\ \mu\text{m}$ 双波

长 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器将 $2.7\ \mu\text{m}$ 激光输出功率进一步提升到了 $158\ \text{mW}$ 。

随着高功率半导体激光器的发展,中红外掺 Er^{3+} 光纤激光器的输出功率在 1999 年突破了瓦级。Srinivasan 等^[28]和 Jackson 等^[29]使用 $790\ \text{nm}$ 的半导体激光器抽运 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺的双包层氟化物增益光纤,分别在 $2.7\ \mu\text{m}$ 波段获得了 $660\ \text{mW}$ 和 $1.7\ \text{W}$ 的输出功率。Sandrock 等^[30]使用 $970\ \text{nm}$ 半导体激光器抽运的长度仅为 $54\ \text{cm}$ 的 M 形掺 Er^{3+} 氟化物光纤,获得了最大功率为 $1.04\ \text{W}$ 的 $2.79\ \mu\text{m}$ 中红外激光。到了 2007 年, Zhu 等^[41]使用 $100\ \text{W}$ 的 $975\ \text{nm}$ 半导体激光器阵列抽运高掺杂 Er^{3+} 的双包层氟化物光纤,获得了 $9\ \text{W}$ 的中红外激光输出。

输出功率的第二次巨大突破发生在 2009 年, Tokita 等^[47]报道了一台由 $975\ \text{nm}$ 半导体激光器抽运的 D 形双包层掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器,输出功率高达 $24\ \text{W}$ 。为了防止热效应带来的损伤,他们将整根增益光纤浸入氟碳液体制冷剂当中,使其保持

20 °C 的恒温。2011 年,加拿大 Laval 大学的 Faucher 等^[50]在被动制冷的 2.8 μm 掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器中获得了 20 W 的单模运转最大功率,值得一提的是,他们将光纤布拉格光栅直接刻写在未掺杂的氟化物光纤上,再分别与抽运源输出尾纤和增益光纤熔接在一起,构成了全光纤系统。2015 年,使用类似的结构,Laval 组的 Fortin 等^[64]进一步将 3 μm 掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器的输出功率提升到了 30.5 W,激光输出波长由之前的 2.825 μm 红移到 2.938 μm 。2018 年,Laval 组的 Aydin 等^[91]直接将两个光纤布拉格光栅刻写在掺 Er^{3+} 氟化物增益光纤上以减少腔内的熔接点,在 3 μm 波段获得了 41.6 W 的输出功率,这也是现有报道中的最高纪录。

对掺 Ho^{3+} 氟化物光纤激光器而言,由于缺乏高功率半导体激光器作为抽运源,输出功率的提升没有中红外掺 Er^{3+} 光纤激光器那么显著。1990 年,Wetenkamp^[102]报道了第一台运转在 3 μm 波段的中红外掺 Ho^{3+} 氟化物光纤激光器,采用 640 nm 波长的激光抽运,获得了 2.83~2.95 μm 波长范围的连续激光和 12.6 mW 的最高输出功率。

1997 年,Sumiyoshi 等^[103]报道的 3 μm 和 2 μm 双波长级联激光器使用波长为 890 nm 的掺钛蓝宝石激光器抽运双包层掺 Ho^{3+} 氟化物光纤,获得了 40 mW 的混合输出功率,其中 3 μm 激光器的输出功率为 27 mW。1999 年,Sumiyoshi 等^[105]改用 1.15 μm 的拉曼光纤激光器抽运 2.5 m 掺 Ho^{3+} 氟化物光纤,产生的 3 μm 和 2 μm 双波长激光具有 3 W 的混合功率,其中 3 μm 中红外激光功率突破 1.4 W。这个结果充分显示了 1.15 μm 波段激光作为 3 μm 掺 Ho^{3+} 氟化物光纤激光器抽运源的巨大潜力。2004 年,Jackson^[109]使用 1.1 μm 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器抽运 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺单包层氟化物增益光纤,在 2.86 μm 处获得了 2.5 W 的最高输出功率。2009 年,Jackson^[114]使用 1150 nm 波长的半导体激光器抽运双包层 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺氟化物光纤,在 2.94 μm 处获得了 2.5 W 的输出功率,激光器的斜率效率达到 32%。

此后几年,针对中红外掺 Ho^{3+} 光纤激光器的研究主要聚焦于调 Q 运转、锁模运转等丰富的时域特性和波长调谐性能,输出功率并没有明显提升。直到 2015 年,Jackson 组^[130]使用 1.15 μm 的高功率拉曼光纤激光器抽运 9 m 长的双包层 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺氟化物光纤,获得了 7.2 W 的最大输出功率,这

是迄今为止 3 μm 掺 Ho^{3+} ($\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺)氟化物光纤激光器在平均输出功率的最高纪录。

虽然基于 Dy^{3+} 的 3 μm 中红外激光器早在 1973 年就被报道^[172],但是直到 30 年后,中红外掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器才正式登上历史舞台。2003 年,Jackson^[153]使用输出波长位于 1.1 μm 的掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器抽运单包层掺 Dy^{3+} 氟化物增益光纤,在 2.9 μm 波段获得了 0.275 W 的最大输出功率和 4.5% 的斜率效率,他把实验中较低的斜率效率和较高的激光阈值归结为 Dy^{3+} 对 2.9 μm 激光强烈的基态吸收作用。2006 年,曼彻斯特大学的 Tsang 等^[154]报道了一台由 1.3 μm 波长的 Nd:YAG 激光器抽运的掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器,他们选用长度分别为 60 cm 和 77 cm、掺杂粒子数浓度为 1000×10^{-6} 的增益光纤,最终产生的激光中心波长为 2.96 μm ,最低阈值为 0.5 W,最大功率为 0.18 W,最高斜率效率为 20%。

除了早期的 1.1 μm 和 1.3 μm 激光抽运源,最近,1.7 μm 激光也开始被用于抽运掺 Dy^{3+} 氟化物光纤。2018 年,Jackson 组^[161]报道了 1.7 μm 拉曼光纤激光器抽运的掺 Dy^{3+} 光纤激光器,当使用 26 cm 长的增益光纤时,获得了 0.17 W 的最大输出功率和 21% 的斜率效率,他们采用衍射光栅进行波长调谐,最终在 3 μm 波段实现了 573 nm 的宽调谐范围(2807~3380 nm)。同年,他们^[167]首次使用 1.7 μm 激光抽运 30 cm 的掺 Dy^{3+} 氟化物钢光纤,输出激光中心波长位于 2945 nm 处,同时还获得了波长超过 4 μm 的中红外荧光发射。

随着高功率中红外掺 Er^{3+} 光纤激光器的发展,Jackson 组也进行了 2.8 μm 掺 Er^{3+} 光纤激光器带内抽运掺 Dy^{3+} 氟化物光纤的相关研究。2016 年,他们^[156]报道的带内抽运掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器达到了 51% 的高斜率效率,最大输出激光波长为 3.26 μm 。2018 年,他们^[163]将频移反馈技术(Frequency shifted feedback)与带内抽运相结合,得到了 2.97~3.30 μm 可调谐锁模运转的掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器。

然而,以上研究中激光器的输出功率均为毫瓦量级,未有明显突破。直到 2018 年 4 月,Jackson 组^[162]使用二向色镜和光纤光栅构成线形腔,在带内抽运的掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器中获得了 1.06 W 的最大输出功率,激光器的中心波长位于 3.15 μm ,并且具有 73% 的斜率效率,这是所有中红外光纤激光器中的最高效率。2019 年,Laval 组的

Fortin 等^[165]通过使用波长为 2.83 μm 、最大输出功率高达 19 W 的掺 Er^{3+} 光纤激光器进行带内抽运,将掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器的输出功率提升到了 10.1 W 的现有最高纪录,3.24 μm 的中红外激光波长由实验中使用的光纤光栅所决定。

3.2 3 μm 调 Q 光纤激光器的发展

调 Q 技术作为光纤激光器中最常用的脉冲产生技术之一,主要包括主动调 Q 技术和被动调 Q 技术两种类型。世界上第一台工作在近红外波段的调 Q 光纤激光器于 1986 年问世^[173],而第一台工作在 3 μm 中红外波段的调 Q 光纤激光器诞生于 1994 年。在此后的 25 年中,采用主动调 Q 技术和被动调 Q 技术的光纤激光器被相继报道,现将两者进行归纳。

1) 3 μm 主动调 Q 光纤激光器

1994 年,Frerichs 等^[15]首次在 3 μm 波段的光纤激光器中实现调 Q 运转。在实验中,他们分别采用声光调制器(AOM)和旋转反射镜作为主动调 Q 器件,其中,使用声光调制器主动调 Q 获得了 100 ns 的最小脉宽和 2.2 W 的峰值功率,使用旋转反射镜主动调 Q 获得了 270 ns 的最小脉宽。

2004 年,曼彻斯特大学的 Coleman 等^[38]使用机械旋转快门作为主动调 Q 开关,在 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器中实现了最高平均功率为 19 mW、最小脉宽为 250 ns 的调 Q 脉冲输出。

2011 年,日本京都大学的 Tokita 等^[52]在被动制冷的掺 Er^{3+} 光纤激光器中使用声光调制器,获得的 2.8 μm 主动调 Q 激光具有超过 12 W 的平均功率,最小脉冲宽度为 90 ns,最高单脉冲能量为 100 μJ ,对应的峰值功率为 0.9 kW。

2012 年,Jackson 组^[119]首次报道了基于声光调制器的双波长级联调 Q 掺 Ho^{3+} 光纤激光器,实验中,他们在 3.005 μm 获得了 29 μJ 的脉冲能量和 380 ns 的脉冲宽度,在 2.074 μm 处获得了 7 μJ 的脉冲能量和 260 ns 的脉冲宽度。此后,他们还分别在 2.9 μm ^[118] 和 2.87 μm ^[123] 的 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器中实现了主动调 Q 运转。在此基础上,2013 年,电子科技大学的 Li 等^[126]将衍射光栅应用于类似的装置中,首次在双波长主动调 Q 掺 Ho^{3+} 光纤激光器中实现了波长可调谐运转,80 nm 的调谐范围覆盖 2.95 μm 到 3.031 μm 。

近几年,除了 2016 年至 2018 年报道的几例分别基于机械 Q 开关^[68]和体布拉格光栅^[94]的 2.8 μm 主动调 Q 掺 Er^{3+} 光纤激光器以外,几乎没有其他中

红外主动调 Q 光纤激光器的相关报道。

2) 3 μm 被动调 Q 光纤激光器

由前面的调研可以看出,主动调 Q 技术常常需要在激光谐振腔内使用电光调制器、声光调制器等幅度调制器,这会导致激光系统变得复杂,稳定性变差,成本增加。因此,使用饱和吸收体作为 Q 开关的被动调 Q 光纤激光器由于具有成本低廉、结构紧凑的优势成为了中红外领域的研究热点,尤其是随着近年来以石墨烯为代表的纳米材料大量涌现,越来越多的研究开始采用不同形式的纳米材料作为饱和吸收体,用于被动调 Q 光纤激光器。在 3 μm 波段,目前已被报道的用于被动调 Q 光纤激光器的饱和吸收体包括 InAs 外延层、液化镓反射镜、 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体和薄膜、半导体饱和吸收镜(SESAM)、二维材料(石墨烯、拓扑绝缘体、过渡金属硫化物、黑磷)和金纳米粒子。

1996 年,Frerichs 等^[24]首次报道了工作在 3 μm 波段的被动调 Q 光纤激光器,他们使用 InAs 外延层作为饱和吸收体插入到掺 Er^{3+} 光纤激光器中,并研究了 InAs 层厚度对调制作用的影响。2000 年,Libatique 等^[33]将液化镓反射镜用于半导体激光器抽运的双包层掺 Er^{3+} 光纤激光器中,获得了 7 μs 脉宽的中红外调 Q 脉冲,然而峰值功率仅为 5.4 mW,单脉冲能量约为 38 nJ。此后的十几年,由于在中红外波段缺乏有效可靠的饱和吸收体,几乎没有 3 μm 被动调 Q 光纤激光器的相关报道。

直到 2012 年,亚利桑那大学的 Wei 等^[55]首次将 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体用于掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器中,最终在 2.8 μm 波长处实现了稳定的被动调 Q 运转,输出的最小脉冲宽度为 370 ns,最高脉冲重复频率为 161 kHz,平均功率为 318 mW,对应的峰值功率为 5.34 W,单脉冲能量为 2.0 μJ 。次年,亚利桑那大学又报道了将 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体和石墨烯用于被动调 Q 中红外掺 Ho^{3+} 光纤激光器和掺 Er^{3+} 光纤激光器的实验研究^[127],正式开启了将二维纳米材料作为中红外被动调 Q 光纤激光器饱和吸收体的时代。

受益于二维材料技术的迅速发展,人们开始积极探索可以作为 3 μm 激光有效 Q 开关的不同材料,国内的几个研究小组成为了主力军。石墨烯之后,拓扑绝缘体、黑磷、过渡金属硫化物等材料的相关研究被相继报道。

2015 年,Li 组^[133]首次使用拓扑绝缘体碲化铋作为掺 Ho^{3+} 氟化物光纤激光器的 Q 开关,在

2979.9 nm波长处获得了稳定的被动调 Q 脉冲,表明了拓扑绝缘体用于 $3\ \mu\text{m}$ 中红外激光脉冲产生的巨大潜力。2016年,湖南大学的 Tang 等^[80]进一步将碲化铋用于 $2.8\ \mu\text{m}$ 被动调 Q 掺 Er^{3+} 光纤激光器中,最终得到了平均功率为 856 mW 的调 Q 脉冲,脉冲宽度和重复频率分别为 $1.3\ \mu\text{s}$ 和 92 kHz,对应的脉冲能量为 $9.3\ \mu\text{J}$ 。黑磷于 2015 年被第一次用于 $3\ \mu\text{m}$ 激光脉冲产生,上海交通大学的 Qin 等^[68]使用液相剥离法制备了多层黑磷材料,接着将黑磷溶液滴在镀金反射镜片上烘干制成黑磷饱和吸收镜,并插入到 $2.8\ \mu\text{m}$ 掺 Er^{3+} 光纤激光器中,实现了

激光器的被动调 Q 运转。2016 年,使用类似的方法,Li 组^[135]将黑磷作为饱和吸收体用于 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器中,分别在 2970.3 nm 和 2866.7 nm 处实现了被动调 Q 和被动锁模运转。同年,该组^[136]还报道了首台基于过渡金属硫化物硫化钨的 $3\ \mu\text{m}$ 中红外被动调 Q 光纤激光器。最近,Xie 组^[98]报道了首台基于黑磷饱和吸收体的 $2.8\ \mu\text{m}$ 脉冲全光纤激光器,在紧凑的全光纤系统中分别实现了被动调 Q 和被动锁模脉冲输出。除此之外,还有一些材料如金纳米粒子^[150]、氧硒化铋^[148]等也逐渐被应用于 $3\ \mu\text{m}$ 中红外脉冲光纤激光器。

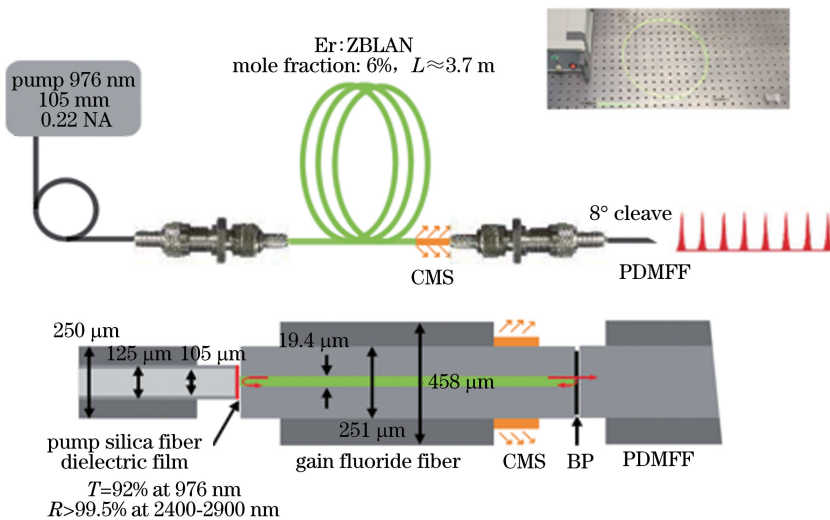


图 4 基于黑磷饱和吸收体的 $2.8\ \mu\text{m}$ 脉冲全光纤激光器^[98]

Fig. 4 $2.8\ \mu\text{m}$ pulsed all-fiber laser based on black phosphorus saturable absorber^[98]

另外,随着中红外波段半导体饱和吸收镜研究的成熟,一部分研究学者围绕这一方向展开。2014年,Li 组^[129]报道了 $3\ \mu\text{m}$ 波段首台基于半导体饱和吸收镜的被动调 Q 光纤激光器。次年,他们组^[131]将半导体饱和吸收镜用于双波长级联掺 Ho^{3+} 光纤激光器中,在 $3\ \mu\text{m}$ 实现被动调 Q 的同时,在 $2.1\ \mu\text{m}$ 处产生了增益开关脉冲。此外,他们^[132]也进行了将 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体用于 $3\ \mu\text{m}$ 被动调 Q 光纤激光器的研究。2016 年,中国科学院西安光学精密机械所的 Shen 等^[79]报道了基于半导体饱和吸收镜的被动调 Q 掺 Er^{3+} 光纤激光器,在 $2.8\ \mu\text{m}$ 波长处获得了 1.01 W 的最大平均功率,单脉冲能量达 $6.9\ \mu\text{J}$,峰值功率达 21.9 W。

2017 年,Wei 等^[90]在 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体调 Q 掺 Er^{3+} 光纤激光器的实验中获得了 5.16 W 的平均功率和 $27.7\ \mu\text{J}$ 的最大脉冲能量,这是目前报道的 $3\ \mu\text{m}$ 被动调 Q 光纤激光器的最高功率,但与主动调

Q 相比,仍然具有一定的差距。

3.3 $3\ \mu\text{m}$ 锁模光纤激光器的发展

激光锁模技术也可以分为主动锁模技术和被动锁模技术两种类型。主动锁模技术不仅需要在激光谐振腔内插入幅度调制器件,还需要使调制信号的频率与谐振腔基频的整数倍匹配,这种技术的优势在于能够实现高脉冲重复频率(百 GHz),并且获得的脉冲激光可调谐性好、稳定度高,缺点是会导致激光器结构变得比较复杂,成本增加,在很多情况下往往还缺乏特殊波段的调制器(比如 $3\ \mu\text{m}$ 波段)。被动锁模技术则是通过在腔内使用饱和吸收体来调制光强,成本较低的同时能够使激光器保持紧凑的结构。

常用于被动锁模光纤激光器的饱和吸收体主要分为真实饱和吸收体和等效饱和吸收体两大类,其中,真实饱和吸收体通常是某种具有非线性饱和吸收特性的材料,包括金属掺杂晶体、半导体饱和吸收

表 2 3 μm 调 Q 光纤激光器的典型报道
Table 2 Typical reports on 3 μm Q-switched fiber lasers

Year	Gain ion	Average output power /mW	Minimum pulse duration /ns	Laser wavelength /nm	Q-switch	Reference
1994	Er ³⁺	0.5	100	2700	AOM	[15]
2011	Er ³⁺	12400	90	2800	AOM	[52]
2012	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	720	78	2867	AOM	[118]
2012	Ho ³⁺	—	380	3005	AOM	[119]
2012	Ho ³⁺	—	350	3002	AOM	[120]
2013	Ho ³⁺	685	300	2970-3015	AOM	[126]
2012	Er ³⁺	318	370	2780	Fe ²⁺ : ZnSe	[55]
2013	Er ³⁺	62	2900	2783	Graphene	[58]
2015	Er ³⁺	485	1180	2779	Black phosphorus	[68]
2015	Ho ³⁺	327.4	1370	2979.9	Bi ₂ Te ₃	[133]
2015	Ho ³⁺	337	1230	2919.1-3004.2	Fe ²⁺ : ZnSe	[132]
2016	Er ³⁺	4200	2290	2786.8	SESAM	[77]
2016	Er ³⁺	856	1300	2791.2	Bi ₂ Te ₃	[80]
2016	Er ³⁺	822	742	2780	Fe ²⁺ : ZnSe	[82]
2016	Ho ³⁺	308.7	2410	2970.3	Black phosphorus	[135]
2016	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	48.4	1730	286.7	WS ₂	[136]
2017	Er ³⁺	5160	400	2762.5-2852.5	Fe ²⁺ : ZnSe	[90]
2018	Er ³⁺	260	880	2762-2824	Bi ₂ Te ₃	[94]
2019	Er ³⁺	485	612	2780	Gold nanobipyramids	[101]
2018	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	21.5	2000	2864.2	Bi ₂ O ₂ Se	[148]
2019	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	30.8	2180	2834.5-2881.0	LAR-GNRs	[150]

镜、碳纳米管以及以石墨烯、拓扑绝缘体、过渡金属硫化物、黑磷为代表的二维纳米材料；而等效饱和和吸收体通常指光纤激光器本身具有的某种可以引入饱和和吸收效应的特定结构，常见的主要有非线性光学环形镜（NOLM）、非线性放大光学环形镜（NALM）、非线性偏振旋转（NPR）或非线性偏振演变（NPE）等。在 3 μm 锁模光纤激光器的研究历程中，几乎所有的研究工作都采用被动锁模技术。目前已被报道的 3 μm 被动锁模光纤激光器所使用的饱和和吸收体材料包括飞镜（Flying-mirror）、InAs、Fe²⁺ : ZnSe 晶体、半导体饱和吸收镜、二维材料（石墨烯、黑磷），以及非线性偏振旋转（NPR/NPE）。

世界上首台锁模脉冲光纤激光器诞生于 1986 年^[174]，而最早的 3 μm 被动锁模光纤激光器来自 Frerichs 等^[24]。1996 年，他们使用 InAs 作为饱和吸收体，实现了 2.7 μm 掺 Er³⁺ 光纤激光器的被动锁模运转。另外，他们还首次将“飞镜锁模技术”应用到中红外光纤激光器。这种技术是将振动反射镜的振动信号通过线形腔的腔镜耦合到激光光路中，由于多普勒效应，反射镜的振动会使激光信号产生频移，频移后的信号被反馈回谐振腔中放大，这些相位锁定的新频率成分叠加在一起，形成锁模。因为

反射镜的振动频率不需要与谐振腔基模频率匹配，所以这种技术被认为是被动锁模技术。

此后的十几年，由于缺乏在 3 μm 波段有效工作的饱和和吸收体，所以没有被动锁模激光器的相关研究报道。直到 2012 年，亚利桑那大学的研究小组报道了基于 Fe²⁺ : ZnSe 晶体的 2.8 μm 掺 Er³⁺ 光纤脉冲激光器^[56]。通过改变 Fe²⁺ : ZnSe 饱和吸收体在谐振腔中的位置，分别观察到了调 Q 锁模和连续波锁模现象，其中，连续波锁模运转的输出功率为 51.4 mW，脉冲宽度为 19 ps。

与此同时，Jackson 组^[122]使用半导体饱和吸收镜实现了被动锁模中红外 Ho³⁺/Pr³⁺ 共掺光纤激光器。锁模激光脉冲具有 132 mW 的平均功率和 24 ps 的脉冲宽度，中心波长位于 2.87 μm 。2014 年，他们^[128]进一步构建了基于 Ho³⁺/Pr³⁺ 共掺增益光纤的环形腔激光器，并将 InAs 饱和吸收体插入腔内，在 2859.5 nm 波长处实现了调 Q 锁模和连续波锁模运转，获得的锁模脉冲宽度为 6 ps。这也是首个环形腔结构的氟化物光纤激光器。同年，Laval 组也开始进行相关研究的探索，他们^[59]报道了一台基于半导体饱和吸收镜的被动锁模掺 Er³⁺ 光纤激光器，通过使用光纤布拉格光栅作为输出耦合器，他们在

2.8 μm 获得了非常稳定的锁模激光脉冲。

2016年,亚利桑那大学研究小组报道了石墨烯饱和和吸收体被动锁模的2.78 μm 掺 Er^{3+} 光纤激光器^[83],谢国强组^[69]通过在双包层掺 Er^{3+} 光纤激光器中使用半导体饱和吸收镜,获得了平均功率超过1 W的中红外锁模激光脉冲。另一方面,Jackson组^[65]和Laval组^[63]同时实现了基于NPR(NPE)被动锁模的2.8 μm 掺 Er^{3+} 光纤激光器,他们在实验中分别获得了脉宽为207 fs和497 fs的锁模激光脉冲,将中红外激光源的脉宽突破到飞秒量级。在后续的实验,中,Laval组^[71]还在类似的装置中获得了270 fs的脉冲宽度,并将峰值功率提升到了23 kW。

2016年,Li组^[135]和Xie组^[78]分别将黑磷用于 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器和掺 Er^{3+} 光纤激光器,

在3 μm 波段均实现了被动锁模运转。Jackson组^[134]则进一步将NPR技术应用用于 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器中,在2.9 μm 波段获得了脉宽为187 fs的激光脉冲,激光器的峰值功率高达37 kW。基于这种中红外超短脉冲锁模激光的应用研究也在逐渐展开,2017年,他们^[143]使用类似的装置产生了26 fs的2.86 μm 锁模激光脉冲,并将其注入到一段硫化砷光纤中,通过自相位调制效应使光谱展宽至141 nm带宽,最后脉冲经过光栅对,脉宽被压缩至70 fs从而获得了中红外波段的少周期脉冲。另外,他们^[140]还将230 fs脉宽,4.2 kW峰值功率的2.9 μm 锁模脉冲激光注入硒化砷/硫化砷锥形光纤中,得到了20 dB带宽为7.7 μm (1.8~9.5 μm)的超连续谱。

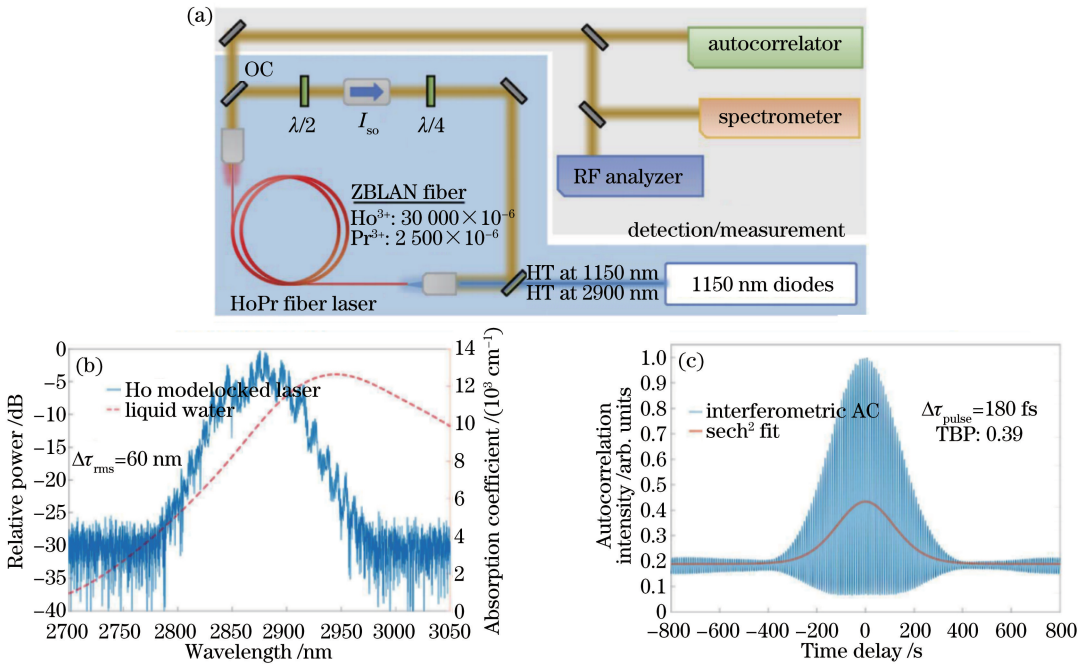


图5 基于NPR技术的3 μm 锁模运转 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器^[134]。(a)激光器结构;

(b) 3 μm 锁模激光光谱;(c) 3 μm 锁模激光脉冲自相关后的序列

Fig. 5 3 μm mode-locked $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ co-doped fiber laser based on NPR technique^[134]. (a) Structure of laser; (b) optical spectra of 3 μm mode-locked fiber laser; (c) pulse train of 3 μm mode-locked fiber laser after autocorrelation

2019年,Jackson组和Laval组都将研究重心转向掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器。Laval组^[166]报道了首台基于NPE技术的被动锁模掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器,通过将2.82 μm 波长的掺 Er^{3+} 光纤激光器作为抽运源,首次实现了波长大于3 μm (3.1 μm)的飞秒锁模光纤激光,获得的最小脉冲宽度为828 fs,峰值功率为4.2 kW。同时,Jackson组^[163]使用频移反馈技术(FSF)在2.83 μm 带内抽运的掺

Dy^{3+} 光纤激光器中实现了被动锁模运转,另外,他们在腔内使用了声光可调谐滤波器,使中红外锁模激光的波长具有2.97~3.30 μm 的330 nm的波长调谐范围,这是锁模光纤激光器目前达到的最长波长,其调谐范围也是所有可调谐脉冲光纤激光器中最宽的。最近,Jackson组^[151]也成功将频移反馈技术应用在2.86 μm 被动锁模 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器中。

表3 3 μm 锁模光纤激光器的典型报道Table 3 Typical reports on 3 μm mode-locked fiber lasers

Year	Gain ion	Average output power /mW	Pulse duration /fs	Laser wavelength /nm	Mode-locker	Reference
2012	Er^{3+}	51	19000	2780	$\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$	[56]
2012	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	132	24000	2870	SESAM	[122]
2014	Er^{3+}	440	60000	2797	SESAM	[59]
2014	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	70	6000	2859.5	InAs	[128]
2015	Er^{3+}	44	207	2805	NPR	[63]
2015	Er^{3+}	206	497	2793	NPR	[65]
2015	Er^{3+}	1000	25000	2780	SESAM	[69]
2016	Er^{3+}	2000	160	2800-3600	NPR	[72]
2016	Er^{3+}	613	42000	2783	Black phosphorus	[78]
2016	Er^{3+}	18	42000	2784.5	Graphene	[83]
2016	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	327	180	2900	NPR	[134]
2016	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	87.8	8600	2866.7	Black phosphorus	[135]
2017	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	127.7	22000	2842.2-2876.2	SESAM	[142]
2017	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	—	70	2860	NPR	[143]
2018	Er^{3+}	6.2	—	2771.1	Black phosphorus	[98]
2019	Er^{3+}	—	270	2800	NPR	[71]
2019	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	300	4700	2860	FSF	[151]
2019	Dy^{3+}	120	33000	2970-3300	FSF	[164]
2019	Dy^{3+}	204	828	3083	NPR	[166]

3.4 3 μm 增益开关光纤激光器的发展

与调Q技术类似,增益开关技术也是一种常用的产生激光脉冲的技术,其产生的激光脉冲具有不同量级的脉宽(ns~ms)。不同的是,调Q技术的工作原理是快速调节谐振腔损耗,而增益开关技术的关键在于快速调节激光器的增益。增益开关的实现常常需要使用脉宽较窄的抽运激光脉冲,从而保证在腔内光子数尚未积累起来之前使激光增益达到阈值以上。

在3 μm 波段,增益开关技术已被成功应用于掺 Er^{3+} 和掺 Ho^{3+} 光纤激光器中,常用的实现方式有三种:一种是直接使用脉冲激光源抽运增益光纤^[31],并对谐振腔内的激光增益和激光上下能级的粒子数进行周期性调制,从而获得3 μm 增益开关脉冲激光;第二种是经由相邻能级的调Q运转引入增益开关效应^[120];第三种是混合抽运^[152],在 Ho^{3+} 的能级系统中,由于3 μm 激光(${}^5\text{I}_6 \rightarrow {}^5\text{I}_7$)和2 μm 激光(${}^5\text{I}_7 \rightarrow {}^5\text{I}_8$)是由相邻能级的跃迁产生,所以可以采用双波长(如1.15 μm 和2 μm)混合抽运,并使其中一种波长(如2 μm)为脉冲运转,从而对系统的中间能级的粒子数进行周期性调制,进而激发相邻能级激光的增益开关脉冲产生。

2000年,Dickinson等^[31]报道了首台工作在3 μm 波段的增益开关光纤激光器,采用791 nm的掺

钛蓝宝石脉冲激光器抽运双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器,获得了2.7 μm 波长的激光脉冲。另外,他们还通过调节光纤尺寸参数与抽运脉宽优化了激光器的工作性能。2011年,Gorjan等^[51]构建了一个主动反馈的脉冲半导体抽运源,在2.8 μm 掺 Er^{3+} 光纤激光器中实现了增益开关脉冲运转,获得了最高2 W的平均输出功率和68 W的峰值功率。

2012年,Jackson组^[120]首先研究了3 μm 与2 μm 级联双波长掺 Ho^{3+} 光纤激光器中激光调Q运转对另一波长激光引入增益开关效应的动态过程,他们分别使3 μm 激光与2 μm 激光调Q运转,并观察另一者的时域特性。在实验中,当3 μm 激光(${}^5\text{I}_6 \rightarrow {}^5\text{I}_7$)调Q运转时,2 μm 激光(${}^5\text{I}_7 \rightarrow {}^5\text{I}_8$)增益受到调制,也开始脉冲运转,并且脉冲的重复频率与3 μm 调Q激光相同;而当2 μm 激光调Q运转时,3 μm 激光呈现出多增益开关脉冲的状态,增益开关脉冲的数量与脉冲之间的时间间隔随着调Q激光脉冲重复频率的增大而减小,并且调Q脉冲和增益开关脉冲的脉宽都随着抽运功率的增大而减小。

2015年,沈炎龙等^[61]使用脉冲运转的975 nm半导体激光器抽运双包层 Er^{3+} 高掺杂光纤,在2.8 μm 实现了增益开关脉冲输出。他们通过增加抽运功率和抽运脉冲重复频率,研究了增益开关脉冲的动态演变趋势。2017年,他们^[87]首次在实验中

观察到了增益开关锁模现象。

2017年,电子科技大学的Wei等^[89]报道了一台2.8 μm 波长可调谐的增益开关掺 Er^{3+} 光纤激光器,通过使用衍射光栅作为波长调谐器件,实现了大于170 nm(2699~2869.9 nm)的宽调谐范围。同年,李剑峰课题组^[141]在实验中同时使用一台1.15 μm 连续激光抽运源和一台1.15 μm 脉冲激光抽运源进行混合抽运,最终在掺 Ho^{3+} 光纤激光器中实现了3 μm 与2 μm 双波长级联增益开关脉冲输出。

2018年,Laval组^[97]使用光纤光栅作为腔镜构建了中红外掺 Er^{3+} 光纤激光器,并通过外部调制令高功率976 nm的半导体激光抽运源脉冲运转,最终在2.826 μm 波长处获得了增益开关脉

冲,脉冲激光的平均功率为11.2 W,脉冲宽度为170 ns,脉冲能量为80 μJ ,这个实验结果大幅提升了3 μm 增益开关光纤激光器的最高输出功率,使基于增益开关技术的3 μm 光纤激光器能够与最先进的3 μm 调Q光纤激光器相媲美。最近,李剑峰课题组^[146]进行了2.94 μm 掺 Ho^{3+} 光纤激光器中增益开关脉冲随着抽运光功率(抽运脉冲能量)的增大而切换不同状态的相关研究,此外,他们^[152]还采用1.15 μm 激光和1.95 μm 激光混合抽运掺 Ho^{3+} 光纤激光器,通过使用1.95 μm 脉冲激光周期性调制 Ho^{3+} 系统中的 $^5\text{I}_7$ 能级(即2 μm 激光的上能级),获得了2.1 μm 和3 μm 双波长增益开关脉冲激光。

表4 3 μm 增益开关光纤激光器的典型报道

Table 4 Typical reports on 3 μm gain-switched fiber lasers

Year	Gain ion	Average output power /mW	Minimum pulse duration /ns	Pulse energy / μJ	Laser wavelength /nm	Reference
2001	Er^{3+}	—	200	1900	2700-2770	[35]
2011	Er^{3+}	2000	307	—	About 2800	[51]
2012	Ho^{3+}	—	270	6.1	3002	[120]
2014	Er^{3+}	40	1180	4.2	About 2800	[61]
2017	Er^{3+}	4800	230	37	2825.4	[86]
2017	Er^{3+}	110	661.2	—	About 2800	[87]
2017	Er^{3+}	119.4	1550	5.97	2699-2869.9	[89]
2017	Ho^{3+}	262.14	824	3.28	2928.5	[141]
2018	Er^{3+}	11200	170	80	2826	[97]
2018	Ho^{3+}	389.3	1490	4.87	2895.5-3000.5	[146]
2019	Ho^{3+}	136.6	2002	2.73	2971.9	[152]

3.5 3 μm 波长可调谐光纤激光器的发展

可调谐光纤激光器是指在一定范围内可以连续改变激光输出波长的光纤激光器。近年来,针对3 μm 波长可调谐光纤激光器的报道越来越多,为了从整体上把握3 μm 光纤激光器在波长调谐性能上的发展,将相关报道总结至表5。

世界上首台波长可调谐的3 μm 光纤激光器在1990年由Wetenkamp报道,他们通过使用衍射光栅在掺 Ho^{3+} 光纤激光器中获得了2.83~2.95 μm 的波长调谐范围^[102]。1992年,他们组^[175]又在掺 Er^{3+} 光纤激光器中实现了2.67~2.83 μm 的波长调谐。此后,世界各地的研究小组在3 μm 光纤激光器的调谐性能上投入了大量研究,越来越多基于衍射光栅的3 μm 可调谐光纤激光器被不断报道。

2000年,新墨西哥大学的Libatique等^[34]在2.8 μm 掺 Er^{3+} 光纤激光器中获得了120 nm的波长调谐范围;2007年,他们与亚利桑那大学的朱秀山

合作,在输出功率大于2 W的高功率掺 Er^{3+} 光纤激光器中实现了波长可调谐^[42]。2008年,他们再次合作,在输出功率大于1 W的掺 Er^{3+} 光纤激光器中获得了100 nm的波长调谐^[43]。在此基础上,2010年,日本京都大学的Tokita组^[49]报道了一台输出功率为10 W量级的中红外掺 Er^{3+} 光纤激光器,其波长可以由2.71 μm 调谐至2.88 μm 。

2011年,Jackson组^[115]首次在半导体激光器抽运的3 μm $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器中实现了波长调谐。2012年,他们^[121]报道了一台波长在2955~3021 nm范围内可调谐的掺 Ho^{3+} 光纤激光器。2015年,他们^[130]使用 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤实现了一台高功率波长可调谐的3 μm 光纤激光器,激光器具有7.2 W的输出功率和150 nm的波长调谐范围。2016年,他们^[157]首次报道了可调谐中红外掺 Dy^{3+} 光纤激光器,激光器的波长可以覆盖从2.95 μm 到3.35 μm 的400 nm宽范围。

表5 波长可调谐 3 μm 光纤激光器的研究报道
Table 5 Reports on 3 μm wavelength-tunable fiber lasers

Year	Gain ion	Tuning range	Output power / mW	Working principle	Operation mode	Reference
1992	Er ³⁺	160 nm (2.67-2.83 μm)	26	Diffraction grating	CW	[175]
2000	Er ³⁺	110 nm (2.7-2.81 μm)	30	Diffraction grating	CW	[34]
2007	Er ³⁺	100 nm (2.705-2.805 μm)	2000	Diffraction grating	CW	[42]
2008	Er ³⁺ /Pr ³⁺	100 nm (2.7-2.81 μm)	1000	Diffraction grating	CW	[43]
2010	Er ³⁺	130 nm (2.71-2.84 μm)	11000	Diffraction grating	CW	[49]
2016	Er ³⁺	157 nm (2697-2854 nm)	260	Diffraction grating	CW	[74]
2016	Er ³⁺	62 nm (2762-2824 nm)	1240	Diffraction grating	Q-switching	[76]
2017	Er ³⁺	107.6 nm (2706.2-2813.8 nm)	473.3	Diffraction grating	Gain-switching	[89]
2017	Er ³⁺	100 nm (2.71-2.83 μm)	110	Diffraction grating	Gain-switching	[87]
2017	Er ³⁺	90 nm (2762.5-2852.5 nm)	5160	Diffraction grating	Q-switching	[90]
1990	Ho ³⁺	120 nm (2.83-2.95 μm)	12.6	Diffraction grating	CW	[102]
2011	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	75 nm (2.825-2.9 μm)	>1000	Diffraction grating	CW	[115]
2012	Ho ³⁺	66 nm (2.955-3.021 μm)	518	Diffraction grating	CW	[121]
2013	Ho ³⁺	81 nm (2.95-3.031 μm)	-	Diffraction grating	Q-switching	[126]
2015	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	150 nm (2825-2975 nm)	7200	Diffraction grating	CW	[130]
2015	Ho ³⁺	85 nm (2919.1-3004.2 nm)	337	Diffraction grating	Q-switching	[132]
2017	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	34 nm (2824.2-2976.2 nm)	127.7	Diffraction grating	Mode-locking	[142]
2017	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	37 nm (2850-2887 nm)	290	Fiber Bragg grating	CW	[137]
2018	Ho ³⁺	105 nm (2895.5-3000.5 nm)	389.3	Diffraction grating	Gain-switching	[146]
2019	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	50 nm (2.83-2.88 μm)	30.8	Diffraction grating	Q-switching	[150]
2016	Dy ³⁺	400 nm (2.95-3.35 μm)	30	Diffraction grating	CW	[157]

李剑峰课题组也对 3 μm 可调谐光纤激光器做了很多研究。2013 年,他们^[126]在主动调 Q 掺 Ho³⁺ 光纤激光器中获得了 2.95~3.031 μm 的波长调谐范围。2015 年,他们^[132]报道了一台波长可调谐的被动调 Q 掺 Ho³⁺ 光纤激光器,激光器的波长调谐范围为 2919.1~3004.2 nm。2017 年,他们^[142]首次报道了 3 μm 波段波长可调谐的锁模光纤激光器,通过在 Ho³⁺/Pr³⁺ 共掺光纤激光器中使用半导体饱和吸收镜,使其实现了稳定的锁模运转,并且具有 34 nm 的波长调谐范围。同年,他们^[90]在平均输出功率高于 5 W 的被动调 Q 掺 Er³⁺ 光纤激光器中实现了 90 nm 的波长调谐,输出激光波长为 2762.5~2852.5 nm。另外,他们^[89]首次在 3 μm 增益开关光纤激光器中实现了波长调谐,最终增益开关掺 Er³⁺ 光纤激光器的输出波长能够从 2699 nm 调谐至 2869.9 nm;次年,他们^[146]在增益开关掺 Ho³⁺ 光纤激光器中也进行了类似的研究。最近,他们^[150]报道了基于金纳米棒饱和吸收体的 3 μm 被动调 Q 运转波长可调谐 Ho³⁺/Pr³⁺ 共掺光纤激光器,其波长调谐范围为 2.83~2.88 μm 。

上面提到的研究报道无一例外均是采用块状衍射光栅来实现波长调谐的,这种方法会使谐振腔难

以全光纤化,从而令激光系统失去原本紧凑的结构和稳定性。目前,唯一一例没有使用衍射光栅的 3 μm 可调谐光纤激光器于 2017 年被报道,Bharathan 等^[137]在 Ho³⁺/Pr³⁺ 共掺光纤中采用飞秒直写的方法制作了光纤布拉格光栅,并且通过对光栅挤压和施加拉力来进行中红外激光波长的调谐,最终获得了以 2870 nm 为中心的 37 nm 的波长调谐范围。虽然这种方法能够避免使用块状结构的波长调谐器件,但是他们在激光器的光路中仍然使用了聚焦透镜和二向色镜作为抽运光输入和激光输出的耦合器件,因此从严格意义上讲这一激光器不属于全光纤结构。另外,在氟化物光纤上刻写光栅也会提高系统的整体成本,增加具体操作的难度。

3.6 3 μm 小型化全光纤激光器发展趋势与进展

3 μm 光纤激光器谐振腔通常由氟化物光纤构成,由于这类光纤难以与普通的石英光纤低损耗熔接,传统的中红外光纤激光器常常采用块状结构的透镜组作为抽运光输入和激光输出的耦合器件,不利于实现结构紧凑、工作稳定的全光纤化激光系统。为了使 3 μm 光纤激光器具有小型化的全光纤结构,从而更好地满足机载和军事等应用的需求,世界各地的研究人员展开了广泛的探索。其中,作为先

驱,加拿大 Laval 大学的研究小组将氟化物光纤光栅用于构成全光纤结构的激光谐振腔,并将氟化物增益光纤与抽运源输出尾纤直接熔接,他们在实验中成功实现了高功率 $3\ \mu\text{m}$ 全光纤激光系统^[64,91]。然而,在氟化物光纤中直接刻写光栅具有一定的操作难度,并且也会增加系统的总体成本。因此,除了这种方案,有必要提出一种构建全光纤中红外激光谐振腔的新方法。

另一方面,目前几乎所有可调谐中红外光纤激光器都是通过腔内采用衍射光栅来实现激光波长调谐^[176],使用这种块状结构的器件同样会破坏激光谐振腔的全光纤结构,并且会使激光系统变得更加复杂,稳定性变差。探索一种适用于全光纤结构激光谐振腔的波长调谐技术将有利于使中红外光纤激光器更好地投入实际应用,具有十分重要的意义。

针对 $3\ \mu\text{m}$ 光纤激光器面临的以上挑战,为了在中红外全光纤激光器中实现波长可调谐,本课题组采用等离子溅射沉积系统在光纤端面镀膜,并将这种光纤端面镀膜作为中红外光纤激光器谐振腔的腔镜,代替传统的块状输入输出耦合器件和氟

化物光纤光栅,在全光纤的激光谐振腔结构中实现抽运光的输入耦合与激光信号的输出耦合,并实验研究了一种连续光/自调 Q 运转的小型化可调谐 $3\ \mu\text{m}$ 中红外光纤激光器。

图 6(a)给出了该激光器的实物图片,图 6(b)所示为对应的结构示意图。可以看到,这种结构非常紧凑的全光纤激光器由一个波长为 $1154\ \text{nm}$ 的抽运激光源、一根 $55\ \text{cm}$ 的掺 Ho^{3+} 氟化物增益光纤,以及一对光纤端面反射镜(M1 与 M2)构成。其中,作为抽运光输入镜的 M1 镀在一根传统的单模石英光纤上,而作为激光输出镜的 M2 镀在一根用于传导输出激光的未掺杂的氟化物光纤上,三根光纤通过两个陶瓷套管连接在一起,使光路导通。图 6(c)与图 6(d)分别展示了光纤端面反射镜的实物照片和显微图像,可以看到光纤端面上沉积有均匀介电薄膜。另外,本课题组还测量了该反射镜的透射光谱,如图 6(e)所示,该反射镜在 $3\ \mu\text{m}$ 波段具有小于 10% 的透射率,对应大于 90% 的反射率,可以作为 $3\ \mu\text{m}$ 波段激光器的理想的谐振腔反射镜。

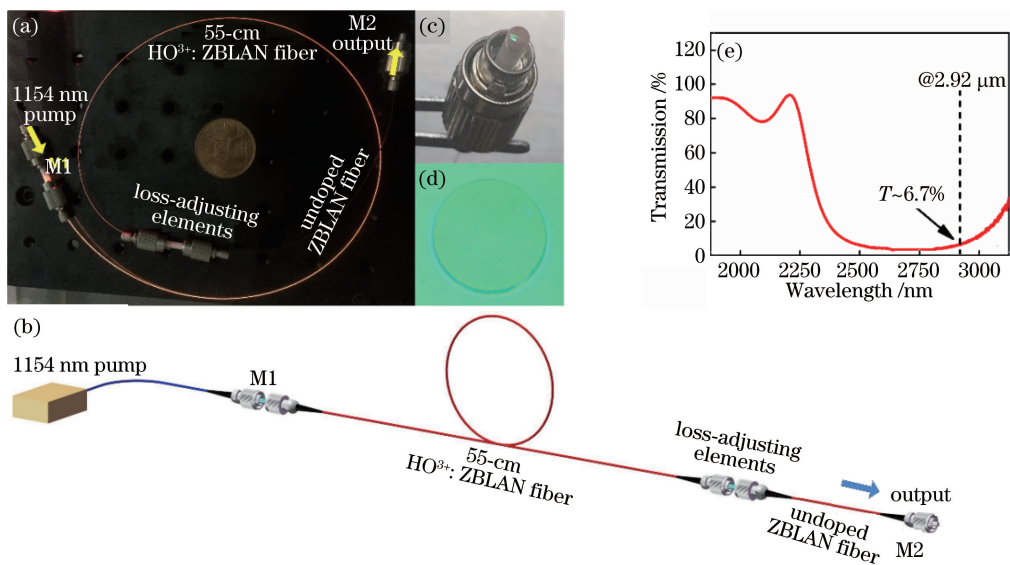


图 6 小型化可调谐 $3\ \mu\text{m}$ 中红外光纤激光器的构成。(a)激光器的照片;(b)激光器的结构示意图;(c)光纤端面镀膜镜 M1 的照片;(d)光纤端面镀膜镜 M2 在显微镜下的图像;(e)光纤端面镀膜镜的光学透射谱曲线

Fig. 6 Composition of $3\ \mu\text{m}$ miniaturized wavelength-tunable mid-infrared fiber laser. (a) Photograph of laser; (b) structural diagram of laser; (c) photograph of fiber end-facet mirror M1; (d) microscopic image of fiber end-facet mirror M2; (e) optical transmission spectrum of fiber end-facet mirror

另一方面,本课题组提出了一种新型的波长调谐技术——基于腔内损耗调节的波长调谐技术。这种技术通过在光纤激光器的谐振腔内引入一对偏芯的陶瓷插芯光纤接头,使用陶瓷套管连接两个偏芯

光纤接头使光路导通,同时这一对偏芯陶瓷插芯光纤接头和陶瓷套管也构成了激光器的损耗调节装置。因为使用了偏芯的陶瓷插芯光纤接头,可以通过旋转套管中的光纤接头,改变两个光纤接头之间

的激光耦合效率(两侧光纤纤芯之间的重合面积),从而调节激光谐振腔内的损耗,最终达到改变输出激光波长的目的。这种技术的关键在于调节激光器谐振腔内的损耗,为了更详细地论述这种波长调谐技术的工作原理,下面分三种不同的情况进行分析。图7(a)展示了损耗调节装置的结构,而图7(b)、(c)、(d)分别列举了三种典型的谐振腔损耗状态。

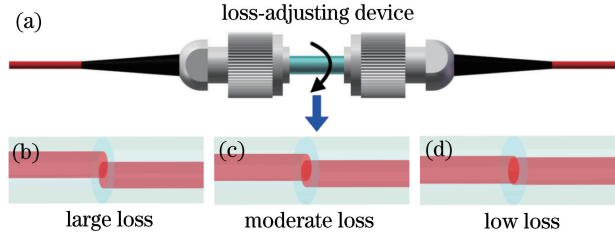


图7 损耗调节装置的结构和原理。(a)损耗调节装置;(b)大损耗状态;(c)中等损耗状态;(d)低损耗状态
Fig. 7 Structure and principle of loss-adjusting device.

(a) Loss-adjusting device; (b) large loss;
(c) moderate loss; (d) low loss

在图7(b)中,两根光纤的纤芯处于对准程度较差的状态,可以看出两者的重合部分面积很小,此时激光经过这个耦合位置的时候会有很大的损耗,即耦合效率很低;由于陶瓷插芯是偏芯的,通过旋转其中一个陶瓷插芯,可以使两根光纤的纤芯在径向的相对位置发生改变,达到图7(c)所示的第二种情况,可以看出,这种情况下两根光纤的纤芯相对前者而言对准得更好了,重合部分面积也更大,具有更高的耦合效率,该耦合位置会在激光经过时引入中等

程度的损耗;进一步使两个陶瓷插芯发生相对旋转,可以达到图7(d)所示的位置,此时两个光纤的纤芯几乎能完全对准,纤芯部分高度重叠,因此能支持非常高效率的耦合和很低的损耗。

当激光器谐振腔的损耗发生改变时,腔内激光强度也会随之改变,进而对腔内稀土掺杂增益光纤中的激光重吸收作用产生影响,激光重吸收作用在一定程度上决定了输出激光波长的长短。若谐振腔的损耗变大,腔内激光的强度变小,增益光纤中的激光重吸收作用将变弱,最终导致输出激光波长变短。反之,若谐振腔的损耗变小,腔内激光强度就会变大,增益光纤中的激光重吸收作用将变强,最终导致输出激光波长变长。基于此,可以通过调节谐振腔损耗来实现输出激光波长的调谐。另外,由于任何光纤激光器中都能引入光纤接头,并且大部分稀土离子都具有一定宽度的增益带,所以这种技术对稀土掺杂光纤激光器具有一定的普适性。

基于此,将掺 Ho^{3+} 增益光纤的输出耦合端安装在偏芯的陶瓷插芯光纤接头中,由于与其相对的未掺杂氟化物光纤那一端的陶瓷插芯也是偏芯的,可以通过相对旋转两个陶瓷插芯改变两根光纤在对接处纤芯的重合程度,从而调节激光器腔内的损耗,进而调谐激光波长。在实验中,首先将损耗调节装置调到损耗最小的状态,增加抽运功率,可以观察到 $3\ \mu\text{m}$ 激光和 $2\ \mu\text{m}$ 激光先后激射。图8(a)给出了抽运功率为 $116\ \text{mW}$ 时激光的光谱,两种激光的中心波长分别位于 $2920.6\ \text{nm}$ 和 $2058.1\ \text{nm}$ 。

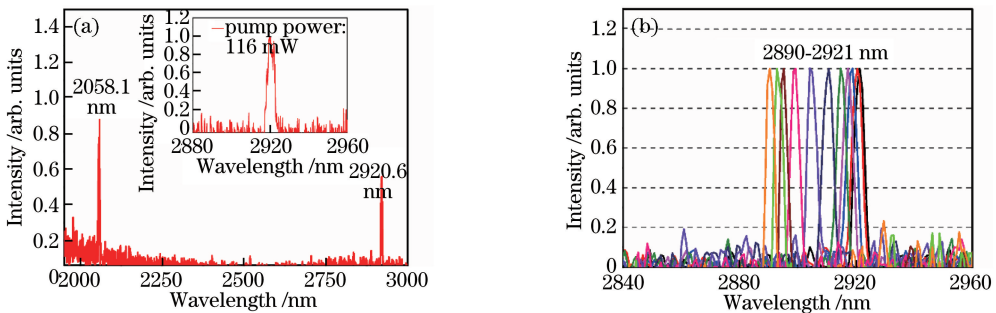


图8 连续光运转 $3\ \mu\text{m}$ 可调谐全光纤激光器的实验结果。(a)中红外激光输出光谱(插图: $3\ \mu\text{m}$ 激光窄范围高精度光谱);(b) $3\ \mu\text{m}$ 激光的调谐光谱

Fig. 8 Experimental results of $3\ \mu\text{m}$ wavelength-tunable all-fiber laser under continuous light running. (a) Output optical spectrum of mid-infrared laser (Inset is zoom-in view of $3\ \mu\text{m}$ laser spectrum); (b) wavelength-tunable spectra of $3\ \mu\text{m}$ laser

为了调谐激光波长,将抽运功率固定在 $116\ \text{mW}$,并手动旋转损耗调节装置中两个偏芯陶瓷插芯光纤接头,改变掺 Ho^{3+} 氟化物增益光纤和未掺杂氟化物光纤对接处的耦合效率和腔内损耗。通过损耗调节装置将腔内损耗调节至不同的大小,

激光器也相应地在不同波长处建立起稳定的运转状态。最终获得的 $3\ \mu\text{m}$ 激光调谐光谱如图8(b)所示,不难看出激光波长可以由 $2890\ \text{nm}$ 调谐至 $2921\ \text{nm}$,显示出大于 $30\ \text{nm}$ 的波长调谐范围。另外,在实验中还观察到,输出激光的光强随着激光波

长变短而降低,当激光调谐到 2921 nm 的最长波长处时,对应获得的最高输出功率为 14 mW。为了保护反射镜 M1 和 M2 不受高功率损伤,抽运功率被限制在较低的水平,因此,可以通过增大抽运功率来进一步提升输出功率。

在实现了连续运转的可调谐 3 μm 掺 Ho^{3+} 全光纤激光器之后,进一步对脉冲运转的可调谐 3 μm 掺 Ho^{3+} 全光纤激光器进行研究。基于各种可饱和吸收体的被动调 Q 技术和被动锁模技术因为有利于激光器小型化而常常被用于脉冲激光产生,已有很多关于这两种技术在 3 μm 波段的光纤激光器中应用的报道。除了被动调 Q 和锁模技术,自调 Q 技术也是一种选择。由于自调 Q 技术无需在激光谐振腔内使用任何额外的 Q 开关和调制器,所以有望使激光系统的结构更紧凑,成本更低。尽管自调 Q 技术已被成功应用于近红外^[177] 和可见光^[178] 波段

的光纤激光器,但目前还没有任何中红外自调 Q 光纤激光器的相关报道。

本课题组所用实验装置与之前几乎完全相同,使用了相同的 1.15 μm 抽运源、输入镜 M1、未掺杂的氟化物光纤以及输出镜 M2,并且不同光纤之间通过陶瓷套管连接,使光路导通。唯一不同的是,为了更有利于产生自调 Q 效应,特意使用了一根长度很长(2 m)的掺 Ho^{3+} 氟化物增益光纤。掺 Ho^{3+} 光纤具有 5000×10^{-6} 的高掺杂粒子数浓度,在抽运光波长处具有大于 42 dB/m 的高吸收系数,因此,2 m 长的掺 Ho^{3+} 光纤很难被充分抽运,在未充分抽运的情况下,增益光纤的前半部分将会完全消耗抽运光的能量并获得 3 μm 和 2 μm 激光增益,而后半部分由于缺乏抽运光的激活而对前半部分产生的激光具有受激吸收作用,最终的效果可以等效于一个饱和吸收体。

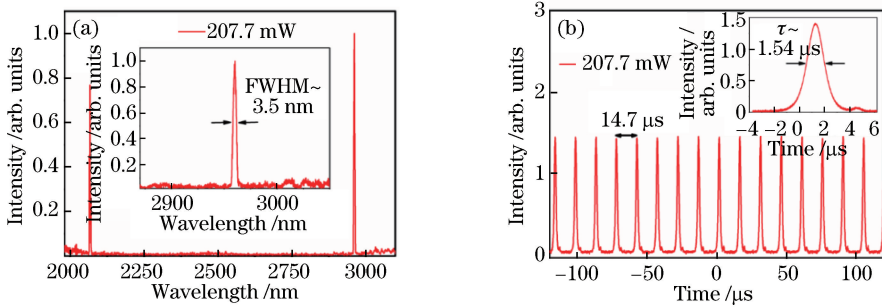


图 9 3 μm 自调 Q 激光在 207.7 mW 抽运功率下的特征。(a)输出光谱(插图:3 μm 激光的窄范围高精度光谱); (b)脉冲序列(插图:单脉冲包络)

Fig. 9 Characteristics of 3 μm self-Q-switching operation at pump power of 207.7 mW. (a) Output optical spectrum (inset: a zoom-in view of 3 μm laser spectrum); (b) pulse sequence (inset: single pulse envelope)

在实验中,当增加抽运功率到连续光阈值 26.4 mW 时,可以观察到 2.9 μm 激光发射。当抽运功率提高到 36.6 mW 时,2.9 μm 激光开始了稳定的自脉冲运转。图 9 总结了抽运功率为 207.7 mW 时 2.9 μm 激光自调 Q 运转的典型特征。从图 9 (a)中可以看出,掺 Ho^{3+} 光纤激光器工作在 3 μm 和 2 μm 级联激光的双波长状态,这与本课题组之前的实验结果是一致的,插图给出了 3 μm 激光的光谱细节图,激光的中心波长位于 2960 nm,3 dB 带宽约为 3.5 nm。通过监测 3 μm 和 2 μm 级联激光的时域情况,发现 3 μm 和 2 μm 激光同时建立了稳定的自调 Q 运转,并且两者的脉冲序列具有相同的重复频率。通过滤光片将 2 μm 激光滤除,并使用响应波长范围大于 2.4 μm 的光电探测器观察 3 μm 激光脉冲。图 9 (b)展示了 207.7 mW 抽运功率下 3 μm 自调 Q 激光的典型脉冲序列,脉冲周期

为 14.7 μs ,并且序列中的脉冲强度波动小于 5%,表明激光器自调 Q 工作具有很好的稳定性。由插图可以看出,3 μm 激光的单脉冲包络呈现出对称的高斯型强度分布,并且具有 1.54 μs 的脉冲宽度。

为了调谐 2.9 μm 激光波长,抽运光功率被固定在 207.7 mW,通过旋转损耗调节装置中两个偏芯的陶瓷插芯,进而改变谐振腔的损耗和激光波长。如图 10 (a)所示,激光波长可以从 2923 nm 调谐到 2965 nm,调谐范围大于 40 nm。在调谐激光波长的同时,还研究了不同激光波长处自调 Q 脉冲平均输出功率、脉冲宽度和重复频率的变化。结果如图 10 (b)所示,随着激光波长向长波长方向调谐,平均输出功率逐渐增大,脉冲重复频率显著减小,而脉冲宽度基本保持不变。据本课题组所知,该研究^[179]是国际上首次报道的 3 μm 可调谐自调 Q 全光纤激光器。

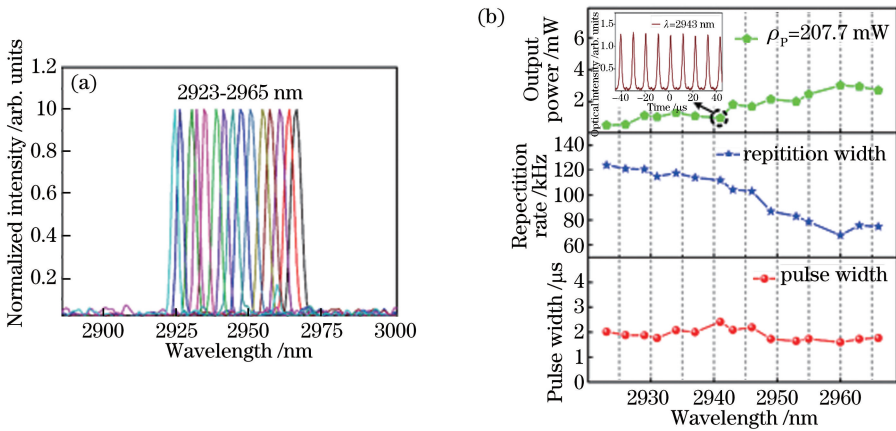


图 10 抽运功率固定为 207.7 mW, 3 μm 自调 Q 激光脉冲的波长可调谐研究。(a) 3 μm 激光波长调谐光谱; (b) 不同调谐波长处的脉冲宽度、重复频率和平均输出功率(插图: 2943 nm 处的自调 Q 脉冲序列)

Fig. 10 Research on the 3 μm wavelength-tunable self-Q-switched fiber laser at a fixed pump power of 207.7 mW. (a) Wavelength-tunable spectra of 3 μm fiber laser; (b) pulse width, repetition rate, and average output power at different tunable wavelengths (inset: self-Q-switching pulse sequence at 2943 nm)

4 结束语

工作中红外 3 μm 波段的激光器由于在激光医疗、大气监测、军事等方面具有重要的应用, 成为了激光物理学领域当前的研究热点。相比于传统的 3 μm 固体激光器和量子级联激光器, 3 μm 稀土离子掺杂的光纤激光器由于具有结构紧凑、稳定性好、转换效率高和光束质量好的优势, 受到广泛的关注和研究。

目前, 3 μm 光纤激光器主要包括基于掺 Er³⁺ (Er³⁺/Pr³⁺)、掺 Ho³⁺ (Ho³⁺/Pr³⁺) 和掺 Dy³⁺ 氟化物光纤为增益介质的激光器, 随着近年来氟化物光纤相关技术的不断成熟完善, 3 μm 光纤激光器领域也有了长足的进步, 不同工作性能的 3 μm 光纤激光器被相继报道。目前, 3 μm 中红外光纤激光器主要有以下几种典型的发展趋势:

1) 输出功率不断提升: 以 3 μm 掺 Er³⁺ (Er³⁺/Pr³⁺) 氟化物光纤激光器为代表, 随着 980 nm 高功率半导体激光抽运源和高掺杂双包层氟化物增益光纤的普及, 3 μm 光纤激光器的输出功率迅速提升。在未来的研究中, 可以通过进一步提升抽运功率、优化增益光纤, 以及改善制冷条件来获得更高功率(百瓦量级)的 3 μm 激光输出, 也可以采用光纤激光放大系统对单片结构的 3 μm 激光器进行逐级放大, 从而获得高功率 3 μm 激光。

2) 输出脉冲宽度不断减小: 由于 NPR 等激光锁模技术在 3 μm 光纤激光器中的成功应用, 目前

在 3 μm 光纤激光器中已经获得了百飞秒量级的激光脉冲输出, 采用光栅对已将 3 μm 激光脉冲进一步压缩到几十飞秒量级的少周期脉冲。因此, 未来可以通过将更多有效的锁模技术应用于 3 μm 光纤激光器, 获得脉冲更窄、峰值功率更高的 3 μm 激光脉冲。

3) 输出波长不断深入中红外波段: 近年来, 3 μm 掺 Dy³⁺ 光纤激光器由于具有更长波长的荧光范围而成为研究热点, 波长大于 3 μm 的掺 Dy³⁺ 光纤激光器被相继报道, 获得的最长波长已经超过了 3.3 μm。为了使激光波长更深入中红外区域, 可以探索 Er³⁺ 在 3.5 μm 波段及 Ho³⁺ 和 Dy³⁺ 在 4 μm 波段的荧光发射带, 并且采用在大于 3 μm 的中红外波段具有更低损耗和更低声子能量的氟化物光纤作为增益光纤, 从而有望在光纤激光器中实现大于 4 μm 的中红外激光输出。

可以期待, 在不久的将来, 结构紧凑、性能优异、工作稳定的 3 μm 中红外光纤激光器将从实验室逐渐走向许许多多的实用领域, 并在一些特定的应用中逐渐取代传统的固体激光器和量子级联激光器, 为推动医疗、工业、军事、环境治理等不同领域的进步发挥其宝贵的作用。

参 考 文 献

[1] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 423-431.
 [2] Guan X F, Wang J W, Zhang Y Z, et al. Self-Q-

- switched and wavelength-tunable tungsten disulfide-based passively Q-switched Er:Y₂O₃ ceramic lasers [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 830-836.
- [3] Bandyopadhyay N, Bai Y, Tsao S, *et al.* Room temperature continuous wave operation of $\lambda \sim 3\text{-}3.2\ \mu\text{m}$ quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(24): 241110.
- [4] Fecko C J, Loparo J J, Tokmakoff A. Generation of 45 femtosecond pulses at $3\ \mu\text{m}$ with a KNbO₃ optical parametric amplifier [J]. *Optics Communications*, 2004, 241(4/5/6): 521-528.
- [5] Chen H, Li J F, Ou Z H, *et al.* Progress of mid-infrared fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(11): 111402.
陈昊, 李剑峰, 欧中华, 等. 中红外光纤激光器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(11): 111402.
- [6] Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(1): 36-39.
- [7] Brierley M C, France P W. Continuous wave lasing at $2.7\ \mu\text{m}$ in an erbium-doped fluorozirconate fibre [J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(15): 935-937.
- [8] Quimby R S, Minis-calco W J. Effect of upconversion on $2.7\text{-}\mu\text{m}$ laser action in Er³⁺ [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, April 25-29, 1988, Anaheim, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 1988: FE3.
- [9] Allain J Y, Monerie M, Poignant H. Erbium-doped fluorozirconate single-mode fibre lasing at $2.71\ \mu\text{m}$ [J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(1): 28-29.
- [10] Yanagita H, Masuda I, Yamashita T, *et al.* Diode laser pumped Er³⁺ fibre laser operation between $2.7\text{-}2.8\ \mu\text{m}$ [J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(22): 1836-1838.
- [11] Allen R, Esterowitz L, Ginther R J. Diode-pumped single-mode fluorozirconate fiber laser from the $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ transition in erbium [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(17): 1635-1637.
- [12] Allain J Y, Monerie M, Poignant H. Energy transfer in Er³⁺/Pr³⁺-doped fluoride glass fibres and application to lasing at $2.7\ \mu\text{m}$ [J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(5): 445-447.
- [13] Frerichs C. All optical modulation of a $2.7\ \mu\text{m}$ erbium-doped fluorozirconate fiber laser [C] // Advanced Solid State Lasers, February 1, 1993, New Orleans, Louisiana, United States. Washington, D.C.: OSA, 1993: ML2.
- [14] Frerichs C. Efficient Er³⁺-doped CW fluorozirconate fiber laser operating at $2.7\ \mu\text{m}$ pumped at $980\ \text{nm}$ [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1994, 15(4): 635-649.
- [15] Frerichs C, Tauermaun T. Q-switched operation of laser diode pumped erbium-doped fluorozirconate fibre laser operating at $2.7\ \mu\text{m}$ [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(9): 706-707.
- [16] Schneider J. Continuous-wavelength lasing at $2.7\ \mu\text{m}$ in Er³⁺-doped fluoride fibers with low P³⁺-codoping [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 8-13, 1994, Anaheim, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 1994: CTuK81.
- [17] Schneider J, Hauschild D, Frerichs C, *et al.* Highly efficient Er³⁺ : Pr³⁺-codoped CW fluorozirconate fiber laser operating at $2.7\ \mu\text{m}$ [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1994, 15(11): 1907-1922.
- [18] Bedö S, Lüthy W, Weber H P. Limits of the output power in Er³⁺:ZBLAN singlemode fibre lasers [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(3): 199-200.
- [19] Ghisler C, Pollnau M, Bunea C, *et al.* Up-conversion cascade laser at $1.7\ \mu\text{m}$ with simultaneous $2.7\ \mu\text{m}$ lasing in erbium ZBLAN fibre [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(5): 373-374.
- [20] Bedö S, Pollnau M, Lüthy W, *et al.* Saturation of the $2.71\ \mu\text{m}$ laser output in erbium-doped ZBLAN fibers [J]. *Optics Communications*, 1995, 116(1/2/3): 81-86.
- [21] Pollnau M, Ghisler C, Bunea G, *et al.* 150 mW unsaturated output power at $3\ \mu\text{m}$ from a single-mode-fiber erbium cascade laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 66(26): 3564-3566.
- [22] Schneider J. Mid-infrared fluoride fiber lasers in multiple cascade operation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, 7(4): 354-356.
- [23] Pollnau M, Spring R, Ghisler C, *et al.* Efficiency of erbium $3\text{-}\mu\text{m}$ crystal and fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(4): 657-663.
- [24] Frerichs C, Unrau U B. Passive Q-switching and mode-locking of erbium-doped fluoride fiber lasers at $2.7\ \mu\text{m}$ [J]. *Optical Fiber Technology*, 1996, 2(4): 358-366.
- [25] Pollnau M, Ghisler C, Lüthy W, *et al.* Three-transition cascade erbium laser at $1.7, 2.7,$ and

- 1.6 μm [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(9): 612-614.
- [26] Poppe E, Srinivasan B, Jain R K. 980 nm diode-pumped continuous wave mid-IR (2.7 μm) fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(24): 2331-2333.
- [27] Srinivasan B, Poppe E, Jain R K. 40 mW single-transverse-mode mid-IR (2.7 μm) CW output from a simple mirror-free 780-nm diode-pumped fiber laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 3-8, 1998, San Francisco, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 1998: CWM2.
- [28] Srinivasan B, Tafoya J, Jain R K. High-power "watt-level" CW operation of diode-pumped 2.7 μm fiber lasers using efficient cross-relaxation and energy transfer mechanisms[J]. *Optics Express*, 1999, 4(12): 490-495.
- [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] Dickinson B C, Golding P S, Jackson S D, *et al.* Gain-switched 3- μm Er:Pr-codoped fiber laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000). Technical Digest. Postconference Edition. TOPS Vol. 39 (IEEE Cat. No. 00CH37088), May 7-12, 2000, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2000: CMP3.
- [32] Jackson S D, King T A, Pollnau M. Efficient high power operation of erbium 3 μm fibre laser diode-pumped at 975 nm[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(3): 223-224.
- [33] Libatique N J C, Tafoya J D, Feng S H, *et al.* A compact diode-pumped passively Q-switched mid-IR fiber laser [C] // *Advanced Solid State Lasers*, February 13, 2000, Davos, Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2000: MD2.
- [34] Libatique N J C, Tafoya J D, Viswanathan N, *et al.* A "field-usable" diode-pumped \sim 120-nm wavelength-tunable CW mid-IR fiber laser [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 7-11, 2000, San Francisco, California United States. Washington, D.C.: OSA, 2000: CThV8.
- [35] Dickinson B C, Golding P S, Pollnau M, *et al.* Investigation of a 791-nm pulsed-pumped 2.7- μm Er-doped ZBLAN fibre laser [J]. *Optics Communications*, 2001, 191: 315-321.
- [36] Pollnau M, Jackson S D. Erbium 3 μm fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(1): 30-40.
- [37] Linden K J. Fiber laser with 1.2-W CW output power at 2712 nm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(2): 401-403.
- [38] Coleman D J, King T A, Ko D K, *et al.* Q-switched operation of a 2.7 μm cladding-pumped Er³⁺/Pr³⁺ codoped ZBLAN fibre laser[J]. *Optics Communications*, 2004, 236(4/5/6): 379-385.
- [39] Segi T, Shima K, Sakai T, *et al.* 3- μm -band high output erbium-doped fiber lasers[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference and Photonic Applications Systems Technologies, May 16-21, 2004, San Francisco, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2004: CThZ5.
- [40] Tafoya J, Pierce J W, Jain R K, *et al.* Efficient and compact high-power mid-IR (\sim 3 μm) lasers for surgical applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5312: 218-222.
- [41] Zhu X S, Jain R. 10-W-level diode-pumped compact 2.78 μm ZBLAN fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(1): 26-28.
- [42] Zhu X S, Jain R. Compact 2 W wavelength-tunable Er:ZBLAN mid-infrared fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2381-2383.
- [43] Zhu X S, Jain R. Watt-level 100-nm tunable 3- μm fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(2): 156-158.
- [44] Zhu X S, Jain R. Watt-level Er-doped and Er-Pr-codoped ZBLAN fiber amplifiers at the 2.7-2.8 μm wavelength range [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(14): 1578-1580.
- [45] Jackson S D. High-power erbium cascade fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(16): 830-832.
- [46] Bernier M, Faucher D, Caron N, *et al.* Highly stable and efficient erbium-doped 2.8 μm all fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(19): 16941-16946.
- [47] 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.
- [48] Faucher D, Bernier M, Caron N, *et al.* Erbium-doped all-fiber laser at 2.94 μm [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3313-3315.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] Gorjan M, Petkovšek R, Marinček M, *et al.* High-power pulsed diode-pumped Er : ZBLAN fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1923-1925.
- [52] 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.
- [53] Faucher D, Caron N, Bernier M, *et al.* QCW all-fiber laser at 2.94 μm [C] // *Lasers, Sources, and Related Photonic Devices*, February 1-2, 2012, San Diego, California, United States. Washington, D. C. : OSA, 2012: FTh4A.6.
- [54] Tsai T Y, Fang Y C, Tsao H X, *et al.* Passively cascade-pulsed erbium ZBLAN all-fiber laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 12787-12792.
- [55] Wei C, Zhu X S, Norwood R A, *et al.* Passively Q-switched 2.8- μm nanosecond fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(19): 1741-1744.
- [56] Wei C, Zhu X S, Norwood R A, *et al.* Passively continuous-wave mode-locked Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3849-3851.
- [57] 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*, October 27-November 1, 2013, Paris France. Washington, D.C. : OSA, 2013: AF2A.9.
- [58] Wei C, Zhu X S, Wang F, *et al.* Graphene Q-switched 2.78 μm Er³⁺-doped fluoride fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3233-3236.
- [59] Haboucha A, Fortin V, Bernier M, *et al.* Fiber Bragg grating stabilization of a passively mode-locked 2.8 μm Er³⁺ : fluoride glass fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3294-3297.
- [60] Zhu G W, Zhu X S, Norwood R A, *et al.* Experimental and numerical investigations on Q-switched laser-seeded fiber MOPA at 2.8 μm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(23): 4553-4557.
- [61] Shen Y L, Huang K, Zhou S Q, *et al.* Gain-switched 2.8 μm Er³⁺-doped double-clad ZBLAN fiber laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9543: 95431E.
- [62] Bernier M, Michaud-Belleau V, Lévassieur S, *et al.* All-fiber DFB laser operating at 2.8 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 81-84.
- [63] Duval S, Bernier M, Fortin V, *et al.* Femtosecond fiber lasers reach the mid-infrared [J]. *Optica*, 2015, 2(7): 623-626.
- [64] 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.
- [65] Hu T, Jackson S D, Hudson D D. Ultrafast pulses from a mid-infrared fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4226-4228.
- [66] Hu T, Jackson S D, Hudson D D. A mid-infrared mode-locked fiber laser for frequency combs [C] // *Nonlinear Optics*, July 26-31, 2015, Kauai, Hawaii, United States. Washington, D.C. : OSA, 2015: NTh2A.4.
- [67] Hu T, Jackson S D, Hudson D D. Femtosecond mode-locked pulses from a mid-infrared fiber laser [C] // *2015 European Conference on Lasers and Electro-Optics - European Quantum Electronics Conference*, June 21-25, 2015, Munich, Germany. Washington, D.C. : OSA, 2015: CJ_5_2.
- [68] 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.
- [69] Tang P H, Qin Z P, Liu J, *et al.* Watt-level passively mode-locked Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4855-4888.
- [70] Wan P, Yang L M, Bai S, *et al.* High energy 3 μm ultrafast pulsed fiber laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 9527-9532.
- [71] Duval S, Olivier M, Fortin V, *et al.* 23-kW peak power femtosecond pulses from a mode-locked fiber ring laser at 2.8 μm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 972802.
- [72] Duval S, Gauthier J C, Robichaud L R, *et al.* Watt-level fiber-based femtosecond laser source tunable from 2.8 to 3.6 μm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5294-5297.
- [73] Shen Y L, Wang Y S, Chen H W, *et al.* High average power continuous-wave mode-locked mid-infrared fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0615001.

- 沈炎龙, 王屹山, 谌鸿伟, 等. 高平均功率连续锁模中红外光纤激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0615001.
- [74] Henderson-Sapir O, Jackson S D, Ottaway D J. Versatile and widely tunable mid-infrared erbium doped ZBLAN fiber laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1676-1679.
- [75] Li J F, Wang L L, Luo H Y, *et al.* High power cascaded erbium doped fluoride fiber laser at room temperature [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(6): 673-676.
- [76] Liu J, Huang B, Tang P H, *et al.* Volume Bragg grating based tunable continuous-wave and Bi₂Te₃ Q-switched Er³⁺: ZBLAN fiber laser [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, June 5-10, 2016, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: AW1K.7.
- [77] Luo H Y, Li J, Xie J T, *et al.* High average power and energy microsecond pulse generation from an erbium-doped fluoride fiber MOPA system [J]. Optics Express, 2016, 24(25): 29022-29032.
- [78] 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.
- [79] Shen Y L, Wang Y S, Luan K P, *et al.* Watt-level passively Q-switched heavily Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26659.
- [80] Tang P H, Wu M, Wang Q K, *et al.* 2.8- μ m pulsed Er³⁺: ZBLAN fiber laser modulated by topological insulator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(14): 1573-1576.
- [81] Zhang T, Feng G Y, Zhang H, *et al.* Compact watt-level passively Q-switched ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF fiber laser at 2.8 μ m using Fe²⁺: ZnSe saturable absorber mirror[J]. Optical Engineering, 2016, 55(8): 086106.
- [82] Zhang T, Feng G Y, Zhang H, *et al.* 2.78 μ m passively Q-switched Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser based on PLD-Fe²⁺: ZnSe film[J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(7): 075102.
- [83] Zhu G W, Zhu X S, Wang F Q, *et al.* Graphene mode-locked fiber laser at 2.8 μ m [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(1): 7-10.
- [84] Aydin Y O, Fortin V, Maes F, *et al.* High efficiency cascade fiber laser at 2.8 μ m [C] // 2017 European Conference on Lasers and Electro-Optics and European Quantum Electronics Conference, June 25-29, 2017, Munich, Germany. Washington, D.C.: OSA, 2017: CJ_9_6.
- [85] Aydin Y O, Fortin V, Maes F, *et al.* Diode-pumped mid-infrared fiber laser with 50% slope efficiency[J]. Optica, 2017, 4(2): 235-238.
- [86] Paradis P, Fortin V, Aydin Y O, *et al.* All-fiber gain-switched laser at 2.8 microns [C] // Laser Congress 2017 (ASSL, LAC), October 1-5, 2017, Nagoya, Aichi Japan. Washington, D.C.: OSA, 2017: AT4A.5.
- [87] Shen Y L, Wang Y S, Luan K P, *et al.* Efficient wavelength-tunable gain-switching and gain-switched mode-locking operation of a heavily Er³⁺-doped ZBLAN mid-infrared fiber laser [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1504510.
- [88] Shen Y L, Zhou S Q, Chen H W, *et al.* Output characteristics of Q-switched mid-infrared fiber laser with a mechanical chopper [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0114002.
- 沈炎龙, 周松青, 谌鸿伟, 等. 中红外 2.8 μ m 光纤激光器机械调 Q 工作特性[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0114002.
- [89] Wei C, Luo H Y, Shi H X, *et al.* Widely wavelength tunable gain-switched Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser around 2.8 μ m [J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8816-8827.
- [90] Wei C, Zhang H, Shi H, *et al.* Over 5-W passively Q-switched mid-infrared fiber laser with a wide continuous wavelength tuning range [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(11): 881-884.
- [91] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, *et al.* Towards power scaling of 2.8 μ m fiber lasers [J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [92] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, *et al.* High power splice-less fiber laser at 2825 nm [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 13-18, 2018, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2018: ST4K.2.
- [93] Lai X, Li J F, Luo H Y, *et al.* High power passively Q-switched Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser at 2.8 μ m based on a semiconductor saturable absorber mirror [J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(8): 085109.
- [94] Liu J, Wu M, Huang B, *et al.* Widely wavelength-tunable mid-infrared fluoride fiber lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,

- 2018, 24(3): 0900507.
- [95] Ning S G, Feng G Y, Dai S Y, *et al.* Mid-infrared $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ semiconductor saturable absorber mirror for passively Q-switched Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser[J]. AIP Advances, 2018, 8(2): 025121.
- [96] Ning S G, Feng G Y, Zhang H, *et al.* Fabrication of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ nanocrystals and application for a passively Q-switched fiber laser [J]. Optical Materials Express, 2018, 8(4): 865-874.
- [97] Paradis P, Fortin V, Aydin Y O, *et al.* 10 W-level gain-switched all-fiber laser at 2.8 μm [J]. Optics Letters, 2018, 43(13): 3196-3199.
- [98] Qin Z P, Xie G Q, Ma J G, *et al.* 2.8 μm all-fiber Q-switched and mode-locked lasers with black phosphorus[J]. Photonics Research, 2018, 6(11): 1074-1078.
- [99] Xie G Q, Qin Z P. Mid-infrared ultrafast lasers based on two-dimension materials [C] // CLEO Pacific Rim Conference 2018, July 29-August 3, 2018, Hong Kong, China. Washington, D. C.: OSA, 2018: Th2G.2.
- [100] Zhang W, Feng G Y, Dai S Y, *et al.* Q-switched mid-infrared $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ fiber laser based on gold nanocrystals [J]. Laser Physics, 2018, 28 (9): 095104.
- [101] Zhang W, Zhang H, Feng G Y, *et al.* Gold nanobipyramids as a saturable absorber for passively Q-switched $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 30-34.
- [102] Wetenkamp L. Efficient CW operation of a 2.9 μm Ho^{3+} -doped fluorozirconate fibre laser pumped at 640 nm [J]. Electronics Letters, 1990, 26 (13): 883-884.
- [103] Sumiyoshi T, Sekita H. Dual wavelength (3 μm and 2 μm) CW cascade oscillation of a holmium-doped double-clad fiber laser [C] // Conference Proceedings. LEOS '97. 10th Annual Meeting IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1997 Annual Meeting, November 10-13, 1997, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 1997: 534-535.
- [104] Sumiyoshi T, Sekita H. Dual-wavelength continuous-wave cascade oscillation at 3 and 2 μm with a holmium-doped fluoride-glass fiber laser[J]. Optics Letters, 1998, 23(23): 1837-1839.
- [105] Sumiyoshi T, Sekita H, Arai T, *et al.* High-power continuous-wave 3- and 2- μm cascade $\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$ fiber laser and its medical applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(4): 936-943.
- [106] Naruse K, Arai T, Kawauchi S, *et al.* Theoretical study of variable function (cutting/coagulating) laser surgical system using continuous-wave 3 μm , 2 μm cascade $\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$ fiber laser [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4257: 334-340.
- [107] Jackson S D. 210 mW 2.84 μm Ho^{3+} , Pr^{3+} -doped fluoride fibre laser [J]. Electronics Letters, 2003, 39(10): 772-773.
- [108] Jackson S D. Singly Ho^{3+} -doped fluoride fibre laser operating at 2.92 μm [J]. Electronics Letters, 2004, 40(22): 1400-1401.
- [109] Jackson S D. Single-transverse-mode 2.5-W holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.86 μm [J]. Optics Letters, 2004, 29 (4): 334-336.
- [110] Qamar F Z, King T A, Jackson S D, *et al.* Holmium, praseodymium-doped fluoride fiber laser operating near 2.87 μm and pumped with a Nd:YAG laser [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(12): 4315-4320.
- [111] Jackson S D. Midinfrared holmium fiber lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2006, 42 (2): 187-191.
- [112] Talavera D V, Mejía E B. Holmium-doped fluoride fiber laser at 2950 nm pumped at 1175 nm [J]. Laser Physics, 2006, 16(3): 436-440.
- [113] Jackson S D, Bugge F, Erbert G. Directly diode-pumped holmium fiber lasers [J]. Optics Letters, 2007, 32(17): 2496-2498.
- [114] Jackson S D. High-power and highly efficient diode-cladding-pumped holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.94 μm [J]. Optics Letters, 2009, 34 (15): 2327-2329.
- [115] Hudson D D, Anderson L, Magi E, *et al.* Diode-pumped Ho^{3+} , Pr^{3+} -doped fluoride glass double clad fibre laser tuneable from 2.825 μm to 2.90 μm [C] // 2011 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July 18-20, 2011, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE, 2011: 87-88.
- [116] Hudson D D, Magi E, Gomes L, *et al.* 1 W diode-pumped tunable Ho^{3+} , Pr^{3+} -doped fluoride glass fibre laser [J]. Electronics Letters, 2011, 47(17): 985-986.
- [117] Li J F, Hudson D D, Jackson S D. High-power diode-pumped fiber laser operating at 3 μm [J]. Optics Letters, 2011, 36(18): 3642-3644.
- [118] Hu T, Hudson D D, Jackson S D. Actively Q-

- switched 2.9 μm Ho^{3+} Pr^{3+} -doped fluoride fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2145-2147.
- [119] Li J F, Hu T, Jackson S D. Dual wavelength Q-switched cascade laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2208-2210.
- [120] Li J F, Hu T, Jackson S D. Q-switched induced gain switching of a two-transition cascade laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13123-13128.
- [121] Li J F, Hudson D D, Jackson S D. Tuned cascade laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(14): 1215-1217.
- [122] Li J F, Hudson D D, Liu Y, *et al.* Efficient 2.87 μm fiber laser passively switched using a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3747-3749.
- [123] Hu T, Jackson S D, Hudson D D. High peak power actively Q-switched Ho^{3+} , Pr^{3+} -co-doped fluoride fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(12): 766-767.
- [124] Hudson D D, Jackson S D. Fiber lasers open gateway to the mid-IR[J]. *SPIE Newsroom*, 2013.
- [125] Hudson D D, Williams R J, Withford M J, *et al.* Single-frequency fiber laser operating at 2.9 μm [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2388-2390.
- [126] Li J F, Yang Y, Hudson D D, *et al.* A tunable Q-switched Ho^{3+} -doped fluoride fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(4): 045107.
- [127] Zhu G W, Zhu X S, Balakrishnan K, *et al.* Fe^{2+} : ZnSe and graphene Q-switched singly Ho^{3+} -doped ZBLAN fiber lasers at 3 μm [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(9): 1365-1377.
- [128] Hu T, Hudson D D, Jackson S D. Stable, self-starting, passively mode-locked fiber ring laser of the 3 μm class[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2133-2136.
- [129] Li J F, Luo H Y, He Y L, *et al.* Semiconductor saturable absorber mirror passively Q-switched 2.97 μm fluoride fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(6): 065102.
- [130] Crawford S, Hudson D D, Jackson S D. High-power broadly tunable 3- μm fiber laser for the measurement of optical fiber loss [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1502309.
- [131] Li J F, Luo H Y, Wang L L, *et al.* Mid-infrared passively switched pulsed dual wavelength Ho^{3+} -doped fluoride fiber laser at 3 μm and 2 μm [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10770.
- [132] Li J F, Luo H Y, Wang L L, *et al.* Tunable Fe^{2+} : ZnSe passively Q-switched Ho^{3+} -doped ZBLAN fiber laser around 3 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22362-22370.
- [133] Li J F, Luo H Y, Wang L L, *et al.* 3- μm mid-infrared pulse generation using topological insulator as the saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3659-3662.
- [134] Antipov S, Hudson D D, Fuerbach A, *et al.* High-power mid-infrared femtosecond fiber laser in the water vapor transmission window [J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1373-1376.
- [135] Li J F, Luo H Y, Zhai B, *et al.* Black phosphorus: a two-dimension saturable absorption material for mid-infrared Q-switched and mode-locked fiber lasers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30361.
- [136] 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.
- [137] Bharathan G, Woodward R I, Ams M, *et al.* Direct inscription of Bragg gratings into coated fluoride fibers for widely tunable and robust mid-infrared lasers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30013-30019.
- [138] Hudson D D, Antipov S, Fuerbach A, *et al.* Ultrafast fiber lasers in the 3 μm water window[C] // *Nonlinear Optics*, July 17-21, 2017, Waikoloa, Hawaii, United States. Washington, D.C.: OSA, 2017: NTu3A.4.
- [139] Hudson D D, Antipov S, Li L Z, *et al.* Octave-spanning supercontinuum in the mid-IR with a 3 μm ultrafast fiber laser[C] // *Nonlinear Optics*, July 17-21, 2017, Waikoloa, Hawaii, United States. Washington, D.C.: OSA, 2017: NTu3A.3.
- [140] Hudson D D, Antipov S, Li L Z, *et al.* Toward all-fiber supercontinuum spanning the mid-infrared[J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1163-1166.
- [141] Luo H Y, Li J F, Zhu C, *et al.* Cascaded gain-switching in the mid-infrared region[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 16891.
- [142] Wei C, Shi H X, Luo H Y, *et al.* 34 nm-wavelength-tunable picosecond $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ -codoped ZBLAN fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19170-19178.
- [143] Woodward R I, Hudson D D, Fuerbach A, *et al.* Generation of 70-fs pulses at 2.86 μm from a mid-

- infrared fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42 (23): 4893-4896.
- [144] Woodward R I, Hudson D D, Fuerbach A, *et al.* Mid-infrared few-cycle pulse generation with a Ho : ZBLAN fibre laser [C] // Australian and New Zealand Conference on Optics and Photonics. [S.l. : S.n.], 2017: 115.
- [145] Jia S J, Jia Z X, Yao C F, *et al.* 2875 nm lasing from Ho³⁺-doped fluorindate glass fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(4): 323-326.
- [146] Luo H Y, Li J F, Hai Y C, *et al.* State-switchable and wavelength-tunable gain-switched mid-infrared fiber laser in the wavelength region around 2.94 μm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 63-79.
- [147] Shi Y W, Li J F, Luo H Y, *et al.* Low-threshold dual-waveband 3 μm and 2 μm pulse generation based on hybrid pumping [C] // CLEO Pacific Rim Conference 2018, July 29-August 3, 2018, Hong Kong, China. Washington, D. C.: OSA, 2018: F1A.3.
- [148] Tian X L, Luo H Y, Wei R F, *et al.* An ultrabroadband mid-infrared pulsed optical switch employing solution-processed bismuth oxyselenide [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(31): 1801021.
- [149] Woodward R I, Hudson D D, Fuerbach A, *et al.* Few-cycle pulse generation from a 3 μm fiber laser [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 13-18, 2018, San Jose, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2018: STh4K.1.
- [150] Luo H Y, Kang Z, Gao Y, *et al.* Large aspect ratio gold nanorods (LAR-GNRs) for mid-infrared pulse generation with a tunable wavelength near 3 μm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4886-4896.
- [151] Majewski M R, Woodward R I, Jackson S D. Ultrafast mid-infrared fiber laser mode-locked using frequency-shifted feedback [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1698-1701.
- [152] Shi Y W, Li J F, Luo H Y, *et al.* Gain-switched dual-waveband Ho³⁺-doped fluoride fiber laser based on hybrid pumping [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 46-49.
- [153] Jackson S D. Continuous wave 2.9 μm dysprosium-doped fluoride fiber laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(7): 1316-1318.
- [154] Tsang Y H, El-Taher A E, King T A, *et al.* Efficient 2.96 μm dysprosium-doped fluoride fibre laser pumped with a Nd : YAG laser operating at 1.3 μm [J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 678-685.
- [155] Tsang Y H, El-Taher A E. Efficient lasing at near 3 μm by a Dy-doped ZBLAN fiber laser pumped at $\sim 1.1 \mu\text{m}$ by an Yb fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 8(11): 818-822.
- [156] Majewski M R, Jackson S D. Highly efficient mid-infrared dysprosium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2173-2176.
- [157] Majewski M R, Jackson S D. Tunable dysprosium laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(19): 4496-4498.
- [158] Majewski M R, Jackson S D. Efficient in-band pumped Dy : ZBLAN mid-infrared fiber laser [C] // Photonics and Fiber Technology 2016 (ACOFT, BGPP, NP), September 5-8, 2016, Sydney, Australia. Washington, D. C.: OSA, 2016: AM2C.2.
- [159] Majewski M R, Jackson S D. Recent progress in 3 micron class dysprosium-doped fluoride fiber lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10083: 1008317.
- [160] Majewski M R, Woodward R I, Jackson S D. Near infrared pumped full gain bandwidth tunable 3 micron dysprosium fiber laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10512: 105120U.
- [161] Majewski M R, Woodward R I, Jackson S D. 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.
- [162] Woodward R I, Majewski M R, Bharathan G, *et al.* Watt-level dysprosium fiber laser at 3.15 μm with 73% slope efficiency [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1471-1474.
- [163] Woodward R I, Majewski M R, Jackson S D. Mode-locked dysprosium fiber laser: picosecond pulse generation from 2.97 to 3.30 μm [J]. *APL Photonics*, 2018, 3(11): 116106.
- [164] Woodward R I, Majewski M R, Jackson S D. Electronically tunable mid-infrared mode-locked dysprosium fiber laser with over 330 nm tunability [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10897: 108970R.
- [165] Fortin V, Jobin F, Larose M, *et al.* 10-W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24 μm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 491-494.
- [166] Wang Y C, Jobin F, Duval S, *et al.* Ultrafast Dy³⁺ : fluoride fiber laser beyond 3 μm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 395-398.

- [167] Majewski M R, Woodward R I, Carreé J Y, *et al.* Emission beyond 4 μm and mid-infrared lasing in a dysprosium-doped indium fluoride (InF_3) fiber [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1926-1929.
- [168] Bagdasarov K S, Zhekov V I, Lobachev V A, *et al.* Steady-state emission from a $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Er}^{3+}$ laser ($\lambda = 2.94 \mu\text{m}$, $T = 300^\circ\text{K}$) [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1983, 13(2): 262-263.
- [169] Zhekov V I, Lobachev V A, Murina T M, *et al.* Efficient cross-relaxation laser emitting at $\lambda = 2.94 \mu\text{m}$ [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1983, 13(9): 1235-1237.
- [170] Pollack S A, Chang D B, Moise N L. Continuous wave and Q-switched infrared erbium laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(23): 1578-1580.
- [171] Auzel F, Meichenin D, Poignant H. Laser cross-section and quantum yield of Er^{3+} at 2.7 μm in a ZrF_4 -based fluoride glass [J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(15): 909-910.
- [172] Johnson L F, Guggenheim H J. Laser emission at 3 μm from Dy^{3+} in BaY_2F_8 [J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 23(2): 96-98.
- [173] Alcock I P, Tropper A C, Ferguson A I, *et al.* Q-switched operation of a neodymium-doped monomode fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 1986, 22(2): 84-85.
- [174] Alcock I P, Ferguson A I, Hanna D C, *et al.* Mode-locking of a neodymium-doped monomode fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 1986, 22(5): 268-269.
- [175] Wetenkamp L, Frerichs C, West G F, *et al.* Efficient CW operation of tunable fluorozirconate fibre lasers at wavelengths pumpable with semiconductor laser diodes [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1992, 140: 19-24.
- [176] Shi H X. The research on wavelength-tunable pulsed fiber lasers around 3 μm [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 20-22.
史红霞. 3 μm 波段可调谐脉冲光纤激光器基础研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 20-22.
- [177] Kir'Yanov A V, Barmenkov Y O. Self-Q-switched ytterbium-doped all-fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2006, 3(10): 498-502.
- [178] Luo Z Q, Ruan Q J, Zhong M, *et al.* Compact self-Q-switched green upconversion $\text{Er}:\text{ZBLAN}$ all-fiber laser operating at 543.4 nm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2258-2261.
- [179] Li W W, Wang H J, Du T J, *et al.* Compact self-Q-switched, tunable mid-infrared all-fiber pulsed laser [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34497-34502.