

激光与光电子学进展

1.7 μm 波段光纤激光器研究进展与展望

李昊^{1,2}, 黄威^{1,2}, 崔宇龙^{1,2}, 裴闻喜^{1,3}, 王泽锋^{1,2,3*}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

²脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 1.7 μm 波段光纤激光器在生物成像、气体探测、材料加工以及中红外激光产生等领域具有重要的应用价值, 近年来受到了国内外的广泛关注。本文对 1.7 μm 波段光纤激光器的研究进展进行了详细综述, 全面讨论了不同技术方案的特点, 包括最近报道的基于空芯光纤的气体拉曼激光技术。结合应用需求, 简要展望了 1.7 μm 波段光纤激光器的发展趋势。

关键词 激光器; 1.7 μm 波段; 光纤激光; 空芯光纤; 拉曼激光

中图分类号 TN24 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1900001

Progress and Prospect of Fiber Lasers Operating at 1.7 μm Band

Li Hao^{1,2}, Huang Wei^{1,2}, Cui Yulong^{1,2}, Pei Wenxi^{1,3}, Wang Zefeng^{1,2,3*}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

²State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract The fiber lasers operating at 1.7 μm band have important applications in many fields, such as biological imaging, gas detection, material processing, and generation of mid-infrared laser. Thus, it has received extensive attention in recent years. In this paper, the progress of 1.7 μm fiber laser is reviewed in detail, and the characteristics of different technical schemes are discussed comprehensively, including fiber gas Raman lasers based on hollow-core fibers. Combined with application requirements, the development trend of fiber lasers in the 1.7 μm band is briefly prospected.

Key words lasers; 1.7 μm band; fiber laser; hollow-core fiber; Raman laser

1 引言

由于独特的光谱特性, 1.7 μm 波段激光在许多领域具有巨大的应用价值, 近年来受到了广泛的关注^[1]。1.7 μm 波段位于碳氢键的吸收峰, 该波段激光可用于对脂质/脂肪的靶向皮肤治疗^[2]、塑料或某些聚合物的加工焊接^[3]、甲烷等有机物气体的探测^[4]等。此外, 由于水分子在 1.7 μm 波段有较低的吸收率, 该波段的脉冲激光光源是生物成像应用的重要工具, 已被证明在多光子显微镜^[5-6]、高分辨率光学相干断层扫描^[7-8]和光

谱光声成像^[9-10]中具有较大的穿透深度。1.7 μm 波段还位于镉离子的吸收峰, 所以 1.7 μm 波段激光可以用来泵浦掺镉软玻璃光纤产生中红外激光^[11]。相对固体等其他类型的 1.7 μm 波段激光器^[12-13], 1.7 μm 波段光纤激光器具有效率高、光束质量好、结构紧凑易集成、热管理方便、可柔性操作等优点, 得到了更广泛的关注, 目前已有大量的研究报道。其产生途径通常有两种: 1) 通过泵浦实芯掺杂光纤, 基于掺杂离子能级之间的粒子数反转获得 1.7 μm 波段激光; 2) 基于实芯光纤中的非线性效应实现 1.7 μm 波段激光输出。近年来,

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2022-01-04; 录用日期: 2022-01-17

基金项目: 湖南省自然科学基金杰出青年科学基金(2019JJ20023)、国家自然科学基金面上项目(11974427, 12004431)、脉冲功率激光国家重点实验室主任基金项目(SKL-2020-ZR05, SKL-2021-ZR01)、湖南省科技创新人才计划科技创新领军人才项目(2021RC4027)

通信作者: *zefengwang_nudt@163.com

本课题组基于空芯光纤中的气体受激拉曼散射实现了 1.7 μm 波段激光输出,为产生该波段光纤激光提供了一种新的有效手段。

围绕实现 1.7 μm 波段光纤激光器的技术路径,本文对其研究进展进行了全面综述,分析讨论了不同技术方案的特点,主要包括基于稀土离子掺杂的 1.7 μm 波段光纤激光器、基于非线性效应的 1.7 μm 波段光纤激光器、基于空芯光纤的 1.7 μm 波段光纤气体拉曼激光器。最后结合应用需求,对该波段光纤激光器的发展趋势进行了展望。

2 基于稀土离子掺杂的 1.7 μm 波段光纤激光器研究进展

基于稀土离子掺杂的 1.7 μm 波段光纤激光器所使用的掺杂光纤主要有四种:掺铥光纤(TDF)、掺铋光纤(BDF)、铥钕共掺光纤(THDF)和铥钕共掺光纤(TTDF)。其中,1.7 μm 波段掺铥光纤激光器最为常见,相关研究报道最多。因此,本小节将首先重点介绍掺铥光纤激光器,随后介绍其他离子掺杂光纤激光器。

2.1 基于掺铥光纤

首先介绍连续波(CW)1.7 μm 波段掺铥光纤激光器的研究进展。2004年,丹麦科技大学的 Agger 等^[14]报道了首个 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器。实验使用 790 nm 半导体激光器泵浦 TDF,基于分布式反馈(DFB)结构在 1735 nm 实现了单频连续波激光输出,但是输出功率只有 1 mW,斜率效率也只有 0.2%。这是因为 1.7 μm 波段的短波长方向(1750 nm 以下)位于 TDF 发射谱的边缘,并且 TDF 在此波段有较强的重吸收作用,这导致短波长方向的增益相对较弱。因此,为了提高 1.7 μm 波段短波长方向激光的转换效率,通常使用体光栅、光纤布拉格光栅(FBG)、光纤可调滤波器器件进行选波。2006年,英国南安普敦大学 Shen 等^[15]报道了一个可调谐的连续波 1.7 μm 波段掺

铥光纤激光器,其实验系统如图 1(a)所示。实验使用一个体布拉格光栅进行选波,实现了 1723~1973 nm 波长可调的连续波激光输出。图 1(b)展示了输出功率随波长的变化,输出功率的变化范围为 2~8.4 W,将 1.7 μm 波段光纤激光的输出功率提高到了瓦特级,但是短波长方向的功率转换效率依旧较低。此外,空间结构的实验系统也导致稳定性和紧凑性较差。

随后,Shen 等^[16]对掺铥光纤激光器开展了一系列研究。他们在 2008 年报道了一个 1.7 μm 波段的荧光光纤光源,输出光谱覆盖 1650~2100 nm,对应的输出功率小于 20 mW。随后几年,关于掺铥光纤激光器的研究集中在效率更高的 2 μm 波段附近。直到 2015 年,他们再次报道了 1.7 μm 的宽谱光源^[17]。实验同时使用 790 nm 半导体激光器和 1565 nm 光纤激光器作为泵浦源,基于 TDF 中两种不同的增益能级,实现了光谱覆盖 1740~2070 nm 的连续波激光输出,输出功率达到了 500 mW。同年, Daniel 等^[18]还报道了全光纤、可调谐的 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器。实验通过一个可调 FBG 进行选波进而实现了全光纤结构,获得了调谐范围 1660~1720 nm 的连续波激光输出,实验结构如图 2(a)所示。进一步,调整实验装置如图 2(b)所示,在 1726 nm 获得了 12.6 W 的最大输出功率,对应的斜率效率为 63%,输出效率和功率主要受到 TDF 的性能以及泵浦功率的限制。随后,他们通过降低铥离子浓度来优化 TDF 的性能,并且自制了功率接近百瓦的 1.5 μm 波段掺铥光纤放大器作为泵浦源,在 1726 nm 获得了高达 47 W 连续波激光,对应的斜率效率提高到 80%,但是实验采用空间耦合泵浦,牺牲了系统的稳定性和紧凑性^[19]。

国内关于连续波 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器的研究工作大多聚焦于实现窄线宽激光输出。2015 年,中国科学院西安光学精密机械研究所 Quan 等^[20]报道了一个窄线宽 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器。实验使

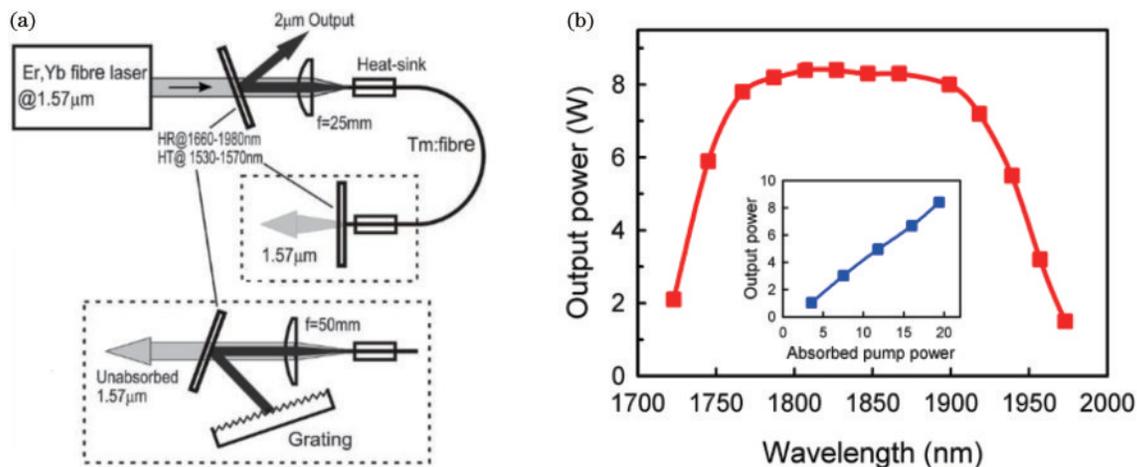


图 1 掺铥光纤激光器。(a)空间结构的连续波 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器;(b)输出功率随波长的变化^[15]

Fig. 1 Tm-doped fiber laser. (a) Spatially structure CW Tm-doped fiber laser operating at 1.7 μm band; (b) evolution of output power with wavelength^[15]

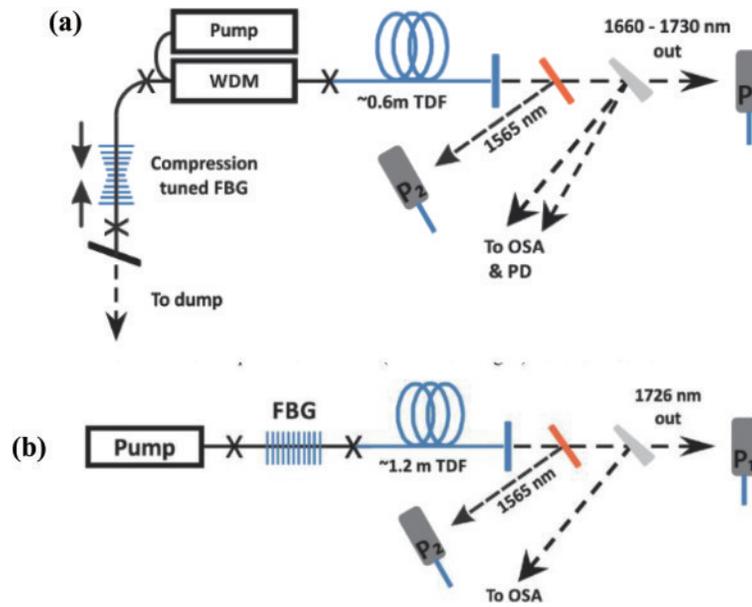


图2 全光纤结构连续波 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器。(a) 波长可调谐；(b) 固定波长^[18]

Fig. 2 All-fiber structure CW Tm-doped fiber laser operating at 1.7 μm band. (a) Tunable wavelength; (b) fixed wavelength^[18]

用一个体布拉格光栅进行选波, 获得了 1750 nm 窄线宽连续波激光, 线宽为 54 pm。然而, 由于泵浦光的空间耦合效率较低以及腔的损耗也较大, 使得输出功率只有 400 mW, 斜率效率也只有 23.5%。次年, 他们使用 FBG 代替体布拉格光栅实现了全光纤结构的实验系统, 并在 1707 nm 获得了 1.28 W 的连续波激光^[21], 随后又进一步将输出功率提高至 3.15 W^[22]。2020 年, 长春理工大学的 He 等^[23] 报道了一个基于增益开关的窄线宽 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器, 在 1723 nm 获得了线宽为 180 pm 的连续波激光。实验基于增益开关

对泵浦源进行调制, 可以灵活方便地在连续波和脉冲激光输出之间切换。同年, 天津大学 Zhang 等^[24] 报道了基于环形腔结构的窄线宽 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器。实验使用多模干涉滤波器进行选波和调谐, 在 1720 nm 获得了最大输出功率 227 mW, 线宽为 23.7 pm 的连续波激光。由于环形腔中没有空间烧孔效应, 更有利于获得窄线宽激光, 并且环形腔结构可以使用较长的增益光纤, 有利于实现更高功率的窄线宽激光输出。随后, 他们进一步优化了实验系统, 将输出功率进一步提高至 2.36 W, 实验结构如图 3^[25] 所示。

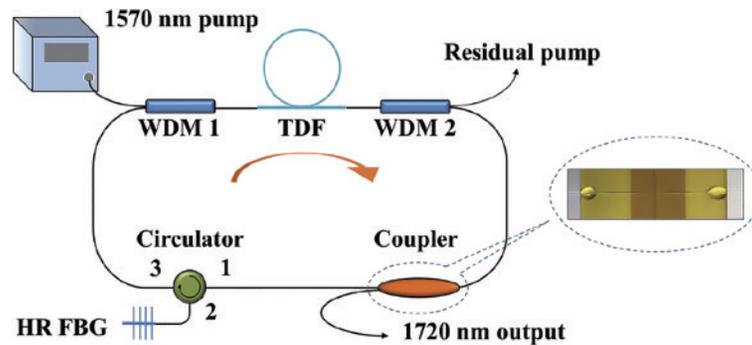


图3 环形腔结构连续波 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器^[25]

Fig. 3 Ring-cavity structure CW Tm-doped fiber laser operating at 1.7 μm band^[25]

2021 年, Zhang 等^[26] 又报道了两种环形腔结构的连续波单频 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器。一种环形腔结构使用未泵浦的 TDF 作为饱和和吸收体, 在 1720 nm 波长实现了功率为 407 mW 的单频激光输出; 另一种环形腔结构通过在主环中加入多个子环构成多环谐振腔^[27], 将 1720 nm 单频激光功率提高至 1.1 W。随后, Zhang 等^[28] 还提出了一种线性腔结构的腔内泵浦 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器, 在波长 1720 nm 实现了

斜率效率 60% 以上的激光输出, 是目前基于商用 TDF 在 1.7 μm 波段获得的最高斜率效率。同年, 华南理工大学的 Cen 等^[29] 报道了一个基于分布式布拉格反射 (DBR) 线性腔结构的单频 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器, 在 1727 nm 实现了连续波单频激光输出, 不过输出功率与斜率效率都较低。

有关脉冲 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器的相关报道主要来自香港大学的 Li 等^[30], 他们基于不同的脉冲

产生方法报道了一系列 1.7 μm 波段掺铽光纤激光器。2017 年,他们首次报道了脉冲 1.7 μm 波段掺铽光纤激光器。实验基于非线性偏振旋转效应(NPR)进行锁模产生孤子脉冲激光,并通过衍射光栅可进一步将输出脉宽压缩至 445 fs。次年,他们报道了一个可调谐、纳秒脉冲 1.7 μm 波段掺铽光纤激光器,并在生物成像上进行了应用^[9]。实验基于增益开关产生脉冲泵浦光,使用声光晶体作为可调滤波器进行选波,实现了 1690~1765 nm 脉冲激光输出,并且通过改变谐振腔长度可将脉宽压缩至 150 ns。然而,由于脉冲宽度和能量的限制,只能对生物组织进行二维成像。随后,他们进一步优化了激光器性能,在 1.7 μm 波段获得了宽度小于 16.7 ns,能量大于 50 μJ 的脉冲输出,实现了三维立体成像^[10]。2019 年,Li 等^[31]报道了一个基于 NPR 锁模的纳秒 1.7 μm 波段掺铽光纤激光器,获得了高能量的类噪声脉冲激光。之后,他们与华南师范大学的 Chen 等^[32]合作,在基于 NPR 锁模的飞秒 1.7 μm 波段锁模掺铽光纤激光器中实现了耗散孤子输出。

2020 年,南洋理工大学的 Chen 等^[33]报道了一个可调谐、皮秒脉冲 1.7 μm 波段掺铽光纤激光器。实验基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)实现锁模,使用自制的 W 型正常色散 TDF 作为增益光纤,通过同时利用 W 型光纤的弯曲诱导带通效应对输出波长进行调谐,获得了 1740~1892 nm 可调的皮秒脉冲激光。

2.2 基于其他离子掺杂光纤

为了克服 TDF 在 1.7 μm 波段短波方向增益不足的缺点,一些新型的掺杂光纤应运而生,即 TTDF、THDF 和 BDF。通过共掺铽离子或铱离子,可以优化 TDF 的增益谱,使其增益谱的峰值波长向短波方向移动。BDF 的增益谱则覆盖了 1600~1800 nm 的波长范围,不存在信号重的重吸收作用,所以 1.7 μm 波段掺铽光纤激光器很有发展前景。

首先对基于其他离子掺杂光纤的连续波 1.7 μm 波段激光器进行介绍。2013 年,日本大阪府立大学的 Yamada 等^[34]报道了一个环形腔结构的 1.7 μm 波段铽铱共掺光纤激光器。实验使用 1210 nm 半导体激光器泵浦 TTDF 并通过一个可调光纤滤波器选波,获得了 1635.6~1766 nm 可调谐连续波激光输出,但是由于光纤工艺还不成熟,输出功率和转换效率都很低。次年,国防科技大学 Xue 等^[35]报道了一个环形腔结构的 1.7 μm 波段铽铱共掺光纤激光器。实验使用 1550 nm 光纤激光器泵浦 THDF,也使用一个光纤可调滤波器选波,实现了 1727~2030 nm 的大范围可调谐激光输出,调谐宽度达到 303 nm。2014 年,俄罗斯科学院 Firstov 等^[36]首次报道了 1.7 μm 波段掺铽光纤激光器,他们使用自制的 BDF 作为增益光纤,在 1625~1775 nm 获得了功率为百毫瓦量级的连续波激光。次年,通过优化 BDF 的性能,在 1700 nm 获得了瓦级的激光输出,对应斜率效率提高到 33%^[37]。目前 1.7 μm 波段掺

铽光纤激光器的功率与效率还不是特别高,主要是由于 BDF 的工艺还不成熟,存在铽离子浓度低的问题。

在脉冲输出方面,俄罗斯科学院 Firstov 等也进行了系列研究。2016 年,他们与芬兰坦佩雷理工大学 Noronen 等^[38]合作报道了基于碳纳米管锁模的 1.7 μm 波段掺铽光纤激光器,在 1730 nm 实现了脉宽 1.65 ps 的激光输出。随后,Noronen 等^[39]又报道了一个基于 NPR 与频移反馈锁模的 1.7 μm 波段铽铱共掺光纤激光器,通过使用可调谐滤波器进行选波,实现了 1705~1805 nm 的飞秒脉冲激光输出。2018 年,Khegai 等^[40]又报道了一种基于非线性放大环形镜(NALM)锁模的 1.7 μm 波段掺铽光纤激光器,在 1700 nm 波长实现了脉宽 28.1 ps 的激光输出,并通过光纤压缩器可将脉宽进一步减小至 630 fs。同年,厦门大学的 Du 等^[41]报道了基于模间拍频调制(IM)技术的 1.7 μm 铽铱共掺光纤激光器,在 1781 nm 实现了脉宽 1.4 μs 的激光输出。相比于传统锁模方式,IM 技术获得的脉冲没有那么稳定,但是 IM 技术不需要不饱和吸收体等器件,是一种经济、紧凑的调制方法。

2.3 小节

基于稀土离子掺杂的光纤激光器是获得 1.7 μm 波段光纤激光的重要手段,近年来得到了广泛的研究和报道,在表 1 与表 2 中分别总结了连续波和脉冲 1.7 μm 波段稀土离子掺杂光纤激光器的研究进展。可以看到,不管是连续波还是脉冲领域,掺铽光纤激光器目前的功率水平都是最高的,获得了 47 W 的连续波激光以及平均功率接近 1 W 的脉冲激光。尽管 TDF 在 1.7 μm 波段有较强的重吸收,但是可以通过降低铽离子浓度优化 TDF 的热载荷分布、制造大模场的 TDF 等方法进一步提高其输出功率,有望在 1.7 μm 波段实现百瓦量级的连续波激光输出。此外,在实现窄线宽激光输出方面,大量研究工作也都是使用 TDF 作为增益光纤,基于 DFB、DBR 线性腔结构和环形腔结构都已经实现了 1.7 μm 波段单频连续波激光输出。这主要是因为 TDF 的制备技术相对于其他离子掺杂光纤更为成熟,成本更为低廉,便于开展研究。在实现波长调谐方面,TTDF、THDF 具有独特的优势。由于它们的增益谱非常宽,通过选波器件可以实现大范围波长调谐,目前在 THDF 中获得了调谐范围大于 300 nm 的连续波激光输出。BDF 在产生 1.7 μm 波段激光方面非常有前景,其发射峰恰好处于 1.7 μm 波段并且不存在重吸收作用。目前 BDF 的制备工艺还不成熟,由于铽离子的掺杂浓度低,往往使用较长的 BDF 来提供足够的增益,所以进一步降低 BDF 的损耗十分必要。此外,通过研究铽离子在近红外波段发射的活性状态来优化 BDF 的性能,同时研发具有更大模场的 BDF,使得 1.7 μm 波段掺铽光纤激光器的效率与功率有望得到进一步提高。

表 1 基于稀土离子掺杂的连续波 1.7 μm 波段光纤激光器的研究进展Table 1 Progress of CW fiber laser operating at 1.7 μm band based on rare-earth-doped fibers

Year	Fiber type	Cavity scheme	Pump wavelength /nm	Output wavelength / nm	Output power /W	Slope efficiency /%	Line width / μm	Ref.
2004	TDF	Linear	790	1734-1736	≤ 0.001	≤ 0.2	≈ 30	[14]
2006	TDF	Linear	1565	1723-1973	2-8.4	≤ 46	≤ 500	[15]
2008	TDF	Linear	790	1650-2100	< 0.02	38	2.8×10^5	[16]
2013	TTDF	Ring	1210	1635.6-1766	$\leq 1.6 \times 10^{-4}$	≤ 0.2	—	[34]
2014	THDF	Ring	1550	1727-2030	≤ 0.408	≤ 42.6	—	[35]
2014	BDF	Linear	1568	1625-1775	≤ 0.6	≤ 20	—	[36]
2015	TDF	Linear	790, 1565	1740-2070	0.5	—	—	[17]
2015	TDF	Linear	1565	1660-1720, 1726	0.065-1.5, 12.6	$\leq 46, 63$	—, 70	[18]
2015	BDF	Linear	1568	1700	1.05	33	$\approx 4 \times 10^3$	[37]
2015	TDF	Linear	1550	1750	0.4	23.5	54	[20]
2016	TDF	Linear	1550	1707	1.28	36.1	44	[21]
2017	TDF	Linear	1550	1707	3.15	42.1	50	[22]
2019	TDF	Linear	1580	1726	47	80	$\approx 3 \times 10^3$	[19]
2020	TDF	Linear	1550	1723	2×10^{-4}	—	180	[23]
2020	TDF	Ring	1570	1712-1720	0.1-0.227	≤ 10.3	23.7	[24]
2020	TDF	Ring	1570	1720	2.36	50.2	39	[25]
2021	TDF	Linear	1610	1727	0.012	4.81	8.5×10^{-5}	[29]
2021	TDF	Ring	1570	1720	0.407	22.7	4.3×10^{-5}	[26]
2021	TDF	Ring	1570	1720	1.11	46.4	1.8×10^{-5}	[27]
2021	TDF	Linear	1560	1720	1.13	68	75	[28]

表 2 基于稀土离子掺杂的脉冲 1.7 μm 波段光纤激光器的研究进展Table 2 Progress of pulsed fiber laser operating at 1.7 μm band based on rare-earth-doped fibers

Year	Fiber type	Pulse generation method	Pump wavelength /nm	Output wavelength/nm	Output average power /mW	Pulse width	Power conversion efficiency /%	Ref.
2016	BDF	Mode-locked	1565	1730	10	1.65 ps	0.8	[38]
2016	THDF	Mode-locked	1556	1705-1805	2-12	630-950 fs	0.1-0.5	[39]
2017	TDF	Mode-locked	1560	1785	264	445 fs	10	[30]
2018	THDF	IM	1211	1781	3.4	1.4 μs	1.4	[41]
2018	BDF	Mode-locked	1570	1700	20.4	28 ps, 630 fs	4	[40]
2018	TDF	Gain switch	1560	1690-1765	284-654	190 ns, 150 ns	10.7-24.8	[9]
2019	TDF	Mode-locked	1650	1750	50-251	0.8-3.7 ns	1-5	[31]
2020	TDF	Gain switch	1560	1700, 1725, 1750	582, 668, 753	16.7 ns	< 25.1	[10]
2020	TDF	Mode-locked	1565	1740-1892	< 180	2.76 ps	< 10	[33]
2021	TDF	Mode-locked	1560	1746	3.55	230 fs	0.3	[32]

3 基于非线性效应的 1.7 μm 波段光纤激光器研究进展

目前在实芯光纤中主要基于以下几种非线性效应获得 1.7 μm 波段激光,即受激拉曼散射(SRS)、光孤子自频移(SSFS)、四波混频(FWM),以及多种非线性效应综合作用产生的超连续谱(SC)。其中,SRS由于阈值相对比较低,主要应用于产生连续波 1.7 μm 波段光纤激光,而其他三种非线性效应的产生通常需要高

峰值功率的脉冲泵浦,所以主要用于获得 1.7 μm 波段脉冲光纤激光。

3.1 基于受激拉曼散射

拉曼光纤激光器是以实芯光纤作为非线性介质,基于SRS实现能量从泵浦光到拉曼光的转换,具有高效率和高功率等优点。通过选择合适的泵浦源和拉曼增益光纤,拉曼光纤激光器在输出波长的选择上有相当大的灵活性,因此常常被用于在一些特殊的波段实现波长扩展,可以有效地填补掺杂离子光纤的发射带空白。

首先介绍连续波 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器的研究进展。2011 年,美国密歇根大学的 Alexander 等^[2]报道了首个 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器,其实验结构如图 4 所示。实验使用 1542 nm 的掺铒光纤放大器

(EDFA) 泵浦一根 5 km 长的单模光纤 (SMF), 通过几对不同中心波长的 FBG 构成谐振腔结构以促进级联拉曼转换, 同时 FBG 也起到选波的作用, 在 1708 nm 获得了 4 W 的连续波激光, 线宽小于 1 nm。

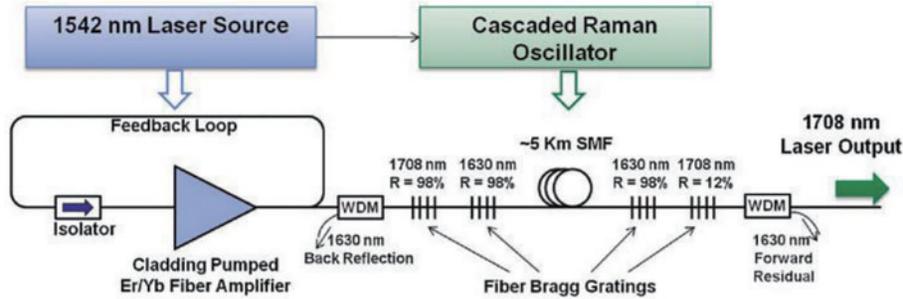


图 4 基于受激拉曼散射的 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器^[2]

Fig. 4 Raman fiber laser operating at 1.7 μm band based on the stimulated Raman scattering^[2]

2012 年,丹麦科技大学的 Svane 等^[42]报道了一个线偏振、窄线宽 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器。实验使用保偏拉曼光纤 (PMRF) 作为增益光纤,通过 FBG 构成谐振腔在 1679 nm 实现了线宽 27 pm 的连续波激光输出,但是输出功率只有不到 300 mW。随后,他们优化腔体的设计,将输出功率提高到了 500 mW 以上^[43]。2014 年,复旦大学的 Liu 等^[44]报道了一个高功率、可调谐的 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器。实验使用渐变折射率多模光纤 (MMF) 作为增益光纤,在 1658 nm 获得了最高 10.5 W 的连续波激光,并进一步通过体布拉格光栅选波实现了 1638~1675 nm 可调激光输出。2017 年,长春理工大学的 Zhang 等^[45]报道了一个窄线宽、可调谐的 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器。实验使用可调谐 1.5 μm 放大自发辐射光源 (ASE) 泵浦高非线性光纤 (HNLF) 和色散位移光纤 (DSF), 并利用两个环形滤波器缩窄激光线宽,获得了波长 1652~1680 nm 可调,线宽小于 30 pm 的连续波激光。

2018 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的 Zhang 等^[46]报道了一个高功率 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器。实验使用高功率 1064 nm 光纤激光器泵浦一段商用拉曼光纤 (RF), 在 1676 nm 获得了 66.9 W 的连续波激光。随后,他们使用 1 μm 波段 ASE 光源作为泵浦源,在 1691 nm 获得了连续波拉曼激光,证明了 ASE 光源泵浦能提高拉曼光纤激光器的光谱纯度^[47]。次年,法国诺曼底大学的 Thouroude 等^[48]报道了一个线偏振、高功率的 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器。实验使用保偏单模光纤 (PMSMF) 作为增益光纤,实现了功率均大于 5 W 的线偏振连续波激光输出,将 1.7 μm 波段线偏振拉曼激光的功率提高了一个数量级。同年,国防科技大学的 Zhang 等^[49]报道了高功率、可调谐的 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器。实验使用可调谐 1 μm 波段 ASE 光源泵浦 RF, 实现了 1695~1725 nm 的可调连续波激光输出,最大功率为 14.4 W。随后,他们基于商用通信光纤 (CCF) 在 1721 nm 获得了实现

功率为 2.16 W 连续波拉曼激光输出,使用 CCF 作为增益光纤可以有效降低激光器成本^[50]。2020 年,丹麦 Grimes 等^[51]与 OFS 公司合作报道了一个高功率的连续波/脉冲 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器。实验使用高功率 1117 nm 光纤激光器泵浦一根 OFS 公司研制的 RF, 并使用自行设计的拉曼过滤光纤来抑制 1.8 μm 的高阶拉曼转换,在 1692 nm 实现了功率高达 104 W 的连续激光输出,实验还基于增益开关产生脉冲泵浦光,获得了平均功率高达 23 W 的脉冲拉曼激光。

关于脉冲 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器的报道比较少。这是因为 SRS 具有高阈值与低增益系数的特点,所以在拉曼光纤激光器中往往使用很长的无源光纤以提供足够的拉曼增益。但在长腔中的受激布里渊散射效应 (SBS) 的阈值通常低于 SRS 的阈值,而 SBS 会对脉冲拉曼光纤激光器的输出功率和脉冲性能造成影响。此外,由于响应速度快,拉曼光纤激光器中不能通过调 Q 的方案产生脉冲。因此,只有基于锁模或者脉冲同步泵浦的方案才能实现脉冲拉曼光纤激光器。这些因素都限制了脉冲拉曼光纤激光器的发展与应用。

2015 年,上海交通大学的 Kuang 等^[52]报道了一个基于 NPR 锁模的 1.7 μm 波段光纤拉曼激光器。实验使用宽带泵浦源抑制 SBS,通过泵浦 HNLF 在 1651 nm 获得了平均功率 110 mW 的皮秒脉冲激光。同年,江苏师范大学 Yao 等^[53]报道了一个高平均功率 1.7 μm 波段拉曼光纤激光器。实验使用一个高平均功率的脉冲 1565 nm 光纤激光器泵浦一段多模 CCF,在 1686.5 nm 获得了平均功率 4.4 W 的纳秒脉冲激光输出。2020 年,浙江大学的 Yin 等^[54]报道了一个窄线宽的 1.7 μm 波段拉曼光纤激光放大器。实验使用 1.54 μm 的脉冲光纤激光器和 1.65 μm DFB 激光器分别作为泵浦源和种子源,以高掺铒光纤 (HGDF) 作为增益光纤,在 1654 nm 获得了线宽为 0.08 nm 的纳秒脉冲激光。

3.2 基于光孤子自频移

基于 SSFS 的拉曼孤子光纤激光器通常被用来在光纤中产生波长可调的飞秒脉冲。SSFS 的本质是脉冲内的拉曼散射频移,即光孤子脉冲内的高频成分将能量向低频成分转移。因此,拉曼孤子光纤激光器的泵浦源往往是光谱较宽的飞秒光源。需要指出的是,基于 SSFS 的拉曼孤子光纤激光器与基于 SRS 的拉曼光纤激光器有很大的不同。首先,SSFS 在光纤的反常色散区发生,而 SRS 无需工作在光纤的反常色散区。其次,由于光孤子能量与光纤有效模场面积成比例,所以拉曼孤子光纤激光器往往使用大模场光纤(LMAF)作为增益光纤来产生高能量脉冲。而在拉曼光纤激光器中往往使用模场面积较小的增益光纤,这是因为光纤模场面积增大会导致拉曼阈值增大,不利于拉曼转换的发生。

2011 年,美国康奈尔大学的 Wang 等^[55]报道了一个高能量的 1.7 μm 波段拉曼孤子光纤激光器。实验使用 1544 nm 脉冲激光泵浦一根 LMAF,基于 SSFS 实现了 1560~1700 nm 波长可调、脉宽为 200 fs 的脉冲输出。随后,通过更换泵浦源以及使用更大模场面积

的 LMAF,进一步提高了输出脉冲能量与波长调谐范围^[56]。2013 年,美国亚利桑那大学的 Nguyen 等^[57]报道了一个高功率的 1.7 μm 波段拉曼孤子光纤激光器,其实验结构如图 5 所示。实验使用 1560 nm 脉冲激光泵浦一根大模场光子晶体光纤(LMAPCF),获得了 1600~1780 nm 波长可调、平均功率大于 500 mW 的飞秒脉冲激光。可以看到,由于 LMAF 的模场面积太大无法与实芯光纤熔接,所以使用 LMAF 作为增益光纤通常难以实现全光纤结构的实验系统。2017 年,上海交通大学的 Fang 等^[58]报道了一个全光纤、高效率的 1.7 μm 波段拉曼孤子光纤激光器。实验使用 1600 nm 飞秒光纤激光器作为泵浦源,其输出尾纤与一根 DSF 熔接实现全光纤结构,获得了 1700~1740 nm 波长可调的飞秒激光,光光效率最高可达 80%。随后,德国的 Zach 等^[59]报道了一个全光纤、高功率的 1.7 μm 波段拉曼孤子光纤激光器。实验使用 1480 nm 拉曼光纤激光器泵浦一根自制的掺铒保偏超大模场光纤(PMVMAF),实现了 1620~1990 nm 波长可调的脉冲激光输出,最高平均功率高达 1.5 W。

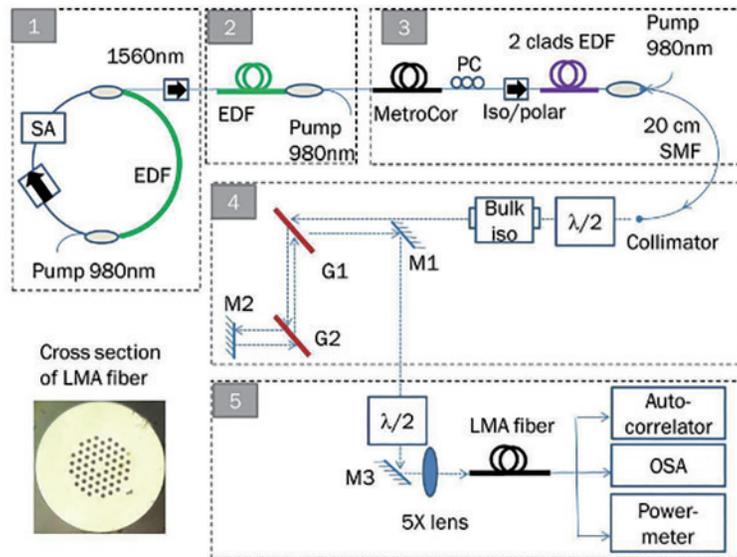


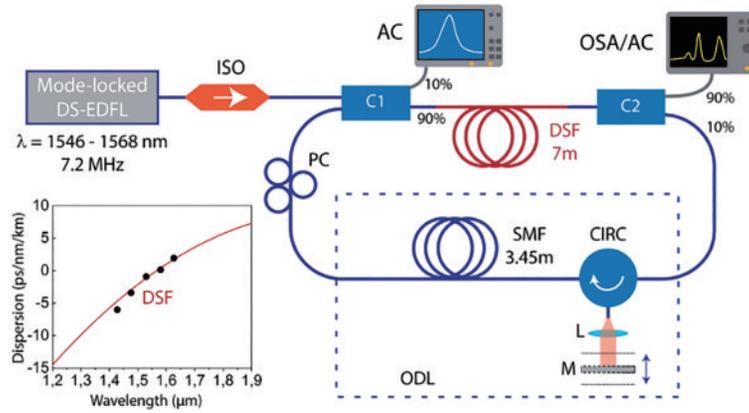
图 5 基于光孤子自频移的 1.7 μm 波段的拉曼孤子光纤激光器^[57]

Fig. 5 Raman soliton fiber laser operating at 1.7 μm band based on the soliton self-frequency shift^[57]

3.3 基于四波混频

基于简并 FWM 的光纤参量放大器(FOPA)/振荡器(FOPO)为获得波长可调谐的超短脉冲提供了新的选择,通常用于在光纤中产生皮秒脉冲激光。简并 FWM 指得是两个相同波长的泵浦光子湮灭,产生一个高频的信号光光子和一个低频的闲频光光子。在 FOPA 中,泵浦光与种子光一起注入到光纤中,泵浦光通过简并 FWM 进行能量转换放大种子光。而 FOPO 则没有种子光的注入,其信号光和闲频光都由噪声产生,并且 FOPO 在 FOPA 的基础上对信号光和闲频光引入了谐振腔结构。

2018 年,法国诺曼底大学的 Becheker 等^[60]报道了一个 1.7 μm 波段 FOPO,其实验结构如图 6 所示。实验使用波长可调的 1.5 μm 脉冲 EDFA 泵浦一根 DSF,基于 FWM 实现了 1617~1876 nm 波长可调的皮秒脉冲激光输出,最大平均功率为 14.3 mW。随后,他们通过优化实验参数,将平均功率提高到 204 mW^[61]。2020 年,美国亚利桑那大学的 Qin 等^[62]报道了一个高功率的 1.7 μm 波段 FOPA。实验使用 1550 nm 掺铒光纤放大器泵浦一根保偏 DSF,通过啁啾脉冲放大与参量相互作用的结合来实现光纤内部的高功率放大,在 1700 nm 获得了平均功率 1.42 W 的脉冲激光,并将脉冲宽度压缩至 450 fs。

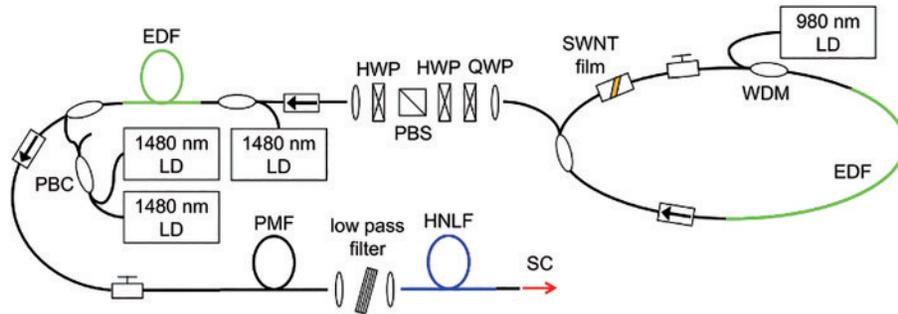
图 6 基于四波混频的 1.7 μm 波段光纤光学参量振荡器^[60]Fig. 6 Fiber optical parametric oscillator operating at 1.7 μm band based on the four-wave mixing^[60]

3.4 基于超连续谱

与传统单波长激光器相比,SC光源具有输出光谱范围宽的特点,但是通过搭配滤波器进行选波,也可以实现产生某一特定波段激光输出的目的。SC的产生是多种非线性效应综合作用的结果,其过程十分复杂。根据泵浦类型(飞秒脉冲、皮秒脉冲、纳秒脉冲)和光纤色散条件(正常色散与反常色散)的不同,主导光谱展宽的非线性效应也不相同,主要包括自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、SRS和FWM等。

2011年,日本名古屋大学的Ishida等^[7]报道了一个全光纤结构的1.7 μm 波段飞秒SC光源。实验使用1560 nm飞秒激光泵浦一根正常色散HNLf,在1.7 μm 波段附近实现了3 dB带宽为358 nm、平均功率30 mW的飞秒激光输出。随后,他们进一步优化实

验系统,将平均功率提高到了60 mW,但3 dB带宽减小到242 nm,实验结构如图7^[8]所示。2016年,天津大学的Liao等^[63]报道了高功率的1.7 μm 波段皮秒SC光源。实验使用一根高非线性光子晶体光纤(HNPCF)作为增益光纤,在1600~2180 nm波长范围内获得了平均功率1 W、高平坦度的SC。次年,德国汉堡大学的Chung等^[64]报道了一个高功率的1.7 μm 波段飞秒SC光源。实验使用1550 nm飞秒光纤激光器泵浦一根正常色散LMAF,通过滤波器进行选波后,在1350~1700 nm范围内实现了波长可调的飞秒脉冲激光输出,输出最高平均功率为330 mW。2019年,美国波士顿大学的Zeng等^[65]报道了一个宽带的1.7 μm 波段飞秒SC光源。实验使用一根高数值孔径单模光纤(HNASMF)作为增益光纤,产生的光谱覆盖1700~2330 nm,对应20 dB带宽为502 nm。

图 7 1.7 μm 波段超连续谱光源^[8]Fig. 7 Super-continuum spectrum light source operating at 1.7 μm band^[8]

3.5 小节

基于光纤非线性效应是实现1.7 μm 波段激光输出的有效方法,在表3与表4中分别总结了基于非线性效应的连续波和脉冲1.7 μm 波段光纤激光器的研究进展。可以看到,基于SRS的拉曼光纤激光器在产生高功率的1.7 μm 波段连续波和准连续脉冲激光方面具有巨大的潜力,已经实现了平均功率超过100 W的连续波激光输出,以及超过20 W的准连续脉冲激光输出,但是拉曼光纤激光器在1.7 μm 波段实现超短脉冲

激光输出的报道较少。基于SSFS的拉曼光子光纤激光器和基于FWM的FOFA/FOPO则在产生波长可调的超短脉冲激光方面展示出了独特的优势,前者往往工作在飞秒领域,而后者则通常工作在皮秒领域。由于拉曼光子光纤激光器的输出功率和脉冲能量受到光纤模场面积的限制,所以一般使用LMAF作为增益光纤,但是LMAF难以集成到全光纤系统中。此外,拉曼光子光纤激光器通过改变泵浦功率对输出波长进行调谐,这会导致调谐范围内的输出功率不均匀(输出

表 3 基于非线性效应的连续波 1.7 μm 波段光纤激光器的研究进展Table 3 Progress of CW fiber laser operating at 1.7 μm band based on nonlinear effects

Year	Fiber type	Nonlinear effects	Pump wavelength /nm	Output wavelength /nm	Output power /W	Efficiency /%	Line width / pm	Ref.
2011	SMF	SRS	1542	1708	4	—	<1000	[2]
2012	PMRF	SRS	1564	1679	0.275	67 (slope)	27	[42]
2013	PMRF	SRS	1564	1680	0.514	67 (slope)	24	[43]
2014	MMF	SRS	1545	1638-1675	3.6	27.7 (power conversion)	<300	[44]
2017	HNLf	SRS	1539-1563	1652-1680	6.3×10^{-5}	—	23.2	[45]
2018	RF	SRS	1064	1676	66.9	42.4 (power conversion)	7670	[46]
2018	RF	SRS	1062	1691	6.9	21 (power conversion)	4700	[47]
2019	PMSMF	SRS	1550	1655, 1679	6.2, 5	79, 64 (power conversion)	5000, 1600	[48]
2019	RF	SRS	1055-1072	1695-1725	10-14.4	25.6 (power conversion)	< 1×10^4	[49]
2020	RF	SRS	1117	1692	104	37 (power conversion)	2000	[51]
2020	CCF	SRS	1066	1721	2.16	6 (power conversion)	4240	[50]

表 4 基于非线性效应的脉冲 1.7 μm 光纤激光器的研究进展Table 4 Progress of pulsed fiber laser operating at 1.7 μm band based on nonlinear effects

Year	Fiber type	Nonlinear effects	Pump wavelength / nm	Output wavelength / nm	Output average power /mW	Pulse width	Power conversion efficiency /%	Ref.
2011	HNLf	SC	1560	1350-2000	30	122 fs	—	[7]
2011	LMAF	SSFS	1544	1560-1700	87-277	200 fs	8-27	[55]
2011	LMAF	SSFS	1550	1580-2130	20-284	>70 fs	—	[56]
2013	LMAPCF	SSFS	1560	1600-1780	126-546	80-95 fs	28-44	[57]
2014	HNLf	SC	1671	1400-1900	60	<137 fs	50	[8]
2015	HNLf	SRS	1539	1651	110	890 ps	11.5	[52]
2015	CCF	SRS	1565	1686	4400	128 ns	27.2	[53]
2016	HNPCF	SC	1564	1600-2180	1000	15 ps	37	[63]
2017	LMAF	SC	1550	1350-1700	230-330	50 fs	10-20	[64]
2017	DSF	SSFS	1600	1700-1740	<26.8	196 fs	<80	[58]
2018	DSF	FWM	1546-1568	1617-1876	<14.3	>14 ps	<20	[60]
2018	DSF	FWM	1560	1620-1870	<204	14.5 ps	<20	[61]
2019	PMVMAF	SSFS	1480	1620-1990	<1500	>120 fs	<3	[59]
2019	HNASMF	SC	1914	1700-2330	92	865 fs	32	[65]
2020	RF	SRS	1117	1693	23×10^3	100 μs -100 ms	8	[51]
2020	HGDF	SRS	1541	1652-1654	98.5	31 ns	<3.2	[54]
2020	DSF	FWM	1550	1700	1420	450 fs	20	[62]

波长越长,输出功率越大)。在 FOPA/FOPO 中则是通过改变泵浦波长或者微调腔长来实现波长调谐,并且小范围地改变泵浦波长就可以实现输出波长的大范围调谐。不过 FOPA/FOPO 中光纤参量放大的增益则受到光纤非线性系数的限制。需要指出的是,基于光纤非线性效应产生激光会不可避免地造成输出光谱展宽。如果想要实现窄线宽激光输出,则需要使用滤波器进行选波。与之相对的,如果想要获得宽谱光源,则应该对光纤非线性效应加以利用,比如基于多种非线性效应综合作用产生 SC 光源。

4 基于空芯光纤的 1.7 μm 波段气体拉曼激光器研究进展

传统的 1.7 μm 波段光纤激光器主要是基于实芯光纤产生此波段的光纤激光。近年来,随着空芯光纤的出现与发展^[66-73],一种新型光纤激光器引起了广泛的关注,即光纤气体拉曼激光器(FGRL)^[74-89]。到目前为止,基于空芯光纤的 FGRL 已经实现了从紫外到中红外波段的激光输出,极大地丰富了光纤激光器的输出波长,这为产生 1.7 μm 波段光纤激光提供了一种新的方案。FGRL 的核心部件是空芯光纤,其纤芯为中

空区域。空芯光纤作为光波导,对泵浦光与拉曼光进行传输。同时,通过在纤芯中注入气体介质,空芯光纤也是激光和气体相互作用的平台。因此,FGRL 既具有光纤激光器结构紧凑、光束质量好、可柔性操作等优点,又具有气体拉曼激光器效率高、窄线宽、波长调谐灵活的优点。最近,本课题组分别基于空芯光纤中的氢气 SRS 与氙气 SRS 实现了 $1.7 \mu\text{m}$ 波段光纤激光输出,下面将先后介绍 $1.7 \mu\text{m}$ 波段光纤氢气/氙气拉曼激光器的研究进展。

4.1 基于氢气受激拉曼散射

氢气是 FGRL 中最常用的气体之一,主要因为以下几点:1) 氢气分子具有较高的拉曼增益,使得氢气发生 SRS 的阈值相对较低;2) 由于氢气的振动拉曼频移系数较大(4155 cm^{-1}),转动拉曼频移系数较小(587 cm^{-1}),所以基于氢气的振动/转动 SRS 可以灵活地满足实验对不同拉曼频移量的需求;3) 纯净的氢气容易获得且价格低廉。使用 $1.5 \mu\text{m}$ 波段激光泵浦氢气,利用氢气转动 SRS (拉曼频移系数为 587 cm^{-1}) 可获得 $1.7 \mu\text{m}$ 波段拉曼激光输出。

2020 年,本课题组报道了一个准全光纤结构的脉冲 $1.7 \mu\text{m}$ 波段光纤氢气拉曼激光器,实验系统如图 8 所示。使用一个脉冲 1550 nm 光纤激光器作为泵浦源,空芯光纤的一端与泵浦源尾纤熔接,另一端被密封在一个特制气体腔内,通过特制气体腔向空芯光纤内充入高压氢气。基于氢气 SRS 在 1705 nm 实现了纳秒脉冲激光输出,输出最高平均功率为 0.5 W ^[90]。随后,将泵浦源更换成可调谐的脉冲 $1.5 \mu\text{m}$ 波段光纤激光器,以及使用更低损耗的空芯光纤,获得了 $1687 \sim 1723 \text{ nm}$ 波长可调的纳秒脉冲激光输出,平均功率提高到 0.8 W ^[91]。进一步,我们建立了相应的数值模型,可对空芯光纤中的氢气纯转动 SRS 过程进行仿真^[92]。基于数值模型的指导优化实验参数,将输出平均功率

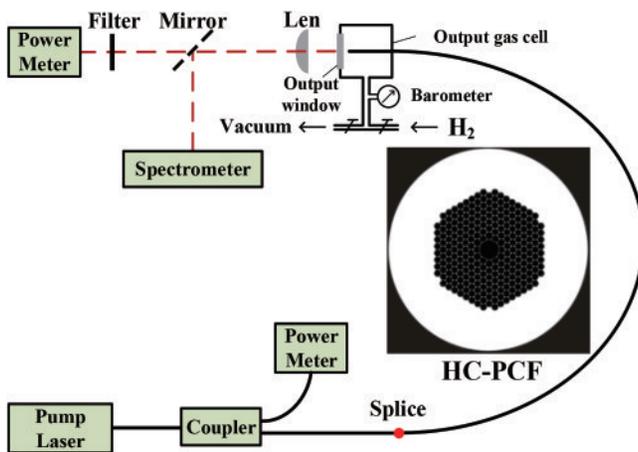


图 8 准全光纤单程结构的脉冲 $1.7 \mu\text{m}$ 波段光纤氢气拉曼激光器(插图:空芯光纤横截面图)^[90]

Fig. 8 Quasi-all-fiber single-pass structure pulsed fiber hydrogen Raman laser operating at $1.7 \mu\text{m}$ band (insert: schematic diagram of cross section of used hollow-core fibers)^[90]

提高到了 3.3 W , 此时输出波长可调范围为 $1693 \sim 1705 \text{ nm}$ ^[93]。

为了使系统更加稳定紧凑,本课题组随后实现了全光纤结构的 $1.7 \mu\text{m}$ 波段 FGRL^[94-98]。实验使用商用电弧放电熔接机将充有氢气的空芯光纤的两端与实芯单模光纤熔接,制成一个全光纤氢气气体腔。由于制备的全光纤气体腔长度高达 50 m ,拉曼阈值得到有效降低。通过使用高功率连续波 1540 nm 光纤激光器作为泵浦源,在 1693 nm 获得连续波激光输出,最大功率为 2.15 W ,总的光光转换效率为 31% ^[94]。随后我们更换可调脉冲光纤激光器泵浦全光纤气体腔,获得了全光纤结构的脉冲 $1.7 \mu\text{m}$ 波段光纤氢气拉曼激光器^[95]。进一步,在全光纤气体腔的两端引入拉曼波长的 FBG 可以构成谐振腔结构。本课题组首次建立了光纤气体拉曼振荡器的数值模型,并对连续波 $1.7 \mu\text{m}$ 波段光纤气体拉曼振荡器进行了实验研究,实验结构如图 9^[97] 所示。与单程结构的 FGRL 相比,谐振腔结构可以有效地减低拉曼阈值,提高拉曼转换效率。随后,我们研究了脉冲 $1.7 \mu\text{m}$ 波段光纤气体拉曼振荡器的特性^[98]。结果表明,只有当泵浦脉冲重复频率与谐振腔的本征频率一致时,谐振腔才能起到降低拉曼阈值的作用。

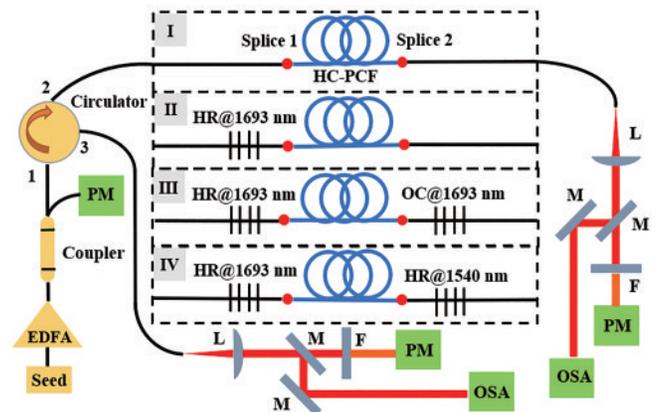


图 9 全光纤谐振腔结构的连续波 $1.7 \mu\text{m}$ 波段光纤氢气拉曼激光器^[97]

Fig. 9 All-fiber resonant cavity structure CW fiber hydrogen Raman laser operating at $1.7 \mu\text{m}$ band^[97]

4.2 基于氙气受激拉曼散射

氙气也是常用的拉曼气体,氙分子作为氢分子的同位素,其质量相对氢分子更大,所以氙气的拉曼频移系数要小于氢气的拉曼频移系数。当使用 $1.5 \mu\text{m}$ 波段激光泵浦时,基于氙气转动 SRS (拉曼频移系数为 415 cm^{-1}) 可以产生短波长方向的 $1.7 \mu\text{m}$ 波段激光。此外,氙气的拉曼增益也小于氢气的拉曼增益,导致氙气 SRS 的阈值更大,往往需要高峰值功率的脉冲激光进行泵浦,因此目前基于氙气 SRS 还未实现连续波 $1.7 \mu\text{m}$ 波段 FGRL。

2019 年,本课题组报道了一个准光纤结构的 $1.7 \mu\text{m}$ 波段光纤氙气拉曼激光器,其实验结构与图 7

中的基本相同^[99]。实验使用可调谐的脉冲 1.5 μm 波段光纤激光器泵浦充有氘气的空芯光纤,基于氘气 SRS 实现了 1640~1674 nm 波长可调的脉冲激光输出,线宽只有约 5 pm,最高输出功率为 0.8 W。次年,通过更换高功率的 1.5 μm 波段泵浦源并优化实验参数,将输出平均功率提高到了 2.9 W,输出波长调谐范围为 1645~1656 nm,光光转换效率大于 54%^[100]。2021 年,通过制备全光纤氘气气体腔,搭建了一个全光纤结构的脉冲 1.7 μm 波段氘气拉曼激光器,获得了 1642~1656 nm 波长可调的脉冲激光,最大平均功率约为 1.2 W^[96]。

4.3 小节

FGRL 为产生 1.7 μm 波段光纤激光提供了新的方案,表 5 总结了基于空芯光纤的 1.7 μm 波段 FGRL 的研究进展。相比于传统的实芯光纤激光器,1.7 μm 波段 FGRL 具有窄线宽、波长调谐灵活、转换效率高等优点。目前已经通过制备全光纤气体腔实现了系统的

全光纤化,并且实现了瓦级的连续波和脉冲激光输出,这极大提高了 1.7 μm 波段 FGRL 的紧凑性和稳定性,为其实用化打下了坚实的基础。今后,1.7 μm 波段 FGRL 将会继续向着更高效率、更高功率和更高稳定性的方向发展。通过优化空芯光纤与实芯光纤的熔接损耗、减小空芯光纤的传输损耗等手段,可以进一步提高光光转换效率。在目前实验的泵浦功率下,空芯光纤与实芯光纤的熔点还未达到损伤阈值,输出拉曼功率也未出现饱和现象,因此通过使用更高功率的 1.5 μm 光纤激光器作为泵浦源,有望进一步提高 1.7 μm 波段拉曼激光的输出功率。尽管目前已经通过制备全光纤气体腔实现了全光纤结构,但是由于氘气与氘气的分子体积小质量轻,可以穿透空芯光纤的石英壁溢出。气体溢出会影响 FGRL 性能的长期稳定性,需要进一步研究解决,一种可行的方法是对空芯光纤的表面进行镀膜。总之,对 1.7 μm 波段 FGRL 的研究方兴未艾,还具有很大的发展空间。

表 5 基于空芯光纤的 1.7 μm 光纤气体拉曼激光器的研究进展
Table 5 Progress of fiber gas Raman laser operating at 1.7 μm band based on hollow-core fibers

Year	System structure	Raman gas	Pump wavelength / nm	Output wavelength / nm	Output average power / W	Pulse width / ns	Optical conversion efficiency / %	Line width / pm	Ref.
2019	Quasi-all-fiber	Deuterium	1535-1565	1640-1674	0.8	12	60	5.2	[99]
2020	Quasi-all-fiber	Deuterium	1540-1550	1645-1656	2.9	12	58	<200	[100]
2020	Quasi-all-fiber	Hydrogen	1550	1705	0.5	12	32	<200	[90]
2020	Quasi-all-fiber	Hydrogen	1535-1565	1687-1723	0.8	10	60	<200	[91]
2020	Quasi-all-fiber	Hydrogen	1540-1550	1693-1705	3.3	13	60	<200	[93]
2021	All-fiber (single-pass)	Hydrogen	1540	1693	2.15	CW	31	<200	[94]
2021	All-fiber (single-pass)	Hydrogen	1540-1550	1693-1705	1.63	10	58	<200	[95]
2021	All-fiber (single-pass)	Deuterium	1538-1550	1643-1656	1.2	20	46	<200	[96]
2021	All-fiber (oscillator)	Hydrogen	1540	1693	1.8	CW	62	<200	[97]
2021	All-fiber (oscillator)	Hydrogen	1540	1693	1.5	30	54	<200	[98]

(note: CW means that output laser is continuous-wave laser)

5 结束语

1.7 μm 波段光纤激光器具有广阔的应用价值,近年来得到了越来越多的研究与关注。在不同的应用场景往往对 1.7 μm 波段光纤激光器有不同的需求,比如:在生物成像中往往需要持续时间短、脉冲能量大、平均功率高的脉冲激光来实现三维立体成像并增加成像深度;在气体探测中则需要线宽窄、波长可调谐、平均功率高的激光,从而可以精确分辨气体吸收线并增加探测距离;在材料加工中通常使用高平均功率连续波激光进行更高效的焊接,使用高峰值功率超快激光来提高打标精度等。根据不同的应用需求,结合目前

的研究热点,我们认为 1.7 μm 波段光纤激光器的研究主要有以下几个发展趋势:

1) 实现全光纤结构。绝大多数的应用场景都会对激光器的紧凑性与稳定性提出要求,因此全光纤结构的系统是十分必要的。只有全光纤结构才能真正体现出光纤激光器鲁棒性、抗干扰、紧凑实用的优点。目前部分 1.7 μm 波段光纤激光器未能实现全光纤结构主要有两个方面的原因。一方面是光纤之间的熔接问题。比如,当泵浦源为高功率光纤激光器时,其输出尾纤往往是多模光纤。由于模场失配,泵浦源尾纤可能难以与增益光纤低损耗熔接。当使用 LMAF 作为增益光纤时,由于模场面积太大,LMAF 无法与实芯光

纤熔接;当空芯光纤在充气状态与实芯光纤熔接时,需要特殊的熔接技术。另一方面是一些器件无法集成到全光纤系统中。比如,在锁模光纤激光器中使用 SESAM 作为可饱和吸收体,或使用体布拉格光栅进行滤波等。这种情况下,可以通过其他锁模方法(比如 NPR)或者使用光纤结构滤波器件来实现全光纤结构系统。

2) 获得更高平均功率。目前 1.7 μm 波段光纤激光器输出的最高平均功率由基于 SRS 的拉曼光纤激光器实现,在连续波激光领域为 104 W、在脉冲激光领域为 23 W。可见拉曼光纤激光器在实现 1.7 μm 波段高功率激光输出方面具有很大的优势,尤其是在连续波激光与准连续波脉冲激光领域,但 RF 的性能以及更高阶拉曼转换的发生等因素都限制了其功率进一步提高。在短脉冲领域,要提高输出平均功率则要根据不同的技术方案具体分析。对掺杂光纤激光器而言,掺杂光纤本身的性能对提高转换效率与输出功率十分重要。在基于 SSFS 的拉曼孤子激光器中,孤子脉冲能量与光纤模场面积正相关,因此需要使用 LMAF 作为增益光纤。对基于 FWM 的 FOPA/FOPO 而言,可以提高增益光纤的非线性系数来获得更大的光参量放大增益。基于气体 SRS 的 FGRL 已经在全光纤结构下实现了瓦特级的连续波/脉冲激光输出,使用更低损耗的空芯光纤并优化其与实芯光纤之间的耦合效率,可以进一步提高转换效率与输出功率。在不同的技术方案中,使用更高功率泵浦源也是提高输出功率所必要的。目前 1.7 μm 波段光纤激光器中使用的泵浦源大多是 1 μm 或 1.5 μm 波段光纤激光器,这两种波段的高功率光纤激光器目前都已经比较成熟。

3) 实现更灵活的波长调谐。在 1.7 μm 波段掺杂光纤激光器中大多通过可调滤波器对输出波长进行调谐,不过调谐范围受到掺杂光纤增益带以及滤波器件性能的限制。基于 FWM 的 FOPA/FOPO 则是通过改变泵浦波长或腔长度来调谐输出波长,其波长可调谐很大,可以较方便地获得上百纳米的调谐范围,不过目前在 1.7 μm 波段只实现了可调谐的脉冲激光输出。基于 SSFS 的拉曼孤子光纤激光器则是通过改变泵浦功率对输出波长进行调谐,这导致调谐范围内输出功率波动较大,并且只能获得可调谐的脉冲激光。对于基于 SRS 的拉曼光纤激光器以及基于气体 SRS 的 FGRL 而言,两者都是通过改变泵浦波长实现对输出波长的调谐,并且输出波长的改变量会大于泵浦波长的改变量。尤其当拉曼频移系数较大时,通过小范围改变泵浦波长,可以实现大范围调谐的拉曼激光输出。因此,拉曼光纤激光器与 FGRL 在实现大范围调谐的连续波/脉冲 1.7 μm 波段激光输出方面具有很大的潜力。需要强调的是,与基于光纤非线性效应产生的可调谐激光相比,基于气体 SRS 的 FGRL 产生的可调谐激光可以实现更窄的线宽。

4) 获得更窄线宽。目前只在基于掺杂光纤的 1.7 μm 波段光纤激光器中实现了单频连续波激光输出。主要有以下几种方案,即基于线性腔中的 DFB 或 DBR 结构、基于环形腔中的多环法与饱和吸收体法。然而,由于 DFB 和 DBR 使用很短的腔长,所以增益光纤长度有限,导致输出功率很低,并且难以实现波长调谐。基于环形腔则可以使用较长的增益光纤从而获得更高的输出功率,同时可以进行波长调谐,但可能会出现跳模的现象。此外,使用窄带 FBG 进行滤波也是实现窄线宽激光输出的有效方法,不过难以进行波长调谐。目前关于窄线宽 1.7 μm 波段光纤激光器的研究大多集中在连续波领域,在脉冲领域的研究还较少。基于气体 SRS 的 FGRL 在连续波和脉冲领域均已实现了窄线宽 1.7 μm 波段激光输出,其输出激光线宽主要取决于 1.5 μm 波段泵浦源的线宽。目前 1.5 μm 波段窄线宽激光器已经比较成熟,可见 1.7 μm 波段 FGRL 在实现窄线宽输出方面有很大的潜力。

对于以上四点趋势,基于气体 SRS 的 FGRL 都可以同时满足,并且可适用于连续波或脉冲激光领域,因此 1.7 μm 波段 FGRL 具有很大的发展空间。相信随着对 1.7 μm 波段光纤激光器的深入研究与不断完善,将会促使其愈发成熟地满足各种应用场景,迎来更大的发展。

参 考 文 献

- [1] 张岩, 张鹏, 刘鹏, 等. 1.7 μm 波段光纤光源研究进展及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 090002.
Zhang Y, Zhang P, Liu P, et al. Fiber light source at 1.7 μm waveband and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 090002.
- [2] Alexander V V, Ke K, Xu Z, et al. Photothermolysis of sebaceous glands in human skin *ex vivo* with a 1,708 nm Raman fiber laser and contact cooling[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2011, 43(6): 470-480.
- [3] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, et al. Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(7): 2095-2099.
- [4] Li B, Zheng C T, Liu H F, et al. Development and measurement of a near-infrared CH₄ detection system using 1.654 μm wavelength-modulated diode laser and open reflective gas sensing probe[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 225: 188-198.
- [5] Horton N G, Xu C. Dispersion compensation in three-photon fluorescence microscopy at 1,700 nm[J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(4): 1392-1397.
- [6] Cheng H, Tong S, Deng X Q, et al. Deep-brain 2-photon fluorescence microscopy *in vivo* excited at the 1700 nm window[J]. Optics Letters, 2019, 44(17): 4432-4435.
- [7] Ishida S, Nishizawa N, Ohta T, et al. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography in 1.7 μm region with fiber laser supercontinuum in low-water-absorption

- samples[J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4(5): 052501.
- [8] Kawagoe H, Ishida S, Aramaki M, et al. Development of a high power supercontinuum source in the 1.7 μm wavelength region for highly penetrative ultrahigh-resolution optical coherence tomography[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(3): 932-943.
- [9] Li C, Shi J W, Gong X J, et al. 1.7 μm wavelength tunable gain-switched fiber laser and its application to spectroscopic photoacoustic imaging[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5849-5852.
- [10] Li C, Shi J W, Wang X T, et al. High-energy all-fiber gain-switched thulium-doped fiber laser for volumetric photoacoustic imaging of lipids[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(2): 160-164.
- [11] 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.
- [12] Yin Y C, Li J, Ren X M, et al. High-efficiency optical parametric chirped-pulse amplifier in BiB_3O_6 for generation of 3 mJ, two-cycle, carrier-envelope-phase-stable pulses at 1.7 μm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1142-1145.
- [13] Zhu H Y, Guo J H, Duan Y M, et al. Efficient 1.7 μm light source based on KTA-OPO derived by Nd:YVO₄ self-Raman laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 345-348.
- [14] Agger S, Povlsen J H, Varming P. Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13): 1503-1505.
- [15] Shen D Y, Sahu J K, Clarkson W A. High-power widely tunable Tm: fibre lasers pumped by an Er, Yb co-doped fibre laser at 1.6 μm [J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 6084-6090.
- [16] Shen D Y, Pearson L, Wang P, et al. Broadband Tm-doped superfluorescent fiber source with 11 W single-ended output power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11021-11026.
- [17] Tokurakawa M, Daniel J M O, Chenug C S, et al. Ultra-broadband wavelength-swept Tm-doped fiber laser using wavelength-combined gain stages[J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 471-476.
- [18] Daniel J M O, Simakov N, Tokurakawa M, et al. Ultra-short wavelength operation of a thulium fibre laser in the 1660-1750 nm wavelength band[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18269-18276.
- [19] Burns M D, Shardlow P C, Barua P, et al. 47 W continuous-wave 1726 nm thulium fiber laser core-pumped by an erbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5230-5233.
- [20] Quan Z, Gao C, Guo H, et al. 400 mW narrow-linewidth Tm-doped silica fiber laser output near 1750 nm with volume Bragg grating[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12034.
- [21] Xiao X S, Guo H T, Lu M, et al. Watts-level super-compact narrow-linewidth Tm-doped silica all-fiber laser near 1707 nm with fiber Bragg gratings[J]. *Laser Physics*, 2016, 26(11): 115103.
- [22] Xiao X S, Guo H T, Yan Z J, et al. 3 W narrow-linewidth ultra-short wavelength operation near 1707 nm in thulium-doped silica fiber laser with bidirectional pumping[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(4): 135.
- [23] He Z X, Zhang P, Wu D, et al. 1.7 μm Tm-doped continue-wave and pulse fibre laser using a modulated pump based on variable pulse generated mechanisms[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131: 106450.
- [24] Zhang J X, Sheng Q, Sun S, et al. 1.7- μm thulium fiber laser with all-fiber ring cavity[J]. *Optics Communications*, 2020, 457: 124627.
- [25] Zhang L, Zhang J X, Sheng Q, et al. Efficient multi-watt 1720 nm ring-cavity Tm-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37910-37918.
- [26] Zhang J X, Sheng Q, Zhang L, et al. Single-frequency 1.7- μm Tm-doped fiber laser with optical bistability of both power and longitudinal mode behavior[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 21409-21417.
- [27] Zhang L, Zhang J X, Sheng Q, et al. Watt-level 1.7- μm single-frequency thulium-doped fiber oscillator[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27048-27056.
- [28] Zhang L, Zhang J X, Sheng Q, et al. 1.7- μm Tm-doped fiber laser intracavity-pumped by an erbium/ytterbium-codoped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 25280-25289.
- [29] Cen X, Guan X C, Yang C S, et al. Short-wavelength, in-band-pumped single-frequency DBR Tm³⁺-doped germanate fiber laser at 1.7 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(7): 350-353.
- [30] Li C, Wei X M, Kong C H, et al. Fiber chirped pulse amplification of a short wavelength mode-locked thulium-doped fiber laser[J]. *APL Photonics*, 2017, 2(12): 121302.
- [31] Li C, Kong C H, Wong K K Y. High energy noise-like pulse generation from a mode-locked thulium-doped fiber laser at 1.7 μm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 19178252.
- [32] Chen J X, Li X Y, Li T J, et al. 1.7- μm dissipative soliton Tm-doped fiber laser[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 873-878.
- [33] Chen S X, Chen Y H, Liu K, et al. All-fiber short-wavelength tunable mode-locked fiber laser using normal dispersion thulium-doped fiber[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17570-17580.
- [34] Yamada M, Senda K, Tanaka T, et al. Tm³⁺-Tb³⁺-doped tunable fibre ring laser for 1700 nm wavelength region[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(20): 1287-1288.
- [35] Xue G H, Zhang B, Yin K, et al. Ultra-wideband all-fiber tunable Tm/Ho-co-doped laser at 2 μm [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25976-25983.
- [36] Firstov S, Alyshev S, Melkumov M, et al. Bismuth-doped optical fibers and fiber lasers for a spectral region of 1600-1800 nm[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(24): 6927-6930.
- [37] Firstov S V, Alyshev S V, Riumkin K E, et al. Watt-level, continuous-wave bismuth-doped all-fiber laser

- operating at 1.7 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4360-4363.
- [38] Noronen T, Firstov S, Dianov E, et al. 1700 nm dispersion managed mode-locked bismuth fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24876.
- [39] Noronen T, Okhotnikov O, Gumenyuk R. Electronically tunable thulium-holmium mode-locked fiber laser for the 1700-1800 nm wavelength band[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14703-14708.
- [40] Khagai A, Melkumov M, Riumkin K, et al. NALM-based bismuth-doped fiber laser at 1.7 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1127-1130.
- [41] Du T J, Ruan Q J, Yang R H, et al. 1.7- μm Tm/Ho-codoped all-fiber pulsed laser based on intermode-beating modulation technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(20): 4894-4899.
- [42] Svane A S, Rottwitz K K. PM Raman fiber laser at 1679 nm [C]//Advanced Photonics Congress, June 20, 2012, Colorado Springs, Colorado. Washington, D.C.: OSA, 2012: JTU5A.28.
- [43] Svane A S, Liu X M, Rottwitz K. Highly stable PM Raman fiber laser at 1680 nm[C]//CLEO: 2013, June 9-14, 2013, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2013: CW1M.6.
- [44] Liu J, Shen D Y, Huang H T, et al. High-power and highly efficient operation of wavelength-tunable Raman fiber lasers based on volume Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6605-6612.
- [45] Zhang P, Wu D, Du Q L, et al. 1.7 μm band narrow-linewidth tunable Raman fiber lasers pumped by spectrum-sliced amplified spontaneous emission[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(35): 9742-9748.
- [46] Zhang L, Dong J Y, Feng Y. High-power and high-order random Raman fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 17246523.
- [47] Dong J Y, Zhang L, Jiang H W, et al. High order cascaded Raman random fiber laser with high spectral purity[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5275-5280.
- [48] Thouroude R, Gilles H, Cadier B, et al. Linearly-polarized high-power Raman fiber lasers near 1670 nm[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(2): 025102.
- [49] Zhang Y, Song J X, Ye J, et al. Tunable random Raman fiber laser at 1.7 μm region with high spectral purity[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28800-28807.
- [50] Zhang Y, Xu J M, Ye J, et al. Cascaded telecom fiber enabled high-order random fiber laser beyond zero-dispersion wavelength[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(15): 4180-4183.
- [51] Grimes A, Hariharan A, Sun Y Z, et al. Hundred-watt CW and Joule level pulsed output from Raman fiber laser in 1.7- μm band[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 112601S.
- [52] Kuang Q Q, Zhan L, Gu Z C, et al. High-energy passively mode-locked Raman fiber laser pumped by a CW multimode laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(2): 391-395.
- [53] Yao W C, Chen B H, Zhang J N, et al. High-average-power operation of a pulsed Raman fiber amplifier at 1686 nm[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11007-11012.
- [54] Yin T C, Qi Z N, Chen F H, et al. High peak-power and narrow-linewidth all-fiber Raman nanosecond laser in 1.65 μm waveband[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7175-7181.
- [55] Wang K, Xu C. Wavelength-tunable high-energy soliton pulse generation from a large-mode-area fiber pumped by a time-lens source[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 942-944.
- [56] Wang K, Xu C. Tunable high-energy soliton pulse generation from a large-mode-area fiber and its application to third harmonic generation microscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(7): 071112.
- [57] Nguyen T N, Kieu K, Churin D, et al. High power soliton self-frequency shift with improved flatness ranging from 1.6 to 1.78 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(19): 1893-1896.
- [58] Fang X, Wang Z Q, Zhan L. Efficient generation of all-fiber femtosecond pulses at 1.7 μm via soliton self-frequency shift[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(4): 046107.
- [59] Zach A, Mohseni M, Polzer C, et al. All-fiber widely tunable ultrafast laser source for multimodal imaging in nonlinear microscopy[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5218-5221.
- [60] Becheker R, Tang M, Hanzard P H, et al. High-energy dissipative soliton-driven fiber optical parametric oscillator emitting at 1.7 μm [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(11): 115103.
- [61] Tang M C, Becheker R, Hanzard P H, et al. Low noise high-energy dissipative soliton erbium fiber laser for fiber optical parametric oscillator pumping[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2161-2175.
- [62] Qin Y K, Batjargal O, Cromey B, et al. All-fiber high-power 1700 nm femtosecond laser based on optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2317-2325.
- [63] Liao R Y, Song Y J, Zhou X K, et al. Ultra-flat supercontinuum generated from high-power, picosecond telecommunication fiber laser source[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(33): 9384-9388.
- [64] Chung H Y, Liu W, Cao Q, et al. Er-fiber laser enabled, energy scalable femtosecond source tunable from 1.3 to 1.7 μm [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15760-15771.
- [65] Zeng J J, Akosman A E, Sander M Y. Supercontinuum generation from a thulium ultrafast fiber laser in a high NA silica fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(22): 1787-1790.
- [66] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [67] Smith C M, Venkataraman N, Gallagher M T, et al. Low-loss hollow-core silica/air photonic bandgap fibre[J]. *Nature*, 2003, 424(6949): 657-659.
- [68] Couny F, Benabid F, Light P S. Large-pitch kagome-

- structured hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(24): 3574-3576.
- [69] Gérôme F, Jamier R, Auguste J L, et al. Simplified hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1157-1159.
- [70] Debord B, Amsanpally A, Chafer M, et al. Ultralow transmission loss in inhibited-coupling guiding hollow fibers[J]. *Optica*, 2017, 4(2): 209-217.
- [71] Sakr H, Chen Y, Jasion G T, et al. Hollow core optical fibres with comparable attenuation to silica fibres between 600 and 1100 nm[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 6030.
- [72] 丁俊杰, 王演祎, 张教, 等. W波段PS-PAM8信号在太赫兹空芯光纤中的有线传输[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2406003.
- Ding J J, Wang Y Y, Zhang J, et al. Wired transmission of PS-PAM8 signal at W-band over terahertz hollow-core fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2406003.
- [73] 姜寿林, 靳伟, 陈非凡, 等. 基于空芯光纤光热光谱技术的高灵敏度CO₂检测[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306004.
- Jiang S L, Jin W, Chen F F, et al. Carbon dioxide detection with high sensitivity based on photo-thermal spectroscopy in hollow-core optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306004.
- [74] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, et al. Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science*, 2002, 298(5592): 399-402.
- [75] Benabid F, Bouwmans G, Knight J C, et al. Ultrahigh efficiency laser wavelength conversion in a gas-filled hollow core photonic crystal fiber by pure stimulated rotational Raman scattering in molecular hydrogen[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(12): 123903.
- [76] Benabid F, Couny F, Knight J C, et al. Compact, stable and efficient all-fibre gas cells using hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2005, 434(7032): 488-491.
- [77] Couny F, Benabid F, Light P S. Subwatt threshold cw Raman fiber-gas laser based on H₂-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(14): 143903.
- [78] Couny F, Benabid F, Roberts P J, et al. Generation and photonic guidance of multi-octave optical-frequency combs[J]. *Science*, 2007, 318(5853): 1118-1121.
- [79] Russell P S J, Hölzer P, Chang W, et al. Hollow-core photonic crystal fibres for gas-based nonlinear optics[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4): 278-286.
- [80] Belli F, Abdolvand A, Chang W, et al. Vacuum-ultraviolet to infrared supercontinuum in hydrogen-filled photonic crystal fiber[J]. *Optica*, 2015, 2(4): 292-300.
- [81] Cao L, Gao S F, Peng Z G, et al. High peak power 2.8 μm Raman laser in a methane-filled negative-curvature fiber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5609-5615.
- [82] Astapovich M S, Gladyshev A V, Khudyakov M M, et al. Watt-level nanosecond 4.42-μm Raman laser based on silica fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 78-81.
- [83] Wang Y Z, Dasa M K, Adamu A I, et al. High pulse energy and quantum efficiency mid-infrared gas Raman fiber laser targeting CO₂ absorption at 4.2 μm[J]. 2020, 45(7): 1938-1941.
- [84] 王泽锋, 于飞, Wadsworth W J 等. 单程高增益 1.9 μm 光纤气体拉曼激光器[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0814004.
- Wang Z F, Yu F, Wadsworth W J, et al. Single-pass high-gain 1.9 μm optical fiber gas Raman laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0814004.
- [85] 陈育斌, 顾博, 王泽锋, 等. 1.5 μm 光纤气体拉曼激光光源[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0506002.
- Chen Y B, Gu B, Wang Z F, et al. 1.5 μm fiber gas Raman laser source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0506002.
- [86] 顾博, 陈育斌, 王泽锋. 基于空芯光纤中氢气级联 SRS 的红绿蓝色激光[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0806005.
- Gu B, Chen Y B, Wang Z F. Red, green and blue laser emissions from H₂-filled hollow-core fiber by stimulated Raman scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806005.
- [87] 陈育斌, 王泽锋, 顾博, 等. 1.5 μm 光纤乙烷气体拉曼激光放大器[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0514002.
- Chen Y B, Wang Z F, Gu B, et al. 1.5 μm fiber ethane gas Raman laser amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0514002.
- [88] 崔宇龙, 黄威, 周智越, 等. 基于空芯光子晶体光纤的单程高效氘气转动拉曼激光光源[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0214001.
- Cui Y L, Huang W, Zhou Z Y, et al. Single-pass high-efficiency rotational Raman laser source based on deuterium-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0214001.
- [89] 王泽锋, 黄威, 李智贤, 等. 光纤气体激光光源研究进展及展望 (I): 基于受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401008.
- Wang Z F, Huang W, Li Z X, et al. Progress and prospects of fiber gas laser sources (I): based on stimulated Raman scattering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401008.
- [90] 黄威, 崔宇龙, 李智贤, 等. 基于空芯光纤中氢气受激拉曼散射的 1.7 μm 光纤激光光源研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0514001.
- Huang W, Cui Y L, Li Z X, et al. Research on 1.7 μm fiber laser source based on stimulated Raman scattering of hydrogen in hollow-core fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0514001.
- [91] Huang W, Li Z X, Cui Y L, et al. Efficient, watt-level, tunable 1.7 μm fiber Raman laser in H₂-filled hollow-core fibers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 475-478.
- [92] Li H, Huang W, Cui Y L, et al. Pure rotational stimulated Raman scattering in H₂-filled hollow-core photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23881-23897.
- [93] Li H, Pei W X, Huang W, et al. Highly efficient nanosecond 1.7 μm fiber gas Raman laser by H₂-filled hollow-core photonic crystal fibers[J]. *Crystals*, 2020, 11

- (1): 32-42.
- [94] 李昊, 黄威, 裴闻喜, 等. 连续波 1.7 μm 全光纤气体拉曼激光光源[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0314001.
Li H, Huang W, Pei W X, et al. Continuous-wave 1.7 μm all-fiber gas Raman laser source[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0314001.
- [95] Pei W X, Li H, Huang W, et al. All-fiber tunable pulsed 1.7 μm fiber lasers based on stimulated Raman scattering of hydrogen molecules in hollow-core fibers[J]. Molecules, 2021, 26(15): 4561.
- [96] Pei W X, Li H, Huang W, et al. All-fiber gas Raman laser by D_2 -filled hollow-core photonic crystal fibers[J]. Photonics, 2021, 8(9): 382.
- [97] Li H, Huang W, Pei W X, et al. All-fiber gas Raman laser oscillator[J]. Optics Letters, 2021, 46(20): 5208-5211.
- [98] Pei W X, Li H, Huang W, et al. Pulsed fiber laser oscillator at 1.7 μm by stimulated Raman scattering in H_2 -filled hollow-core photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 33915-33925.
- [99] Cui Y L, Huang W, Li Z X, et al. High-efficiency laser wavelength conversion in deuterium-filled hollow-core photonic crystal fiber by rotational stimulated Raman scattering[J]. Optics Express, 2019, 27(21): 30396-30404.
- [100] Li H, Huang W, Cui Y L, et al. 3 W tunable 1.65 μm fiber gas Raman laser in D_2 -filled hollow-core photonic crystal fibers[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106474.