

• 特邀综述 •

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 工作波长位于 3 μm 的中红外光纤激光器, 因其位于水分子以及诸多气体和生物分子的吸收峰, 被广泛应用于激光医疗、遥感、大气监测、光谱学和军事领域。本论文首先介绍了 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, 并更好地满足不同领域的应用需求。

关键词 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 0436 **文献标识码** A

Research Progress of Rare-earth Ion Doped Fiber Lasers at 3 μm

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

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

Abstract Mid-infrared fiber lasers operating at 3 μm are widely applied in laser medical, remote sensing, atmospheric monitoring, spectroscopy and military fields thanks to their wavelength which lies in the absorption peaks of water molecule and many gas molecules as well as biomolecules. In this paper, the fiber hosts and gain ions commonly used in 3 μm fiber lasers are introduced, and the working principle of 3 μm rare earth ion doped fiber lasers are briefly analyzed, and then research progress of different 3 μm rare-earth ion doped fiber lasers are reviewed. Therein, mode-locked mid-infrared fiber lasers, miniaturized mid-infrared all-fiber lasers and mid-infrared fiber lasers with longer wavelength of 3-4 μm have become a hot spot currently. With the rapid development of 3 μm mid-infrared fiber lasers in recent years, 3 μm fiber lasers with more compact structure and superior performance are emerging, which will greatly promote the process of commercialization and practical application, and better meet the requirements in different fields.

Key words fiber laser; mid-infrared; rare-earth ion; fluoride fiber; miniaturized

OCIS codes 140.3510; 140.3070; 060.2390; 160.5690

收稿日期: 年-月-日; **修回日期:** 年-月-日; **录用日期:** 年-月-日

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

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基于激光物理学的“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 $3\ \mu\text{m}$ 的中红外激光器，因其位于水分子以及大气中很多气体分子的吸收峰，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，因此 $3\ \mu\text{m}$ 激光器还是激光医疗领域所需的理想光源，并已经被用于各种激光手术当中^[1]。目前，常见的 $3\ \mu\text{m}$ 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光纤激光器^[5]这几种类型。近年来， $3\ \mu\text{m}$ 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。

在本文中，我们将首先对 $3\ \mu\text{m}$ 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 $3\ \mu\text{m}$ 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 $3\ \mu\text{m}$ 光纤激光器领域所做的研究工作，最后展望 $3\ \mu\text{m}$ 光纤激光器未来的发展趋势和应用前景。

2 稀土掺杂 $3\ \mu\text{m}$ 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，不同类型的光纤被陆续应用于光纤激光器中，其中，最常用同时也发展最成熟的是石英光纤。虽然在近红外波段的激光应用中大放异彩，然而，石英光纤对 $2.5\ \mu\text{m}$ 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，这大大限制了其在中红外波段的应用。相比之下，被称为“软玻璃光纤”的氟化物光纤却在 $3\ \mu\text{m}$ 以及更长波长的中红外区域具有很好的透明性。因此， $3\ \mu\text{m}$ 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 $3\ \mu\text{m}$ 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 $>3.5\ \mu\text{m}$ 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，锆酸盐光纤、碲化物光纤、硫化物光纤也在中红外波段具有很好的透明性，也有潜力应用于中红外光纤激光器中。然而，锆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 $3\ \mu\text{m}$ 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 $3\ \mu\text{m}$ 波段的激光发射。

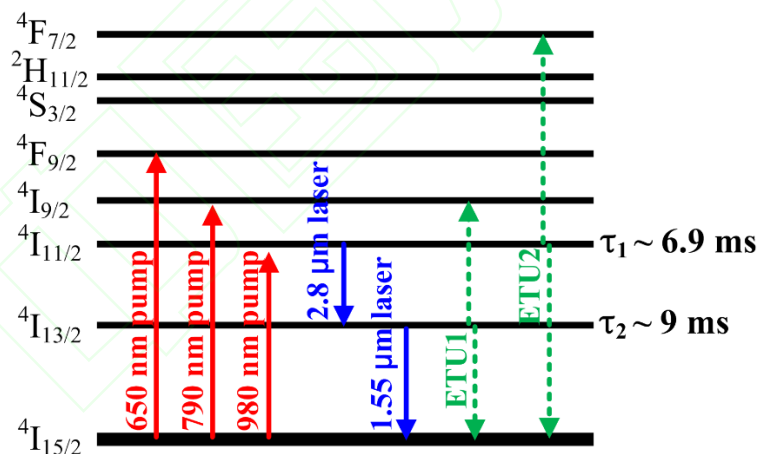


图1 Er^{3+} 简化能级跃迁图

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

对掺 Er^{3+} 光纤激光器^[7-101]而言，如图 1.3 所示，主要使用 650 nm、790 nm、980 nm 等波长的激光作为泵浦源，当使用波长为 650 nm 和 790 nm 的激光泵浦时，基态 (${}^4\text{I}_{15/2}$) 粒子吸收泵浦光之后分别跃迁到 ${}^4\text{F}_{9/2}$ 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 $3\ \mu\text{m}$ 激光上能级 ${}^4\text{I}_{11/2}$ ，而波长为 980 nm 的泵浦光可以直接将基态粒子泵浦到 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级，因此理论上具有更高的量子效率，也是最常使用的泵浦波长。激光上能级的粒子最后经过受激辐射

跃迁到激光下能级 ${}^4I_{13/2}$ ，同时产生 3 μm 激光。需要注意的是，由于 3 μm 激光的上能级寿命 (${}^4I_{11/2}$, $\tau_1=6.9\text{ ms}$) 相比下能级寿命 (${}^4I_{13/2}$, $\tau_2=9\text{ ms}$) 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，提高了对泵浦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，人们提出了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 ${}^4I_{13/2}$ 与基态 ${}^4I_{15/2}$ 之间，能够有效消耗 ${}^4I_{13/2}$ 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+} 作为钝化剂，通过 Er^{3+} 的 ${}^4I_{13/2}$ 能级与 Pr^{3+} 的 3F_3 能级之间的能量转移减少 Er^{3+} 的 ${}^4I_{13/2}$ 能级（即 3 μm 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（Energy-transfer upconversion, ETU）过程，主要包括 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{15/2}$ （ETU1）和 ${}^4I_{11/2}$, ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$, ${}^4I_{15/2}$ （ETU2）这两种同时存在的上转换过程，如图 1 所示。这种方法已经被证明能有效减轻粒子数瓶颈问题，并显著提高 3 μm 掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器的工作效率。

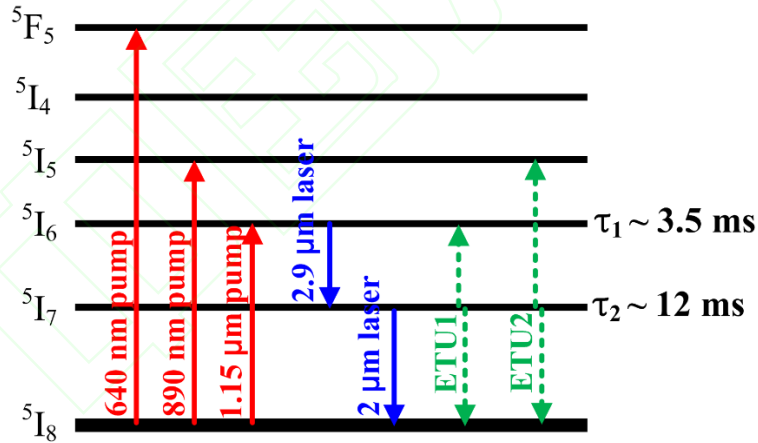


图2 Ho^{3+} 简化能级跃迁图

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

对掺 Ho^{3+} 光纤激光器^[102-152]而言，如图 2 所示，常常采用 640 nm、890 nm 和 1.15 μm (1.1 μm) 等波长的激光作为泵浦源，其中，640 nm 泵浦光可以将 Ho^{3+} 从基态能级 5I_8 抽运到 5F_5 能级，890 nm 泵浦光可以将 Ho^{3+} 抽运到 5I_5 能级，而 1.15 μm 波段的泵浦光可以直接将 Ho^{3+} 抽运到 3 μm 激光的上能级，即 5I_6 能级，由于泵浦效率很高，是目前 3 μm 掺 Ho^{3+} 氟化物光纤激光器中最常用的泵浦源。与 Er^{3+} 类似，在 Ho^{3+} 的能级系统中，3 μm 激光的上能级寿命 (5I_6 , $\tau_1=3.5\text{ ms}$) 明显短于下能级寿命 (5I_7 , $\tau_2=12\text{ ms}$)，因此，掺 Ho^{3+} 氟化物光纤

激光器同样存在着粒子数瓶颈的问题，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 μm 激光与 2 μm 激光级联激光^[105]，2 μm 激光的上能级 $^5\text{I}_7$ 正好 3 μm 激光的下能级，因此 2 μm 激光的产生能有效减少 3 μm 激光下能级的粒子数，有利于实现 3 μm 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 μm 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的过程^[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，并同时减少 3 μm 激光下能级粒子数。

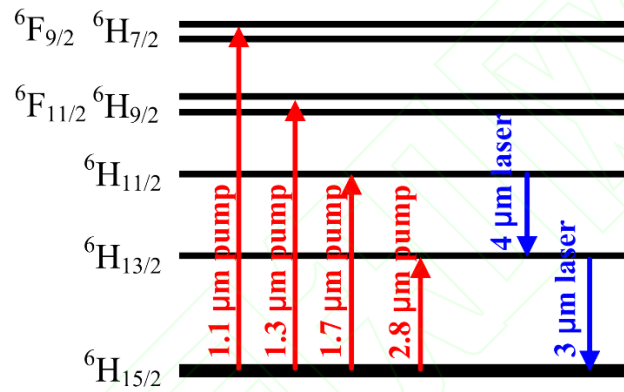


图3 Dy^{3+} 简化能级跃迁图

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

Dy^{3+} 是 3 μm 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 μm 掺 Dy^{3+} 光纤激光器^[153-167] 可以使用波长为 1.1 μm 、1.3 μm 和 1.7 μm 的激光作为泵浦源。其中，1.1 μm 的泵浦光可以将位于基态 $^6\text{H}_{15/2}$ 的粒子抽运到 $^6\text{H}_{7/2}$ 能级和 $^6\text{F}_{9/2}$ 能级，1.3 μm 的泵浦光可以将位于基态 $^6\text{H}_{15/2}$ 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 μm 的泵浦光后可以跃迁到 $^6\text{H}_{11/2}$ 。被抽运到高能级的粒子经过无辐射跃迁到达 3 μm 激光的上能级 $^6\text{H}_{13/2}$ ，最终受激辐射产生 3 μm 激光，同时回到基态能级。随着半导体激光器泵浦的掺 Yb^{3+} 光纤激光器和掺 Nd^{3+} 固体激光器不断发展成熟，1.1 μm 和 1.3 μm 波长的激光最早开始被用作 3 μm 掺 Dy^{3+} 光纤激光器的泵浦源^[153,154]。然而，这两种波长的泵浦光也会引入激发态吸收和上转换过程，导致泵浦效率相对较低，激光阈值较高。于是，人们开始探索更高效的泵浦波长，1.7 μm 激光因其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 μm 激光源。由于输出波长为 2.8 μm 的中红外掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器不断发展成熟并获得较高输出功率，近年来，也有报道将其

作为激光泵浦源^[156-158]，并带内泵浦掺 Dy³⁺氟化物光纤激光器，产生更长波长（如 3.2 μm）的中红外激光。

3 稀土离子掺杂 3 μm 光纤激光器的研究进展

3.1 3 μm 光纤激光器输出功率的发展

本部分将介绍 3 μm 光纤激光器在输出功率方面的进展。首先，我们总结了三种不同的 3 μm 光纤激光器输出功率提升的典型报道，如表 1 所示。

表 1 3 μm 光纤激光器输出功率提升的典型报道

Table 1 Typical reports on power scaling of 3 μm fiber lasers

Year	Gain ion	Pump wavelength	Output power	Slope efficiency	Laser wavelength	Ref.
1988	Er ³⁺	476.5 nm	-	-	2.7 μm	[7]
1990	Er ³⁺	792 nm	330 μW	3%	2.71-2.78 μm	[10]
1995	Er ³⁺	791 nm	158 mW	22.6%	2.71 μm	[21]
1999	Er ³⁺ /Pr ³⁺	790 nm	1.7 W	17.3%	2.71 μm	[29]
2004	Er ³⁺	976 nm	3.5 W	-	2.8 μm	[39]
2007	Er ³⁺	975 nm	9 W	21.3%	2.785 μm	[41]
2009	Er ³⁺	975 nm	24 W	14.5%	2.8 μm	[47]
2015	Er ³⁺	980 nm	30.5 W	16%	2.938 nm	[64]
2018	Er ³⁺	980 nm	41.6 W	22.9%	2.824 nm	[91]
1990	Ho ³⁺	640 nm	12.6 mW	4.4%	2.83-2.95 μm	[102]
1999	Ho ³⁺	1.15 μm	1.4 W	30%	-	[105]
2004	Ho ³⁺	1.1 μm	2.5 W	29%	2.86 μm	[109]
2015	Ho ³⁺	1.15 μm	7.2 W	29%	2.83-2.98 nm	[130]
2003	Dy ³⁺	1.1 μm	0.275 W	4.5%	2.9 μm	[153]
2006	Dy ³⁺	1.3 μm	0.18 W	20%	2.96 μm	[154]
2018	Dy ³⁺	2.83 μm	1.06 W	73%	3.15 μm	[162]
2019	Dy ³⁺	2.83 μm	10.1 W	58%	3.24 μm	[165]

可以看出，关于提升 3 μm 光纤激光器输出功率的相关探索大多围绕掺 Er³⁺氟化物光纤激光器展开，这主要是因为掺 Er³⁺氟化物光纤激光器通常采用 980 nm 半导体激光器来泵浦，相比掺 Ho³⁺和掺 Dy³⁺的光纤激光器具有成本更低、更易获得的高功率泵浦源。而 980 nm 的商用半导体激光器的发展成熟也进一步推动了掺 Er³⁺中红外光纤激光器的迅速发展，目前掺 Er³⁺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 μm 掺 Er³⁺氟化物光纤激光器被陆续研究报道。

早在二十世纪八十年代初，人们就在以晶体为掺杂基质的激光器中获得了 3 μm 中红外激光^[168-170]。到了 1988 年，基于掺 Er^{3+} 体块氟化物玻璃的 2.7 μm 中红外激光器被报道^[171]，同年，Brierley 和 France^[7]报道了第一台工作波长位于 2.7 μm 的中红外连续光运转掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器，他们采用 476.5 nm 波长的氩离子激光器作为泵浦源，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，不同波长的泵浦光被相继用于 2.7 μm 的掺 Er^{3+} 光纤激光器。1990 年，Allen 等人^[10]首次报道了半导体激光器泵浦的中红外掺 Er^{3+} 光纤激光器，获得了中心波长位于 2.71 μm 、2.75 μm 和 2.78 μm 处的连续激光，他们在 792 nm 的泵浦波长处获得了 4 mW 的低激光阈值。1994 年，Frerichs^[13]等人采用 650 nm、795 nm 和 980 nm 三种波长的光源分别泵浦 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺的氟化物增益光纤，获得了接近 30 mW 的输出功率^[17]。次年，Pollnau 等人报道的 1.72 μm 和 2.71 μm 双波长 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器将 2.7 μm 激光输出功率进一步提升到了 158 mW^[21]。

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 等人^[28]和 Jackson 等人^[29]使用 790 nm 的半导体激光器泵浦 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺的双包层氟化物增益光纤，分别在 2.7 μm 波段获得了 1.7 W 和 660 mW 的输出功率。Sandrock 等人^[30]使用 970 nm 的半导体激光器泵浦长度仅为 54 cm 的 M 形掺 Er^{3+} 氟化物光纤，获得了最高功率为 1.04 W 的 2.79 μm 中红外激光。到了 2007 年，Zhu 等人^[41]使用 100 W 的 975 nm 半导体激光器阵列泵浦高掺杂 Er^{3+} 的双包层氟化物光纤，获得了 9 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 等人^[48]报道了一台 975 nm 半导体激光器泵浦的 D 形双包层掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器，输出功率高达 24 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 等人^[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，再分别与泵浦源输出尾纤和增益光纤熔接在一起，从而构成了全光纤系统。2015 年，使用类似的结构，Laval 组的 Fortin 等人^[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，通过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，Laval 组的 Aydin 等人^[91]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泵浦源，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 波长的激光泵浦, 获得了 2.83 μm -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, Sumiyosh 等人^[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泵浦双包层掺 Ho^{3+} 氟化物光纤, 获得了 40 mW 的混合输出功率, 其中 3 μm 激光功率为 27 mW。1999 年, 他们改用 1.15 μm 的拉曼光纤激光器泵浦 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^[105]。这个结果充分显示了 1.15 μm 波段激光作为 3 μm 掺 Ho^{3+} 氟化物光纤激光器泵浦源的巨大潜力。2004 年, Jackson^[109]使用 1.1 μm 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器泵浦 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 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, 他们使用 1150 nm 波长的半导体激光器泵浦双包层 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺氟化物光纤, 在 2.94 μm 处获得了 2.5 W 的输出功率, 激光器的斜效率达到 32%^[114]。

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泵浦 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 年就已经首次报道^[174], 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+} 双包层光纤激光器泵浦单包层掺 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% 的斜效率, 他把实验中较低的斜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 等人^[154]报道了一台由 1.3 μm 波长的 Nd:YAG 激光器泵浦的掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器, 他们选用长度分别为 60 cm 和 77 cm、掺杂浓度为 1000 ppm 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, 最高斜效率为 20%。

除了早期的 1.1 μm 和 1.3 μm 激光泵浦源, 最近, 1.7 μm 激光也开始被用于泵浦掺 Dy^{3+} 氟化物光纤。2018 年, Jackson 组^[161]报道了 1.7 μm 拉曼光纤激光器泵浦的掺 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 nm-3380 nm)。同年, 他们首次使用 1.7 μm 激光泵浦 30 cm 的掺 Dy^{3+} 氟化物光纤, 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^[167]。

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

然而，以上研究中激光器的输出功率均为毫瓦量级，未能有明显突破。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，在带内泵浦的掺 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 等人^[165]通过带内泵浦将掺 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，激光波长为 3.24 μm ，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 年被报道^[172]，而在 3 μm 中红外波段，第一台调 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 技术的光纤激光器都有报道，以下将分别归纳。

（1）3 μm 主动调 Q 光纤激光器

1994 年，Frerichs 和 Tauer mann^[15]首次在 3 μm 波段的光纤激光器中实现了调 Q 运转。在实验中，他们分别采用声光调制器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 等人^[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 19 mW、最小脉宽 250 ns 的调 Q 脉冲输出。

2011 年，日本京都大学的 Tokita 等人^[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 $7\ \mu\text{J}$ 的脉冲能量和 $260\ \text{ns}$ 的脉冲宽度。此后，他们还分别在 $2.9\ \mu\text{m}$ 波长^[118]和 $2.87\ \mu\text{m}$ 波长^[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，电子科技大学的李剑峰等人^[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， $80\ \text{nm}$ 的调谐范围覆盖 $2.95\ \mu\text{m}$ 到 $3.031\ \mu\text{m}$ 。

近几年，除了 2016 年至 2018 年报道的几例分别基于机械 Q 开关^[88]和体布拉格光栅^[94]的 $2.8\ \mu\text{m}$ 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) $3\ \mu\text{m}$ 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 $3\ \mu\text{m}$ 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、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 和 Unrau^[23]首次报道了工作在 $3\ \mu\text{m}$ 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 等人^[33]将液化镓反射镜用于半导体激光器泵浦的双包层掺 Er^{3+} 光纤激光器中获得了 $7\ \mu\text{s}$ 脉宽的中红外调 Q 脉冲，然而峰值功率仅为 $5.4\ \text{mW}$ ，单脉冲能量约为 $38\ \text{nJ}$ 。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 $3\ \mu\text{m}$ 被动调 Q 光纤激光器的相关报道。

直到 2012 年，亚利桑那大学的韦晨等人^[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 $2.8\ \mu\text{m}$ 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 $370\ \text{ns}$ ，最高脉冲重复频率为 $161\ \text{kHz}$ ，平均功率为 $318\ \text{mW}$ ，对应的峰值功率为 $5.34\ \text{W}$ ，单脉冲能量为 $2.0\ \mu\text{J}$ 。次年，亚利桑那大学的研究小组又报道了 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 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 $3\ \mu\text{m}$ 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,李剑峰组^[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 μm 中红外激光脉冲产生的巨大潜力。2016年,湖南大学的唐平华等人^[80]进一步将碲化铋用于2.8 μm 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 μs 和92 kHz,对应的脉冲能量为9.3 μJ 。黑磷于2015年被第一次用于3 μm 激光脉冲产生,上海交通大学的谢国强等人^[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烘干制成黑磷饱和吸收镜,并插入到2.8 μm 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,李剑峰组^[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,他们还报道了首台基于过渡金属硫化物硫化钨的3 μm 中红外被动调Q光纤激光器^[136]。最近,谢国强组报道了首台基于黑磷饱和吸收体的2.8 μm 脉冲全光纤激光器^[98],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 μm 中红外脉冲光纤激光器。

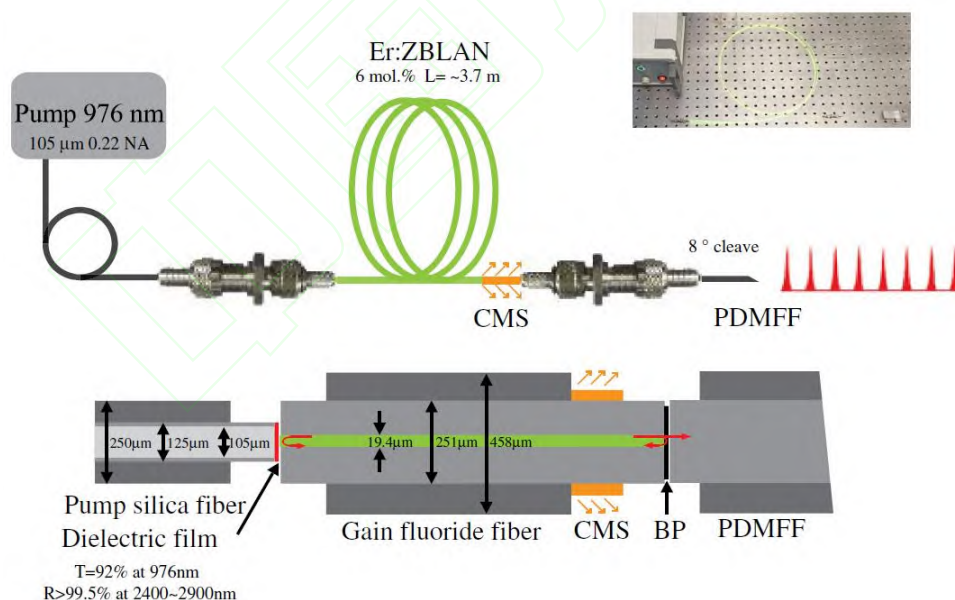


图4 基于黑磷饱和吸收体的2.8 μm 脉冲全光纤激光器^[98]

Fig. 4 2.8 μm pulsed all-fiber laser based on black phosphorus saturable absorber^[98]

另外,由于中红外波段半导体饱和吸收镜的研究成熟,也有一部分研究围绕这一方向展开。2014年,李剑峰组^[129]报道了3 μm 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 μm 实

现被动调 Q 的同时，在 2.1 μm 处还产生了增益开关脉冲^[131]。此外，他们也进行了 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体用于 3 μm 被动调 Q 光纤激光器的研究^[132]。2016 年，西安光机所的沈炎龙等人^[79]报道的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 μm 波长处获得了 1.01 W 的最大平均功率，对应于 6.9 μJ 的单脉冲能量和 21.9 W 的峰值功率。

3 μm 被动调 Q 光纤激光器的最高功率报道于 2017 年，韦晨等人^[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 μJ 的最大脉冲能量，与主动调 Q 相比，仍然具有一定的差距。

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	Minimum pulse duration	Laser wavelength	Q-switch	Ref.
1994	Er^{3+}	500 μW	100 ns	2700 nm	AOM	[15]
2011	Er^{3+}	12.4 W	90 ns	2800 nm	AOM	[52]
2012	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	720 mW	78 ns	2867 nm	AOM	[118]
2012	Ho^{3+}	-	380 ns	3005 nm	AOM	[119]
2012	Ho^{3+}	-	350 ns	3002 nm	AOM	[120]
2013	Ho^{3+}	685 mW	300 ns	2970~3015 nm	AOM	[126]
2012	Er^{3+}	318 mW	370 ns	2780 nm	$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$	[55]
2013	Er^{3+}	62 mW	2.9 μs	2783 nm	Graphene	[58]
2015	Er^{3+}	485 mW	1.18 μs	2779 nm	Black phosphorus	[68]
2015	Ho^{3+}	327.4 mW	1.37 μs	2979.9 nm	Bi_2Te_3	[133]
2015	Ho^{3+}	337 mW	1.23 μs	2919.1~3004.2 nm	$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$	[132]
2016	Er^{3+}	4.2 W	2.29 μs	2786.8 nm	SESAM	[77]
2016	Er^{3+}	856 mW	1.3 μs	2791.2 nm	Bi_2Te_3	[80]
2016	Er^{3+}	822 mW	742 ns	2780 nm	$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$	[82]
2016	Ho^{3+}	308.7 mW	2.41 μs	2970.3 nm	Black phosphorus	[135]
2016	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	48.4 mW	1.73 μs	2865.7 nm	WS_2	[136]
2017	Er^{3+}	5.16 W	400 ns	2762.5~2852.5 nm	$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$	[90]
2017	Er^{3+}	260 mW	880 ns	2762~2824 nm	Bi_2Te_3	[94]
2018	Er^{3+}	485 mW	612 ns	2780 nm	Gold nanobipyramids	[101]
2018	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	21.5 mW	2.0 μs	2864.2 nm	$\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	[148]
2019	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	30.8 mW	2.18 μs	2834.5~2881.0 nm	LAR-GNRs	[150]

3.3 3 μm 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 μm 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；而等效饱和吸收体则是光纤激光器本身的特定结构所引入的饱和吸收效应，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吸收体材料包括飞镜(Flying-mirror)、InAs、 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 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^[173]，而最早的 3 μm 被动锁模光纤激光器来自 Frerichs 和 Unrau^[24]。1996 年，他们使用 InAs 作为饱和吸收体，实现了 2.7 μm 掺 Er^{3+} 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。这种技术通过将振动反射镜通过线形腔的腔镜耦合到激光光路中，由于多普勒效应，反射镜的振动会在激光信号中引入频移，频移后的信号被反馈回谐振腔中被放大，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，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吸收体，没有相关的研究成果被报道。直到 2012 年，亚利桑那大学的研究小组报道了基于 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体的 2.8 μm 掺 Er^{3+} 光纤脉冲激光器^[56]。通过改变 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 饱和吸收体在谐振腔中的位置，他们在实验中分别观察到了调 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 组使用半导体饱和吸收镜实现了被动锁模中红外 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器^[122]。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，他们进一步构建了基于 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺增益光纤的环形腔激光器^[128]，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，他们报道了一台基于半导体饱和吸收镜的被动锁模掺 Er^{3+} 光纤激光器^[59]，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。

2015 年，亚利桑那大学研究小组报道了石墨烯饱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^[69]。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^[71]。

2016 年，李剑峰组^[135]和谢国强组^[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 组则进一步将 NPR 技术应用于 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 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^[134]。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，他们使用类似的装置产生了 265 fs 的 2.86 μm 锁模激光脉冲，并将其注入一段硫化砷光纤中，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压缩至 70 fs 脉宽从而获得了中红外波段的少周期脉冲^[143]。另外，他们还将 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 μm -9.5 μm) 的超连续谱^[140]。

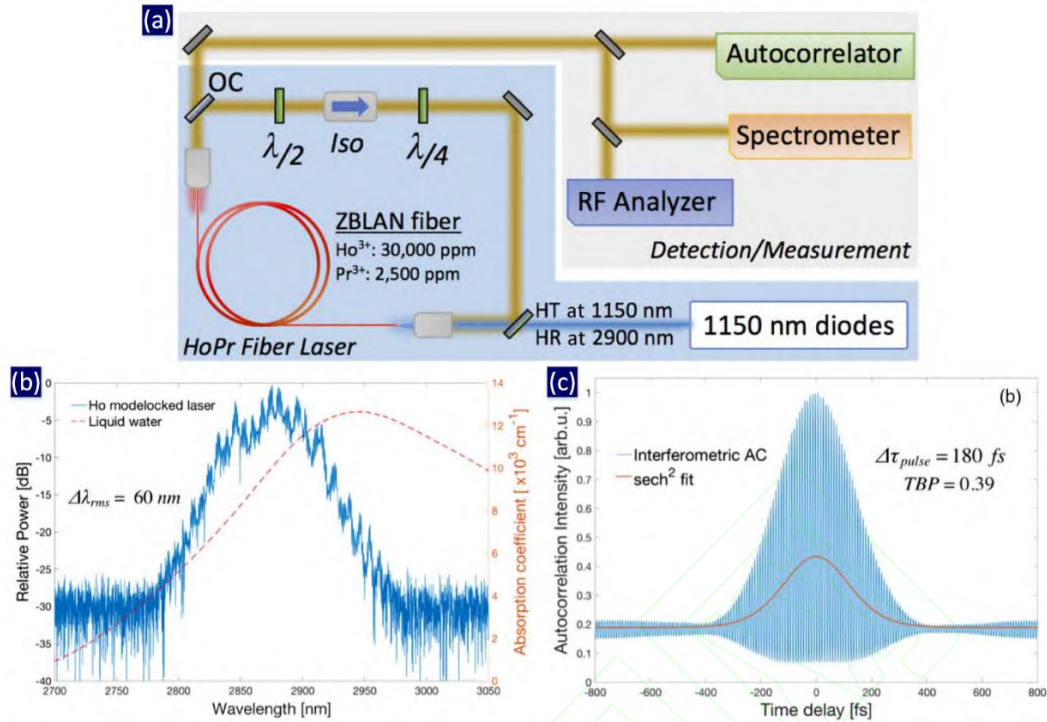


图5 (a) 基于NPR技术的3 μm 锁模运转 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器^[134]; (b) 3 μm 锁模激光光谱; (c) 3 μm 锁模激光脉冲自相关后的序列

Fig. 5 (a) 3 μm mode-locked $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ co-doped fiber laser based on NPR technique^[134]; (b) Optical spectrum of the 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^[166], 通过使用2.82 μm 波长的掺 Er^{3+} 光纤激光器作为泵浦源, 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组使用频移反馈技术在2.83 μm 带内泵浦的掺 Dy^{3+} 光纤激光器实现了被动锁模运转^[163], 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 μm -3.30 μm 的330 nm波长调谐范围, 这是锁模光纤激光器目前达到的最长波长, 调谐范围也是所有可调谐脉冲光纤激光器中最宽的。最近, 他们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^[151]。

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	Pulse duration	Laser wavelength	Mode-locker	Ref.
2012	Er^{3+}	51 mW	19 ps	2780 nm	$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$	[56]
2012	$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	132 mW	24 ps	2870 nm	SESAM	[122]
2014	Er^{3+}	440 mW	60 ps	2797 nm	SESAM	[59]

2014	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	70 mW	6 ps	2859.5 nm	InAs	[128]
2015	Er ³⁺	44 mW	207 fs	2805 nm	NPR	[63]
2015	Er ³⁺	206 mW	497 fs	2793 nm	NPR	[65]
2015	Er ³⁺	1 W	25 ps	2780 nm	SESAM	[69]
2016	Er ³⁺	2 W	160 fs	2800~3600 nm	NPR	[72]
2016	Er ³⁺	613 mW	42 ps	2783 nm	Black phosphorus	[78]
2016	Er ³⁺	18 mW	42 ps	2784.5 nm	Graphene	[83]
2016	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	327 mW	180 fs	2900 nm	NPR	[134]
2016	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	87.8 mW	8.6 ps	2866.7 nm	Black phosphorus	[135]
2017	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	127.7 mW	22 ps	2842.2~2876.2 nm	SESAM	[142]
2017	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	-	70 fs	2860 nm	NPR	[143]
2018	Er ³⁺	6.2 mW	-	2771.1 nm	Black phosphorus	[98]
2019	Er ³⁺	-	270 fs	2800 nm	NPR	[71]
2019	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	300 mW	4.7 ps	2860 nm	FSF	[151]
2019	Dy ³⁺	120 mW	33 ps	2970~3300 nm	FSF	[164]
2019	Dy ³⁺	204 mW	828 fs	3083 nm	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泵浦激光脉冲，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，增益开关技术已经在掺 Er³⁺和掺 Ho³⁺光纤激光器中成功应用，常用的实现方式有三种：一种是直接使用脉冲工作的激光源泵浦增益光纤^[31]，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 运转引入的增益开关效应^[120]；第三种是混合泵浦^[152]，在 Ho³⁺的能级系统中，由于 3 μm 激光（⁵I₆→⁵I₇）和 2 μm 激光（⁵I₇→⁵I₈）属于相邻能级的跃迁产生，因此可以采用双波长（如 1.15 μm 和 2 μm）混合泵浦，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引入周期性的调制，进而激发相邻能级激光的增益开关脉冲产生。

2000 年，Dickinson 等人^[31]报道了首台工作在 3 μm 波段的增益开关光纤激光器，他们采用脉冲运转在 791 nm 的掺钛蓝宝石激光器泵浦双包层 Er³⁺/Pr³⁺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泵浦脉宽优化了激光器的工作性能。2011 年，通过构建一个主动反馈的脉冲半导体泵浦源，Gorjan 等人^[51]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]首先对 3 μm 与 2 μm 级联双波长掺 Ho^{3+} 光纤激光器中激光调 Q 运转对相邻能级引入增益开关效应的过程进行了研究，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 激光脉冲重频的增大而减小，并且调 Q 脉冲和增益开关脉冲的脉宽都随着泵浦功率的增大而减小。

2014 年，沈炎龙等人使用脉冲运转的 975 nm 半导体激光器泵浦双包层 Er^{3+} 高掺杂光纤，在 2.8 μm 实现了增益开关脉冲输出。他们通过增加泵浦功率和泵浦脉冲重频，研究了增益开关脉冲的动态演变趋势。2017 年，他们首次在实验中观察到了增益开关锁模现象^[87]。

2017 年，电子科技大学的韦晨等人^[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，她们实现了 $>170 \text{ nm}$ (2699 nm-2869.9 nm) 的宽调谐范围。同年，李剑峰组在实验中同时使用一台连续光 1.15 μm 激光泵浦源和一台脉冲工作的 1.15 μm 激光泵浦源进行混合泵浦，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^[141]。

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 的半导体激光泵浦源脉冲工作，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，李剑峰组进行了 2.94 μm 掺 Ho^{3+} 光纤激光器中增益开关脉冲随着泵浦光功率（泵浦脉冲能量）的增大而切换不同状态的相关研究^[146]，此外，他们还采用 1.15 μm 激光和 1.95 μm 激光混合泵浦掺 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^[152]。

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	Minimum pulse duration	Pulse energy	Laser wavelength	Ref.
2001	Er ³⁺	-	200 ns	1.9 mJ	2700-2770 nm	[35]
2011	Er ³⁺	2 W	307 ns	-	~2800 nm	[51]
2012	Ho ³⁺	-	270 ns	6.1 μJ	3002 nm	[120]
2014	Er ³⁺	40 mW	1.18 μs	4.2 μJ	~2800 nm	[61]
2017	Er ³⁺	4.8 W	230 ns	37 μJ	2825.4 nm	[86]
2017	Er ³⁺	110 mW	661.2 ns	-	~2800 nm	[87]
2017	Er ³⁺	119.4 mW	1.55 μs	5.97 μJ	2699-2869.9 nm	[89]
2017	Ho ³⁺	262.14 mW	824 ns	3.28 μJ	2928.5 nm	[141]
2018	Er ³⁺	11.2 W	170 ns	80 μJ	2826 nm	[97]
2018	Ho ³⁺	389.3 mW	1.49 μs	4.87 μJ	2895.5-3000.5 nm	[146]
2019	Ho ³⁺	136.6 mW	2.002 μs	2.73 μJ	2971.9 nm	[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,我们将相关报道总结如表 5 所示。

表 5 波长可调谐 3 μm 光纤激光器的研究报道

Table 5 Reports on wavelength-tunable 3 μm fiber lasers

Year	Gain ion	Tuning range	Output power	Working principle	Operation mode	Ref.
1992	Er ³⁺	160 nm (2.67~2.83 μm)	26 mW	Diffraction grating	CW	[175]
2000	Er ³⁺	110 nm (2.7~2.81 μm)	30 mW	Diffraction grating	CW	[34]
2007	Er ³⁺	100 nm (2.705~2.805 μm)	2 W	Diffraction grating	CW	[42]
2008	Er ³⁺ /Pr ³⁺	100 nm (2.7~2.81 μm)	1 W	Diffraction grating	CW	[43]
2010	Er ³⁺	130 nm (2.71~2.84 μm)	11 W	Diffraction grating	CW	[49]
2016	Er ³⁺	157 nm (2697~2854 nm)	0.26 W	Diffraction grating	CW	[74]
2016	Er ³⁺	62 nm (2762~2824 nm)	1.24 W	Diffraction grating	Q-switching	[76]
2017	Er ³⁺	107.6 nm (2706.2~2813.8 nm)	473.3 mW	Diffraction grating	Gain-switching	[89]
2017	Er ³⁺	100 nm (2.71~2.83 μm)	110 mW	Diffraction grating	Gain-switching	[87]
2017	Er ³⁺	90 nm (2762.5~2852.5 nm)	5.16 W	Diffraction grating	Q-switching	[90]
1990	Ho ³⁺	120 nm (2.83~2.95 μm)	12.6 mW	Diffraction grating	CW	[102]

2011	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	75 nm (2.825~2.9 μm)	>1 W	Diffraction grating	CW	[115]
2012	Ho ³⁺	66 nm (2.955~3.021 μm)	518 mW	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)	7.2 W	Diffraction grating	CW	[130]
2015	Ho ³⁺	85 nm (2919.1~3004.2 nm)	337 mW	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)	0.29 W	Fiber Bragg grating	CW	[137]
2018	Ho ³⁺	105 nm (2895.5~3000.5 nm)	389.3 mW	Diffraction grating	Gain-switching	[146]
2019	Ho ³⁺ /Pr ³⁺	50 nm (2.83~2.88 μm)	30.8 mW	Diffraction grating	Q-switching	[150]
2016	Dy ³⁺	400 nm (2.95~3.35 μm)	30 mW	Diffraction grating	CW	[157]

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，通过使用衍射光栅，他在掺 Ho³⁺ 光纤激光器中获得了 2.83 μm-2.95 μm 的波长调谐范围^[102]。1992 年，他们组又在掺 Er³⁺ 光纤激光器中实现了 2.67 μm-2.83 μm 的波长调谐^[175]。此后，越来越多基于衍射光栅的 3 μm 可调谐光纤激光器不断被报道，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。

2000 年，新墨西哥大学的 Jain 等人^[34]在 2.8 μm 掺 Er³⁺ 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 >2 W 的高功率掺 Er³⁺ 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 >1 W 的掺 Er³⁺ 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 Er³⁺ 光纤激光器，其波长可以由 2.71 μm 调谐至 2.88 μm。

2011 年，Jackson 组首次在半导体激光器泵浦的 3 μm Ho³⁺/Pr³⁺ 共掺光纤激光器中实现了波长调谐^[115]。2012 年，他们报道了一台波长在 2955 nm-3021 nm 范围内可调谐的掺 Ho³⁺ 光纤激光器^[121]。2015 年，他们使用 Ho³⁺/Pr³⁺ 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^[130]，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，他们首次报道了可调谐中红外掺 Dy³⁺ 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^[157]。

李剑峰组也对 3 μm 可调谐光纤激光器做出了很多研究。2013 年，他们在主动调 Q 掺 Ho³⁺ 光纤激光器中获得了 2.95 μm-3.031 μm 的波长调谐范围^[126]。2015 年，他们报道了一台

波长可调谐的被动调 Q 掺 Ho^{3+} 光纤激光器^[132]，激光器的波长调谐范围为 2919.1 nm-3004.2 nm。2017 年，他们首次报道了 3 μm 波段波长可调谐的锁模光纤激光器，通过在 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 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^[142]。同年，他们在平均输出功率高于 5 W 的被动调 Q 掺 Er^{3+} 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 nm-2852.5 nm^[90]。另外，他们首次在 3 μm 增益开关光纤激光器中实现了波长调谐^[89]，最终增益开关掺 Er^{3+} 光纤激光器的输出波长能够从 2699 nm 调谐至 2869.9 nm，次年，他们在增益开关掺 Ho^{3+} 光纤激光器中也进行了类似的研究^[146]。最近，他们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 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器，其波长调谐范围为 2.83 μm -2.88 μm ^[150]。

上面提到的研究报道无一例外均是采用体块结构的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 等人^[137]走出了迈向 3 μm 可调谐全光纤激光器的第一步，他们在 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤中采用飞秒直写的方法制作了光纤布拉格光栅，并且通过对光栅的挤压和施加拉力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 波长调谐范围。虽然这种方法能够避免使用体块结构的波长调谐器件，然而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泵浦光输入和激光输出的耦合器件，因此严格意义上说不属于全光纤结构。另外，在氟化物光纤上刻写光栅也会提高系统的整体成本以及在具体操作上的困难度。

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体块结构的透镜组作为泵浦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 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 大学的研究小组提出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泵浦源输出尾纤直接熔接，他们在实验中成功实现了高功率 3 μm 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在腔内采用衍射光栅来实现

激光波长调谐^[176]，使用这种体块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 μm 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反射膜，并使用这种光纤端面镀膜作为中红外光纤激光器谐振腔的腔镜，代替传统的体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泵浦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 μm 中红外光纤激光器。

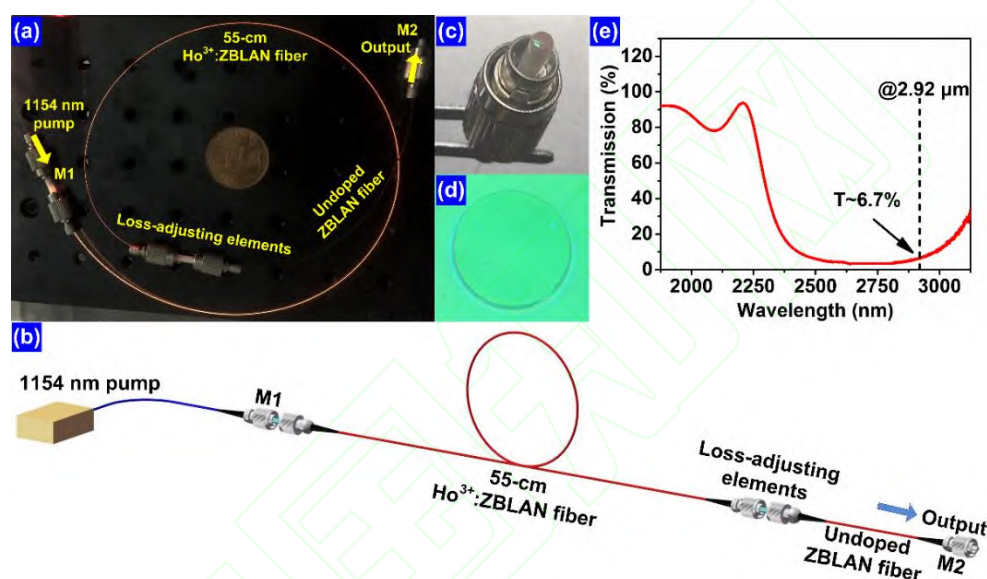


图 6 (a) 小型化可调谐 3 μm 中红外光纤激光器的照片；(b) 激光器的结构示意图；(c) 光纤端面镀膜镜的照片；(d) 光纤端面镀膜镜的在显微镜下的图像；(e) 光纤端面镀膜镜的光学透射谱曲线。
 Fig. 6 (a) Photograph of the miniaturized wavelength-tunable mid-infrared all-fiber laser; (b) Schematic of the proposed mid-infrared all-fiber laser; (c) Photograph of the fiber end-facet mirror M1; (d) Microscopic image of the fiber end-facet mirror M2; (e) Optical transmission spectrum of the M1 (also M2).

图 6 (a)给出了该激光器的实物图片，图 6 (b)显示的是对应的结构示意图。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 nm 的泵浦激光源、一根 55 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，作为泵浦光输入镜的 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的均匀介电薄膜。我们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 μm 波段具有 $<10\%$ 的透射率，对应 $>90\%$ 的反射率，可以作为 3 μm 波段激光器的理想的谐振腔反射镜。

另一方面，我们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，我们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水平。

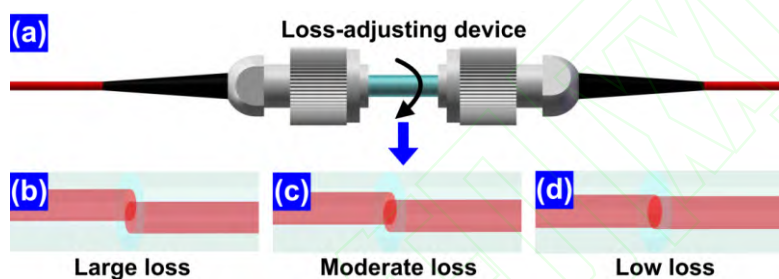


图7 损耗调节装置的结构和原理：(a) 损耗调节装置；三个不同损耗的耦合状态：(b) 大损耗状态；(c) 中等损耗状态；(d) 低损耗状态

Fig. 7 Structure and principle of the proposed core-shifted fiber loss-adjusting device. (a) The proposed all-fiber loss-adjusting device. Three different coupling states: (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，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，腔内激光强度会变小，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，因此这种技术对稀土掺杂光纤激光器具有一定的普适性。

因此，我们将掺 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，我们首先将损耗调节装置调到损耗最小的状态，增加泵浦功率，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) 给出了泵浦功率为 116 mW 时激光的光谱，两种激光的中心波长分别位于 2920.6 nm 和 2058.1 nm。

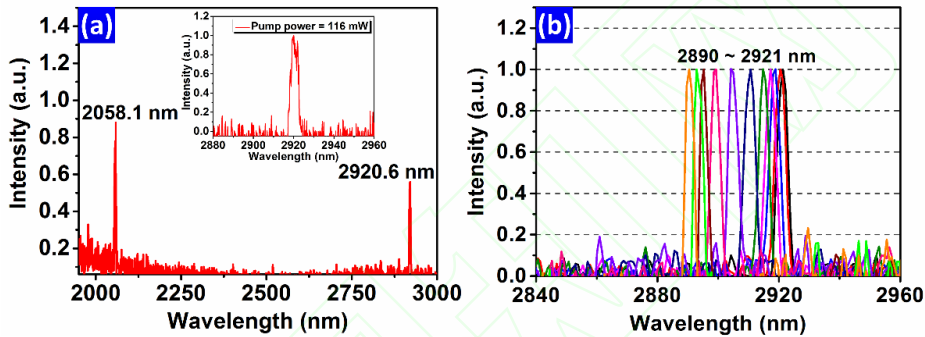


图8 (a) 中红外激光输出光谱；插图： $3\ \mu\text{m}$ 激光窄范围高精度光谱； (b) $3\ \mu\text{m}$ 激光的调谐光谱

Fig. 8 The output optical spectrum of the $\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$ fiber laser (with M2) at a pump power of 116 mW. Insets: a zoom-in view of $3\ \mu\text{m}$ laser spectrum. (b) wavelength-tunable lasing spectra at the fixed pump power of 116 mW.

为了调谐激光波长，我们将泵浦功率固定在 116 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，激光器也相应的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 nm 调谐至 2921 nm，显示出 $>30\ \text{nm}$ 的波长调谐范围。另外，我们在实验中还观察到，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，泵浦功率被限制在较低的水平，因此，可以通过增大泵浦功率来进一步提升输出功率。

在实现了连续运转的可调谐 $3\ \mu\text{m}$ 掺 Ho^{3+} 全光纤激光器之后，我们进一步对脉冲运转的可调谐 $3\ \mu\text{m}$ 掺 Ho^{3+} 全光纤激光器进行了研究。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保持激光器紧凑的结构而常常被用于脉冲激光产生，这两种技术已经在 $3\ \mu\text{m}$ 波段的光纤激光器中已经有了很多报道。除了被动调 Q 和锁模技术，自调 Q 技术

也是一种选择，由于这种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，因此有望使激光系统更结构紧凑和低成本。尽管自调 Q 技术已经成功应用于近红外^[177]和可见光^[178]波段的光纤激光器，目前还没有任何中红外自调 Q 光纤激光器的相关报道。

我们的实验装置与之前几乎完全相同，使用了相同的 1.15 μm 泵浦源、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，我们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 ppm 的高掺杂浓度，在泵浦光波长处具有 $>42 \text{ dB/m}$ 的高吸收系数，因此，2 m 长的掺 Ho^{3+} 光纤很难被充分泵浦，在未充分泵浦的情况下，增益光纤的前半部分将会完全消耗泵浦光的能量并获得 3 μm 和 2 μm 激光增益，而后半部分由于缺乏泵浦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。

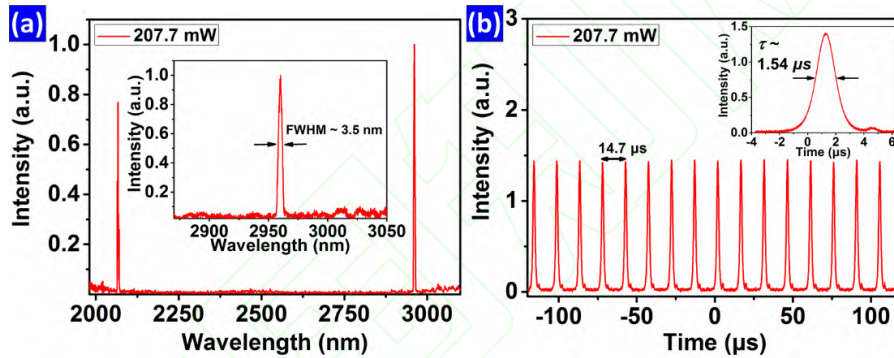


图9 3 μm 自调 Q 激光在 207.7 mW 泵浦功率下的特征: (a) 输出光谱; 插图: 3 μm 激光的窄范围高精度光谱; (b) 脉冲序列; 插图: 单脉冲包络

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

在实验中，当增加泵浦功率到连续光阈值 26.4 mW 时，可以观察到 2.9 μm 激光发射。当泵浦功率提高到 36.6 mW 时，2.9 μm 激光开始了稳定的自脉冲运转。图 9 总结了泵浦功率为 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 级联激射的双波长状态，这与我们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，我们发现 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 $>2.4 \mu\text{m}$ 的光电探测器观察 3 μm 激光脉冲，图 9 (b) 展示了 207.7 mW 泵浦功率下 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 $<5\%$ ，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， $3\ \mu\text{m}$ 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 $1.54\ \mu\text{s}$ 的脉冲宽度。

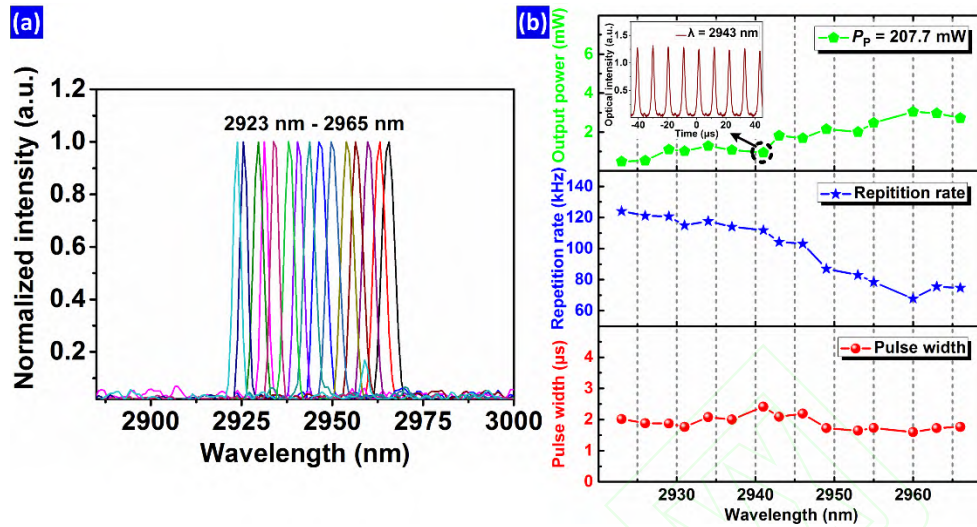


图10 (a) 泵浦功率固定为207.7 mW， $3\ \mu\text{m}$ 自调Q激光脉冲的调谐光谱；(b)泵浦功率固定为207.7 mW，在不同运转波长处， $3\ \mu\text{m}$ 自调Q激光脉冲的脉冲宽度、重复频率和平均输出功率；插图：2943 nm处的自调Q脉冲序列

Fig. 10 (a) Wavelength-tunable lasing spectra of the self-Q-switching operation at the fixed pump power of 207.7 mW. (b) The pulse width, repetition rate and average output power of the self-Q-switching pulses versus the tunable lasing wavelength at the fixed pump power of 207.7 mW; inset: self-Q-switching pulse train at 2943 nm

为了调谐 $2.9\ \mu\text{m}$ 激光波长，泵浦光功率被固定在 $207.7\ \text{mW}$ ，我们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 $2923\ \text{nm}$ 调谐到 $2965\ \text{nm}$ ，调谐范围 $>40\ \text{nm}$ 。在调谐激光波长的同时，我们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。据我们所知，这是国际上首次报道的 $3\ \mu\text{m}$ 可调谐自调 Q 全光纤激光器^[179]。

4 总结

工作中红外 $3\ \mu\text{m}$ 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 $3\ \mu\text{m}$ 固体激光器和量子级联激光器， $3\ \mu\text{m}$ 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， $3\ \mu\text{m}$ 光纤激光器主要包括基于掺 Er^{3+} ($\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$)、掺 Ho^{3+} ($\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$) 和掺 Dy^{3+} 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， $3\ \mu\text{m}$ 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 Er^{3+} ($\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$) 氟化物光纤激光器为代表，随着 980 nm 高功率半导体激光泵浦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泵浦功率、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 fs 量级的激光脉冲输出，并且有报道采用光栅对将 3 μm 激光脉冲进一步压缩到几十 fs 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，并获得脉冲更窄、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 Dy^{3+} 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 $>3 \mu\text{m}$ 的掺 Dy^{3+} 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 Er^{3+} 在 3.5 μm 波段和 Ho^{3+} 和 Dy^{3+} 在 4 μm 波段的荧光发射带，并且采用在 $>3 \mu\text{m}$ 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 $>4 \mu\text{m}$ 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 $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ ceramic lasers[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 830-836.
 - [3] Bandyopadhyay N, Bai Y P, 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 μm with a KNbO_3 optical parametric amplifier[J]. *Optics Communications*, 2004, 241(4-6): 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 μm in an erbium-doped fluorozirconate fibre[J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(15): 935-937.
- [8] Quimby R S, Miniscalco W J. Effect of upconversion on 2.7- μm laser action in Er^{3+} [C], 1988: FE3.
- [9] Allain J Y, Monarie M, Poignant H. Erbium-doped fluorozirconate single-mode fibre lasing at 2.71 μm [J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(1): 28-29.
- [10] Yanagita H, Masuda I, Yamashita T, et al. Diode laser pumped Er^{3+} fibre laser operation between 2.7-2.8 μm [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 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ -doped fluoride glass fibres and application to lasing at 2.7 μm [J]. *Electronics letters*, 1991, 27(5): 445-447.
- [13] Frerichs C. All Optical Modulation of a 2.7 μm Erbium-doped Fluorozirconate Fiber Laser[C], 1993: ML2.
- [14] Frerichs C. Efficient Er^{3+} -doped CW fluorozirconate fiber laser operating at 2.7 μm pumped at 980 nm[J]. *International journal of infrared and millimeter waves*, 1994, 15(4): 635-649.
- [15] Frerichs C, Tauer mann 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.
- [16] Schneider J. Continuous-wavelength lasing at 2.7 μm in Er^{3+} -doped fluoride fibers with low Pr^{3+} -codoping[C], 1994: CTuK81.
- [17] Schneider J, Hauschild D, Frerichs C, et al. Highly efficient $\text{Er}^{3+}:\text{Pr}^{3+}$ -codoped CW fluorozirconate fiber laser operating at 2.7 μm [J]. *International journal of infrared and millimeter waves*, 1994, 15(11): 1907-1922.
- [18] Bedö S, Luthy W, Weber H P. Limits of the output power in Er^{3+} : 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 μm with simultaneous 2.7 μm 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 μm laser output in erbium-doped ZBLAN fibers[J]. *Optics Communications*, 1995, 116(1-3): 81-86.
- [21] Pollnau M, Ghisler C, Bunea G, et al. 150 mW unsaturated output power at 3 μm 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- μm 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 μm [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-pumpable fiber laser[C], 1998: 297.
- [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], 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], 2000: MD2.
- [34] Libatique N J C, Tafoya J D, Viswanathan N, et al. A “field-usable” diode-pumped~ 120-nm wavelength-tunable cw mid-IR fiber laser[C], 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(3-6): 315-321.
- [36] Pollnan 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(4-6): 379-385.
- [39] Segi T, Shima K, Sakai T, et al. 3- μm -band high output erbium-doped fiber lasers[C], 2004: CThZ5.
- [40] Tafoya J, Bartels K E, Pierce J W, et al. Efficient and compact high-power mid-IR (~3 μm) lasers for surgical applications[C]. *Lasers in Surgery: Advanced Characterization, Therapeutics, and Systems XIV*, 2004.
- [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, Marinček M, Čopič M. 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], 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], 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[C]. *Third International Symposium on Laser Interaction with Matter*, 2015.
- [62] Bernier M, Michaud-Belleau V, Levasseur 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], 2015: NTh2A. 4.
- [67] Hu T, Jackson S D, Hudson D D. Femtosecond mode-locked pulses from a mid-infrared fiber laser[C], 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 microm ultrafast pulsed fiber laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 9527-9532.
- [71] Ballato J, Duval S, Olivier M, et al. 23-kW peak power femtosecond pulses from a mode-locked fiber ring laser at 2.8 μm [C]. *Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications*, 2016.
- [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 Bi_2Te_3 Q-switched Er^{3+} : ZBLAN fiber laser[C], 2016: AW1K. 7.
- [77] Luo H Y, Li J F, 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 Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Scientific Report*, 2016, 6: 26659.
- [80] 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.
- [81] Zhang T, Feng G Y, Zhang H, et al. Compact watt-level passively Q-switched $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ fiber laser at 2.8 μm using Fe^{2+} : ZnSe saturable absorber mirror[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(8): 086106.
- [82] Zhang T, Feng G Y, Zhang H, et al. 2.78 μm passively Q-switched Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser based on PLD-Fe^{2+} : ZnSe film[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(7): 075102.
- [83] Zhu G W, Zhu X S, Wang F, et al. Graphene Mode-Locked Fiber Laser at 2.8 μm [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 μm [C], 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], 2017: ATh4A. 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 Er^{3+} -Doped ZBLAN Mid-Infrared Fiber Laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 1-10.

- [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 (1): 173-178.
沈炎龙, 周松青, 谌鸿伟, 等. 中红外2.8 μm 光纤激光器机械调Q工作特性[J]. *光学学报*, 2016 (1): 173-178.
- [89] Wei C, Luo H Y, Shi H X, et al. Widely wavelength tunable gain-switched Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser around 2.8 μm [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8816-8827.
- [90] Wei C, Zhang H, Shi H X, 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 μm 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], 2018: STh4K. 2.
- [93] 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.
- [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): 1-7.
- [95] Ning S G, Feng G Y, Dai S Y, et al. Mid-infrared Fe^{2+} :ZnSe semiconductor saturable absorber mirror for passively Q-switched Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(2).
- [96] Ning S G, Feng G Y, Zhang H, et al. Fabrication of Fe^{2+} :ZnSe nanocrystals and application for a passively Q-switched fiber laser[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(4).
- [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], 2018: Th2G. 2.
- [100] Zhang W, Feng G Y, Dai S Y, et al. Q-switched mid-infrared Er^{3+} :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 Er^{3+} : 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], 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 Ho^{3+} : 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 Ho^{3+} : ZBLAN fiber laser[C], 2001: 334-341.
- [107] Jackson S D. 210 mW 2.84 μm Ho^{3+} , Pr^{3+} -doped fluoride fibre laser[J]. Electronics Letters, 2003, 39(10): 1.
- [108] Jackson S D. Singly Ho^{3+} -doped fluoride fibre laser operating at 2.92 μm [J]. Electronics Letters, 2004, 40(22).
- [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. Mid-infrared 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: 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. Fibre 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. Fe²⁺:ZnSe and graphene Q-switched singly Ho³⁺-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): 1-9.
- [131] Li J F, Luo H Y, Wang L L, et al. Mid-infrared passively switched pulsed dual wavelength Ho³⁺-doped fluoride fiber laser at 3 μm and 2 μm[J]. *Scientific Report*, 2015, 5: 10770.
- [132] Li J F, Luo H Y, Wang L L, et al. Tunable Fe²⁺:ZnSe passively Q-switched Ho³⁺-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 Report*, 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 (WS₂) 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], 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], 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 Report*, 2017, 7(1): 16891.
- [142] Wei C, Shi H X, Luo H Y, et al. 34 nm-wavelength-tunable picosecond Ho³⁺/Pr³⁺-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[J], 2017.
- [145] Jia S J, Jia Z X, Yao C F, et al. 2875 nm Lasing From Ho³⁺-Doped Fluoroindate 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], 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], 2018: 1-2.
- [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 Ho^{3+} -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 ~ 1.1 μm 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], 2016: AM2C. 2.
- [159] Robin C A, Hartl I, Majewski M R, et al. Recent progress in 3 micron class dysprosium-doped fluoride fiber lasers[C]. *Fiber Lasers XIV: Technology and Systems*, 2017.
- [160] Hartl I, Carter A L, Woodward R I, et al. Near infrared pumped full gain bandwidth tunable 3 micron dysprosium fiber laser[C]. *Fiber Lasers XV: Technology and Systems*, 2018.
- [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, et al. Electronically tunable mid-infrared mode-locked dysprosium fiber laser with over 330 nm tunability[C]. *Fiber Lasers XVI: Technology and Systems*, 2019.
- [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 Dy^{3+} :fluoride fiber laser beyond 3 μm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 395-398.

- [167] Majewski M R, Woodward R I, Carree 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, Zhekov V, Lobachev V, et al. Steady-State Emission from a $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Er}^{3+}$ Laser ($\lambda=2.94\ \mu\text{m}$, $T=300\ \text{K}$)[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1983, 13(2): 262-263.
- [169] Zhekov V, Lobachev V, Murina T, 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. 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] 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.
- [173] 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.
- [174] 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.
- [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 Er: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.

网络首发:

标题: 3 μm 中红外稀土掺杂光纤激光器研究进展

作者: 李维炜, 张小金, 王航, 罗正钱

收稿日期: 2019-06-03

录用日期: 2019-07-10

DOI: 10.3788/lop56.170633

引用格式:

李维炜, 张小金, 王航, 罗正钱. 3 μm 中红外稀土掺杂光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170633.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

光谱合成激光光束特性的研究进展

柏刚 杨依枫 晋云霞 何兵 周军

中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800
激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 040004

光纤激光主动偏振控制技术的原理与进展

尤阳 漆云凤 何兵 沈辉 邹星星 刘美忠

中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800
激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 100001

高功率窄线宽光纤激光器研究进展

郑也 李磐 朱占达 刘小溪 王军龙 王学锋

北京航天控制仪器研究所, 北京 100094
激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 080002

软玻璃光纤中红外超连续谱研究进展

黎宇 廖梅松 薛天锋 贝家芳 胡丽丽 张龙

中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800
激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 080001

混沌激光相关法实现时间点扩展函数的测量

王亚东 杨玲珍 杨永强 王娟芬 张朝霞 薛萍萍

太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024
激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 071406