

文章编号: 1001-3806(2023)02-0154-17

1.7 μm 波段光纤激光技术研究进展及应用

宁雨竹^{1,2}, 张鹏^{1,2,3*}, 何爽^{1,2}, 李奇^{1,2}, 范云龙^{1,2}, 刘洋^{1,2}, 韩科选⁴

(1. 长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 长春 130022; 2. 长春理工大学光电工程学院, 长春 130022; 3. 长春理工大学电子信息工程学院, 长春 130022; 4. 长春理工大学材料科学与工程学院, 长春 130022)

摘要: 1.7 μm 波段有许多分子吸收线, 位于活体组织的透明窗口中。该波段激光源在材料加工、中红外激光产生、气体检测、医疗手术和生物成像等领域有着重要的应用, 受到国内外研究者的重视, 并取得了一些研究成果。总结了国内外 1.7 μm 波段激光器的研究进展及相关应用, 介绍了长春理工大学在该领域的工作。尽管现有的研究和应用仍面临着一些问题, 但随着相关技术的不断提高, 1.7 μm 波段高性能光纤激光器必将得到快速的发展。

关键词: 激光光学; 1.7 μm 波段; 连续光纤激光器; 脉冲光纤激光器; 激光应用

中图分类号: TN248; TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.02.002

Progress and applications of 1.7 μm waveband fiber laser

NING Yuzhu^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2,3}, HE Shuang^{1,2}, LI Qi^{1,2}, FAN Yunlong^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, HAN Kexuan⁴

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. College of Electrical Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: 1.7 μm waveband covers many molecular absorption lines and is located in the transparent window of living tissue. This band laser source has important applications in material processing, mid infrared laser generation, gas detection, medical surgery, and biological imaging. The research progress and the related applications of 1.7 μm waveband laser were summarized at home and abroad in this paper, and the work of Changchun University of Science and Technology in this field was introduced. Although the research and application of 1.7 μm waveband fiber laser still face a series of problems, it is reasonable to believe that with the continuous improvement of the related technologies, 1.7 μm waveband high-performance fiber laser will develop rapidly.

Key words: laser optics; 1.7 μm waveband; continuous fiber laser; pulsed fiber laser; laser application

引言

短波红外光纤激光器因其光束质量好、转换效率高、结构紧凑且高度稳定等特点, 在通信、传感、激光加工等领域取得了丰硕的成果^[1-4]。1.7 μm 波段 (1.6 μm ~1.8 μm) 被认为是优良的激光源, 由于该波段覆盖了 C—H 共价键及多种有机物的吸收峰^[5], 被

广泛应用于含有大量 C—H 键的有机物检测, 如甲烷浓度的检测、一氧化氮和乙醇等化工原料的检测、聚合物的焊接加工等^[6-8]; 该波段处于水分子 2 个吸收峰之间的低谷^[9], 所以对含有大量水分子的生物组织而言, 水的低吸收导致该波段入射光能量损耗相对较低^[10]; 该波段同样处于脂质的吸收高峰^[9], 而脂类是人体内重要的内源性物质, 是鉴别致命的慢性疾病如动脉粥样硬化和心肌梗死的主要对比剂, 因此, 1.7 μm 波段被广泛应用于医疗和生物成像^[11-16], 如对富含脂质样品的多光子荧光显微成像 (multi-photon fluorescence microscope, MFLM)^[17]、光声显微成像 (photoacoustic microscopy, PAM)^[18]、光学相干层析成像 (optical coherence tomography, OCT)^[11] 等。此外, 由

基金项目: 吉林省教育厅基金资助项目 (JJKH20200752KJ); 吉林省科技厅优秀青年人才基金资助项目 (20170520161JH)

作者简介: 宁雨竹 (1999-), 女, 硕士研究生, 现主要从事关于 1.7 μm 波段光纤激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhangpeng@cust.edu.cn

收稿日期: 2022-03-07; 收到修改稿日期: 2022-08-08

于 2 μm ~5 μm 波段中红外激光在激光加工和激光通信等方面发展迅速,1.7 μm 波段高能抽运源同样受到了国内外研究者的广泛关注。因此,1.7 μm 波段光源备受瞩目,具有十分广阔的发展前景。

目前,国内外实现 1.7 μm 激光输出主要有以下 3 种方法^[19]:(1)基于传统掺铥光纤。通过抽运掺铥光纤(thulium-doped fiber, TDF)或铥铟共掺光纤(Tm-Ho-codoped fiber, THDF),利用布喇格光栅,单模-多模-单模等进行滤波得到 1.7 μm 波段激光;(2)基于特殊掺杂光纤。通过抽运掺铋光纤(Bi-doped fiber, BDF)或铋铥共掺光纤直接得到 1.7 μm 波段激光输出;(3)基于非线性效应。通过受激喇曼散射和光学参量振荡等非线性效应将其它波段的光非线性频移到 1.7 μm 波段。值得一提的是,通过抽运空心光纤得到 1.7 μm 波段激光输出区别于抽运传统非线性实心光纤产生喇曼频移的一种新的高效手段。方法(1)的商用 TDF 由于研制较为成功、价格相对低廉、方便获取,全光纤 TDF 激光器发展较为全面,研究较为深刻,但是仍旧存在不足,如铥离子在 1.7 μm 波段增益较低,经过滤波器滤波后功率和斜效率受限;方法(2)虽然可以摒弃滤波器直接得到 1.7 μm 激光输出,但特殊掺杂离子光纤价格昂贵,获取不易,刚处于起步阶段鲜有研究;方法(3)由于低转换效率、低喇曼增益和复杂的器件结构,限制了喇曼光纤激光器的发展,抽运充气空心光纤虽然能得到高效激光输出,但由于光纤气密性不佳,会造成一定损耗且输出不稳定,实用性不佳,仍在实验室研究阶段。

2016 年,长春理工大学 ZHANG 等人总结了关于 1.7 μm 波段光源的研究进展^[19]。2022 年,国防科技大学讨论了 1.7 μm 波段激光产生技术方案的特点,着重报道了基于空芯光纤的气体喇曼激光技术^[20]。华南师范大学综述了近期 1.7 μm 波段超快光纤激光器的研究进展^[21]。经过近几年的发展,1.7 μm 波段光源有了新的产生方案,且在输出功率、转换效率、脉冲宽度、脉冲能量以及应用研究等各个方面均已取得突破性进展。本文中详细阐述了国内外 1.7 μm 波段光纤激光器近 5 年来的研究进展及应用研究,以及长春理工大学在该领域的工作,包括 1.7 μm 波段宽带光源、1.7 μm 波段光纤激光器,以及 1.7 μm 波段光源相关应用,并根据研究现状合理展望了 1.7 μm 波段光纤光源未来的发展前景。

1 1.7 μm 波段光纤激光器国外研究现状

1.1 1.7 μm 波段连续光纤激光器

2004 年,丹麦技术大学 AGGER 等人首次抽运掺铥光纤得到 1735 nm 单频激光输出^[22]。近 10 年来,1.7 μm 波段激光器在性能及应用方面得到了突飞猛进的发展,逐渐成为国际研究热点。除光纤激光器外,1.7 μm 波段非光纤激光器^[23-25]、1.7 μm 波段放大器^[26-30]及宽带光源^[31-32]同样取得了一定成果。

1.1.1 基于抽运掺铥光纤的连续光纤激光器 目前,抽运掺铥离子光纤是实现 1.7 μm 波段激光最常见的手段,但掺铥光纤在 1.65 μm ~1.8 μm 短波工作表现出强烈的三能级行为^[33],需要高粒子数反转才能达到激光阈值,且需要一种合适的波长选择技术来抑制发射峰处的激光^[34-36]。近 5 年来,该波段激光器在效率和输出上均得到了一定程度的提升。2018 年,PARK 等人采用 1565 nm 连续激光器抽运 1.3 m 长的铥铟共掺光纤且通过布喇格光纤光栅进行滤波,实现了平均功率达到百毫瓦、且斜率效率为 23%、中心波长 1706.3 nm 的连续激光输出^[37]。2019 年,BURNS 等人通过对掺铥光纤进行纤芯抽运得到斜率效率高达 80%,证明了掺铥光纤激光器在 1726 nm 下的高功率短波长工作^[38]。实验结构和结果如图 1 所示。

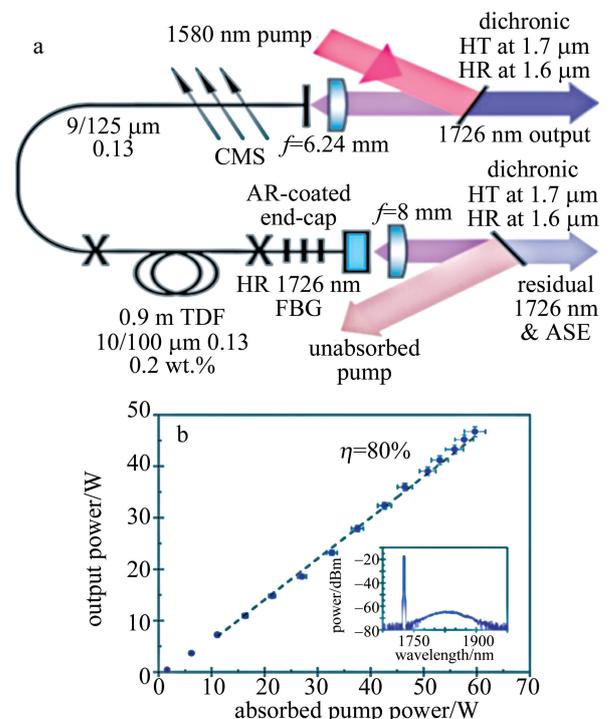


图 1 掺铥光纤激光器结构及实验结果^[38]

a—实验装置 b—斜率效率

Fig. 1 Structure and experimental results of the Tm-doped fiber laser^[38]
a—experimental setup b—slope efficiency

1.1.2 基于抽运掺铋光纤的连续光纤激光器 2015 年,俄罗斯科学院用掺铋的高锗光纤研制了波长为 1.7 μm 的连续波区的瓦级全光纤激光器^[39],且报道了掺铋光纤和光纤激光器在 1600 nm~1800 nm 光谱范围内发展的最新结果^[40]。2018 年, FIRSTOV 等人总结了光谱范围在 1600 nm~1800 nm 的掺铋光纤激光器^[41]。2019 年,麦吉尔大学 NEMOVA 等人对工作在 1.7 μm 波长范围内的双波长级联腔掺铋光纤激光器进行了全面的理论研究,通过级联两个反射率不高的光纤布喇格光栅(其中一个峰值反射率为 95%的,以 1.725 μm 为中心;第 2 个峰值反射率为 90%,以 1.729 μm 为中心)实现了双波长连续激光输出^[42]。实验结构和结果如图 2 所示。

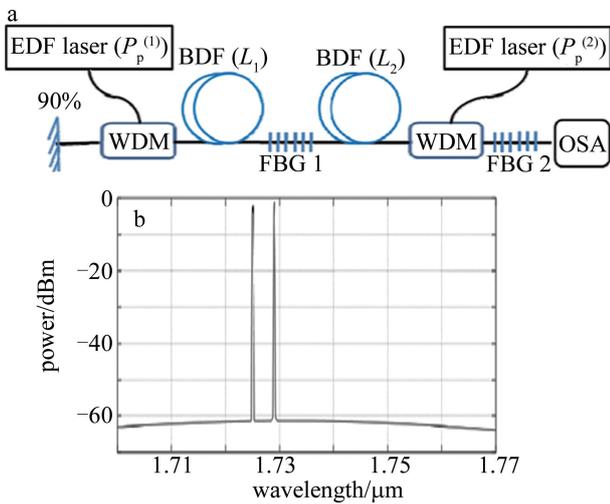


图 2 掺铋光纤激光器结构及实验结果^[42]

Fig. 2 Structure and experimental results of the Bi-doped fiber laser^[42]

1.1.3 基于非线性效应的连续光纤激光器 非线性效应也是产生 1.7 μm 波段光输出的有效手段,通过基于受激喇曼散射及孤子自频移等方法可突破抽运掺杂稀土光纤受到波长限制这一问题,获得任意波长的激光输出。2019 年, THOUROUDE 等人通过抽运单模光纤,实现了在 1650 nm~1680 nm 的光谱范围喇曼光纤激光器(Raman fiber laser, RFL)光源,最大输出功率可达 6.25 W^[43]。同年, THOUROUDE 等人展示了一种在 1540 nm 处抽运掺铟光纤的 1 阶随机喇曼光纤激光器^[44],在 1650 nm 处的最高输出功率为 9.2 W,转换效率为 74%。实验结果如图 3 所示。

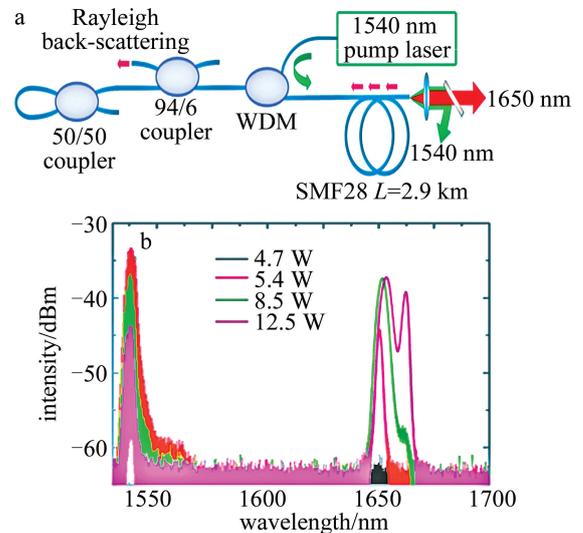


图 3 喇曼光纤激光器结构及实验结果^[44]

Fig. 3 Structure and experimental results of Raman fiber laser^[44]

表 1 为国外 1.7 μm 波段连续光纤激光器研究进展。

表 1 国外 1.7 μm 波段连续光纤激光器研究进展

Table 1 Research progress in foreign 1.7 μm band continuous fiber laser

技术手段	抽运波长/nm	输出波长/nm	输出功率/mW	效率/%	激光腔型	年份	国家	参考文献
THDF	1565	1706.3	249	23	线性腔	2018	韩国	[37]
TDF	1580	1726	47000	80	线性腔	2019	英国	[38]
BDF	915	1705	1050	33	线性腔	2018	俄罗斯	[41]
BDF	1550	1725, 1729	0.6, 1.1	—	线性腔	2019	加拿大	[42]
非线性效应	1532~1560	1655, 1679	6250, 5000	—	—	2019	法国	[43]
非线性效应	1540	1650	9250	—	—	2019	法国	[44]

1.2 1.7 μm 波段脉冲光纤激光器

1.7 μm 波段脉冲光纤激光器随着 1.7 μm 波段连续光纤激光器的不断成熟,同样得到了快速发展,取得一定成果。光纤激光器产生超短脉冲的机理有两种: Q 开关^[45-46]和锁模^[47-49]。Q 开关技术产生的脉宽通常为纳秒级,而锁模技术产生的脉宽可达到飞秒级。早在 2013 年,美国亚利桑那大学 NGUYEN 等人通过抽

运大模场晶体光纤实现了可调谐范围为 1600 nm ~ 1780 nm、脉冲宽度为 100 fs 的 1.7 μm 波段脉冲激光器^[50]。

1.2.1 基于非线性偏振旋转锁模的脉冲光纤激光器 2016 年, NORONEN 等人研制了 1705 nm~1805 nm 的可调谐谐波锁模激光器^[51],该光源利用铥钛共掺光纤作为增益元件,利用频移反馈和非线性偏转技术(non-

linear polarization rotation, NPR), 在 1735 nm 处获得宽度为 630 fs 的最短脉冲。2017 年, 汉堡大学 CHUNG 等人基于 NPR 技术在 31 MHz 重复频率下运行自制 5 W 掺铒光纤激光器^[52], 获得了可在 1.3 μm~1.7 μm 范围内连续调谐的飞秒脉冲, 脉冲能量大于 4.5 nJ。

1.2.2 基于非线性放大环形镜锁模的脉冲光纤激光器 2018 年, 俄罗斯科学院 KHEGAI 等人设计了 1.7 μm 波段带有非线性放大环镜 (nonlinear amplifying loop mirror, NALM) 的 8 型腔激光器^[53], 在重复频率为 3.57 MHz 下, 产生宽度为 17 ps、能量为 84 pJ 的脉冲。实验结构和结果如图 4 所示。

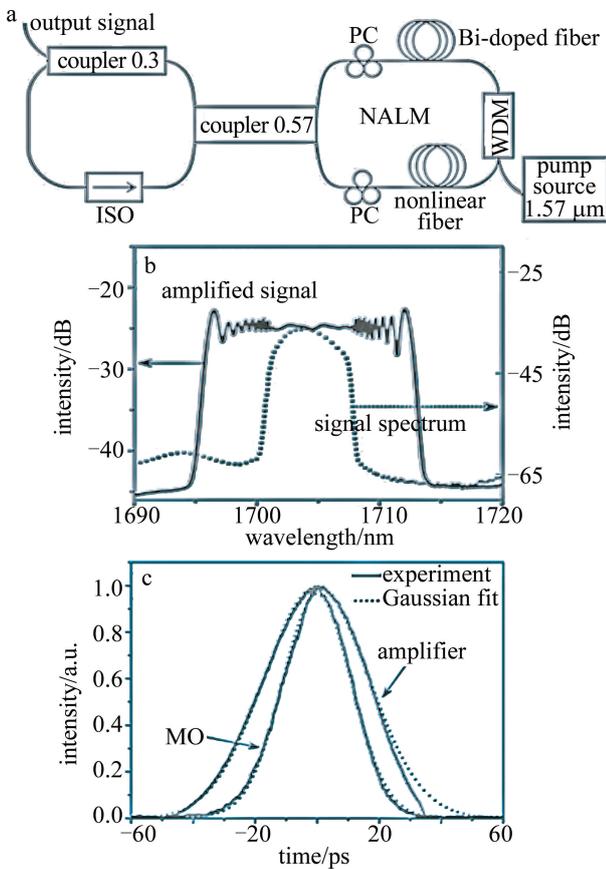


图 4 脉冲激光器结构及实验结果^[53]

Fig. 4 Pulse laser structure and experimental results^[53]

2021 年, 新加坡南洋理工大学 CHEN 等人提出了一种 W 型掺铥光纤 1.7 μm 波段高能飞秒脉冲激光器^[54], 在 1.7 μm~1.8 μm 区域获得 174 fs 的稳定脉冲, 脉冲能量最高为 128 nJ。

1.2.3 基于非线性效应的脉冲光纤激光器 2019 年, 法国萨克雷大学通过抽运非线性光纤产生了从 1700 nm~2050 nm 连续可调谐飞秒脉冲, 实现了脉冲宽度在 150 fs 以下, 转换率大于 50%、全光纤保偏可调谐脉冲激光器^[55]。

2020 年, GRIMES 等人演示了工作在 1.7 μm 波段的级联喇曼光纤激光器^[56], 在 1692 nm 实现了功率高达 104 W 的连续激光输出, 激光器产生的喇曼激光脉冲范围从 11.5 mJ (脉冲宽度为 100 μs)~10 J (脉冲宽度为 100 ms), 平均功率高达 23 W。

1.2.4 基于半导体可饱和吸收镜的脉冲光纤激光器 2020 年, 新加坡南洋理工大学 CHEN 等人利用半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) 实现了中心波长为 1755 nm 的高能脉冲激光器^[57], 峰值功率输出为 12.1 kW, 测量脉冲宽度为 2.76 ps, 能量为 32.7 nJ。实验结构和结果如图 5 所示。

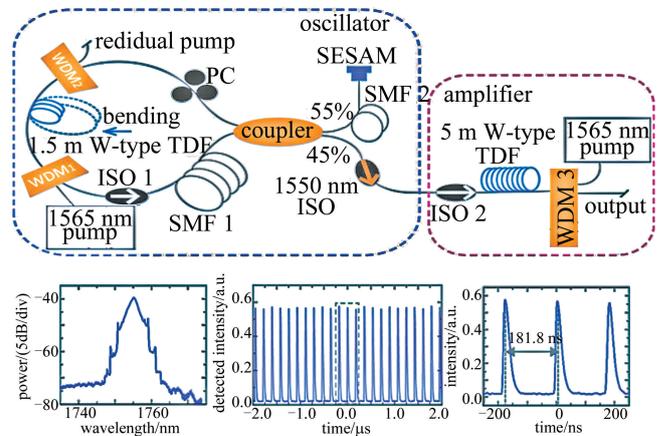


图 5 掺铥光纤脉冲激光器结构及实验结果^[57]

Fig. 5 Structure and experimental results of Tm-doped fiber laser^[57]

表 2 为国外 1.7 μm 波段脉冲激光器研究进展。

表 2 国外 1.7 μm 波段脉冲激光器研究进展

Table 2 Research progress in foreign 1.7 μm band pulse laser

抽运波长/nm	重复频率/MHz	输出波长/nm	脉冲产生方式	脉冲能量	脉宽	年份	国家	参考文献
1556	232.6~554.6	1735	NPR	21 pJ	630 fs	2016	芬兰	[51]
1030	31	1300~1700	NPR	10.6 nJ	85 fs	2017	德国	[52]
1157	3.57	1700	NALM	84 pJ	17 ps	2018	俄罗斯	[53]
1570	7.82	1785	NALM	128 nJ	174 fs	2020	新加坡	[54]
976	40	1700~2050	非线性效应	1 nJ	150 fs	2019	法国	[55]
1117	—	1700	非线性效应	11.5 mJ~10 J	100 μs~100 ms	2020	丹麦	[56]
1565	5.5	1755	SESAM	32.7 nJ	2.76 ps	2021	新加坡	[57]

2 1.7 μm 波段光纤激光器国内研究现状

2.1 1.7 μm 波段连续光纤激光器

2.1.1 基于抽运掺铥光纤的连续光纤激光器 2015年,国防科技大学 XUE 等人通过抽运铥钬共掺光纤实现可调谐波长范围为 1727 nm~2030 nm 的环形光纤激光器^[58],由于腔内没有波长限制,其可调谐范围达到 300 nm,是迄今为止报道的全光纤稀土掺杂激光器的最宽调谐范围。实验结构和结果如图 6 所示。

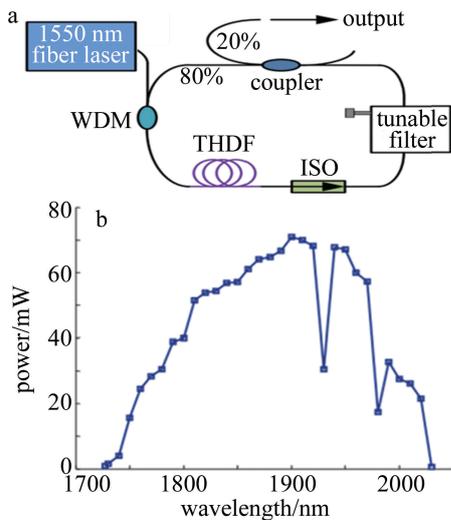


图 6 铥钬共掺激光器结构及实验结果^[58]

Fig. 6 Structure and experimental results of the Tm/Ho doped laser^[58]

2017年,中国科学院西安光学精密机械研究所设计了一种基于双向抽运和光纤布喇格光栅的线形腔连续激光器^[59],其输出波长为 1706.75 nm,功率为 3.15 W。天津大学学者在 1.7 μm 波段激光器方面也做了一些研究;2020年,ZHANG J X 等人搭建了 1.7 μm 波段全光纤激光器,采用 1570 nm 激光器抽运掺铥光纤,并通过波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM)和单模-多模-单模等结构抑制掺铥光纤的长波增益,获得了 1720 nm 激光输出^[60];ZHANG L 等人建立了一种环形腔结构的全光纤激光器^[61],利用布喇格光纤光栅进行滤波,在 6 W 发射抽运下,实现了中心波长为 1720 nm、功率为 2.36 W 激光输出,实验结构和结果如图 7 所示;2021年,ZHANG J X 等人通过抽运掺铥光纤实现了首个有效 1.7 μm 波段单频光纤激光器^[62],输出功率达到 407 mW;同年,ZHANG L 课题组证明了一种高效的高功率单频掺铥光纤环形激光器^[63],工作波长为 1720 nm,通过加入光纤布喇格光栅,实现了单纵模工作,在 3.75 W 发射抽运功率下,最大单频输出功率可达 1.11 W,斜率效率为 46.4%;

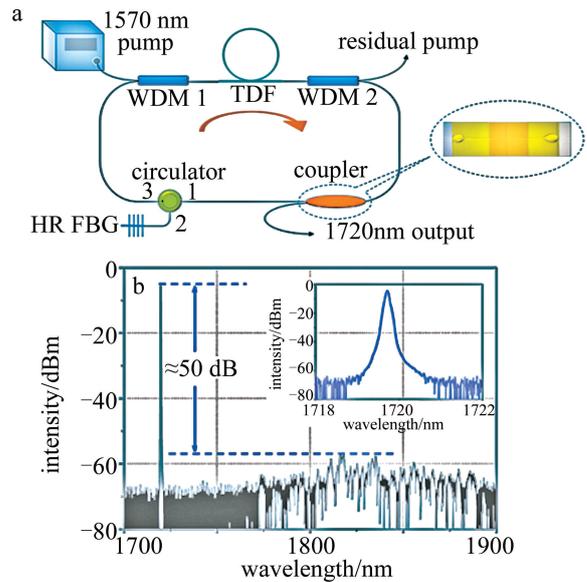


图 7 掺铥光纤激光器结构及实验结果^[61]

Fig. 7 Structure and experimental results of the Tm-doped laser^[61]

该课题组还介绍了一种有效的 1.7 μm 掺铥光纤激光器^[64],实现了双向抽运,并且开发了一个速率方程模型以优化光纤长度和输出耦合,实验在抽运功率为 10 W 的情况下,获得了中心波长为 1720 nm、最大输出功率为 1.13 W 的激光输出。2021年,华南理工大学 CEN 等人对 1.7 μm 波段的短波长分布布喇格反射(distribution Bragg reflector, DBR)单频光纤激光器进行了实验研究^[65],实现了工作波长为 1727 nm、信噪比大于 60 dB 稳定的单纵模激光输出。

2.1.2 基于非线性效应的连续光纤激光器 2019年,国防科技大学 ZHANG 等人实现了一种 1.7 μm 波段可调谐随机喇曼光纤激光器^[66],实验通过利用

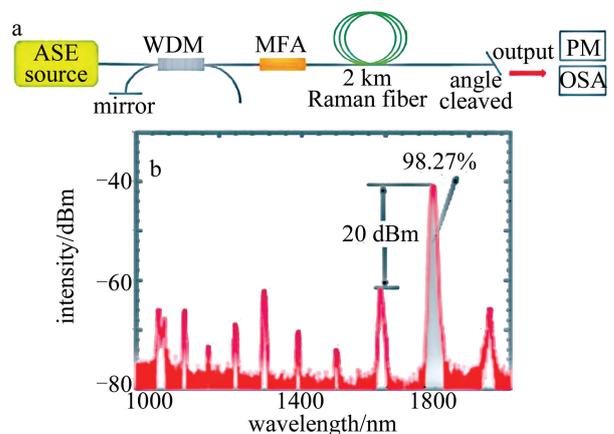


图 8 可调谐级联随机喇曼光纤激光器结构及实验结果^[66]

Fig. 8 Structure and experimental results of tunable cascaded random Raman fiber laser^[66]

1550 nm 的自发放大辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 光抽运喇曼光纤得到波长为 1715 nm、输出功率为 14.5 W, 且光谱纯度达到 98% 的激光输出。实

验结构和结果如图 8 所示。

表 3 为国内 1.7 μm 波段连续光纤激光器研究进展。

表 3 国内 1.7 μm 波段连续光纤激光器研究进展

Table 3 Research progress in domestic 1.7 μm band continuous fiber laser

技术手段	抽运波长/nm	输出波长/nm	输出功率/W	效率/%	激光腔型	机构	年份	参考文献
THDF	1550	1727~2030	0.408	42.6	环形腔	国防科技大学	2015	[58]
TDF	1550	1706.75	3.15	42.1	线性腔	西安光机所	2017	[59]
TDF	1570	1720	0.121	5.7	环形腔	天津大学	2020	[60]
TDF	1570	1720	2.36	50.2	环形腔	天津大学	2020	[61]
TDF	1570	1720	0.407	22.7	环形腔	天津大学	2020	[62]
TDF	1570	1720	1.11	46.4	环形腔	天津大学	2020	[63]
TDF	976	1720	1.13	13.5	线性腔	天津大学	2020	[64]
TGF	1610	1727	0.0124	4.81	线性腔	华南理工大学	2021	[65]
非线性效应	1550	1715	14.5	—	线性腔	国防科技大学	2021	[66]

2.2 1.7 μm 波段脉冲光纤激光器

2.2.1 基于非线性效应的脉冲光纤激光器 2017 年,上海交通大学 FANG 等人基于抽运色散位移光纤 (dispersion shifted fiber, DSF) 产生 1.7 μm 波段的超短脉冲^[67],通过优化 DSF 长度,在 1.70 μm~1.74 μm 范围内实现了低于 200 fs 的脉冲,转换效率为 76%,最大输出功率为 26.8 mW,单脉冲能量可达 0.7 nJ。2021 年,国防科技大学 PEI 等人首次证明了一种具有全光纤结构的可调谐脉冲 1.7 μm 波段光纤喇曼激光器^[68],通过抽运 9 m 充氢气(H₂)的空心晶体光纤(hollow core photonic crystal fiber, HC-PCF)获得输出功率为 1.63 W 的 1.7 μm 波段激光发射。LI 等人通过抽运 9 m 长的充 H₂ 的 HC-PCF,得到中心波长为 1705 nm、功率为 3.3 W、调谐范围为 1693 nm~1705 nm 的输出,且仿真结果与实验结果相符,实现了重复频率为 1.3 MHz、脉冲宽度约为 15 ns、斜率效率为 84% 的脉冲光纤激光器^[69],结构和实验结果如图 9 所示。2021 年,PEI 等人通过优化实验结构实现了 1.7 μm 脉冲光纤气体喇曼激光振荡器^[70],当重复频率为 6 MHz、脉宽为 30 ns 时,在 1693 nm 处获得了 1.5 W 的最大喇曼功率。

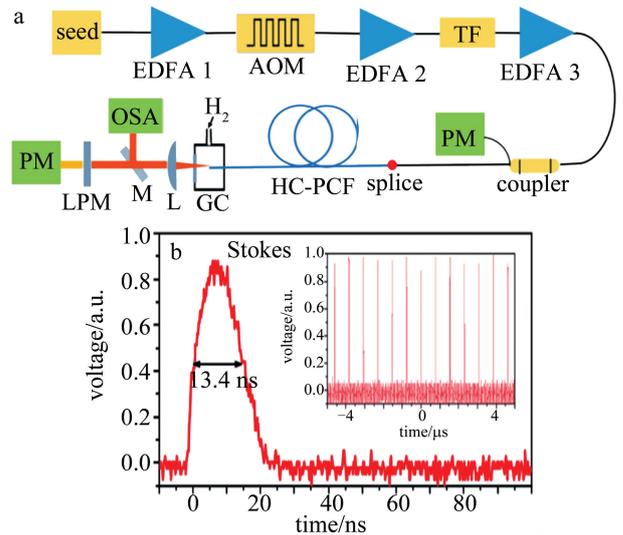


图 9 空心光纤的 1.7 μm 波段激光结构及实验结果^[69]

Fig. 9 1.7 μm laser based on HC-PCF structure and experimental results^[69]

2.2.2 基于非线性偏振旋转锁模的脉冲光纤激光器 2021 年,华南师范大学 CHEN 等人通过抽运 3.3 m 掺铥光纤,利用 NPR 技术实现中心波长位于 1746 nm, 10 dB 光谱宽度约为 17 nm、重复频率为 17.84 MHz、输出功率为 3.55 mW、脉冲宽度为 3.9 ps 的脉冲光纤

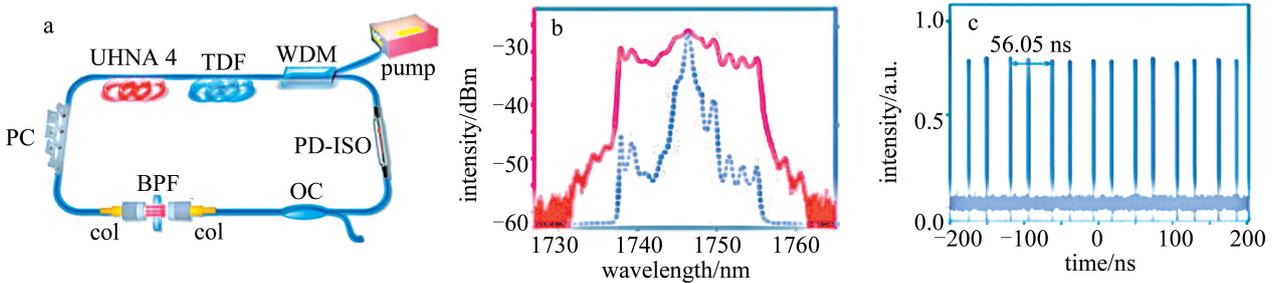


图 10 1.7 μm 波段掺铥光纤脉冲激光器结构及实验结果^[71]

Fig. 10 1.7 μm Tm-doped pulsed laser structure and experimental results^[71]

激光器^[71]。结构和实验结果如图 10 所示。

2.2.3 基于模间拍频锁模的脉冲光纤激光器 2018 年,厦门大学 DU 等人演示了基于新型模间拍频调制 (intermode-beating modulation, IM) 技术,利用抽运 THDF 的 1.7 μm 波段光纤脉冲激光器^[72],其中心波长为 1781.5 nm,3 dB 线宽为 1.5 nm,当重复频率为 145 kHz 时,最小脉冲宽度为 1.4 s,输出功率为 3.4 mW。

2.2.4 基于非线性放大环镜锁模的脉冲光纤激光器 2020 年,西北大学的 HE 实现了 1.7 μm 波段全保偏飞秒光纤激光输出^[73],其平均功率为 35 mW,中心波长为 1.7 μm,脉冲宽度为 368 fs,光光转换效率为 66%。实验结构和结果如图 11 所示。

表 4 为国内 1.7 μm 波段脉冲光纤激光器的研究进展。

表 4 国内 1.7 μm 波段脉冲光纤激光器研究进展

Table 4 Research progress in 1.7 μm band pulse fiber laser in China

抽运波长/nm	重复频率/MHz	输出波长/nm	脉冲产生方式	脉宽	输出功率/mW	年份	机构	参考文献
1600	38.8	1700~1740	非线性效应	200 fs	26.8	2017	上海交通大学	[67]
1540~1550	1	1693~1705	非线性效应	10 ns	1630	2021	国防科技大学	[68]
1540~1550	1.3	1693~1705	非线性效应	13 ns	3300	2021	国防科技大学	[69]
1540	6	1693	非线性效应	30 ns	1500	2021	国防科技大学	[70]
1560	17.84	1746	NPR	3.9 ps	3.55	2021	华南师范大学	[71]
1211	0.154	1781.5	IM	1.4 μs	3.4	2018	厦门大学	[72]
1560	102	1700	NALM	368 fs	35	2020	西北大学	[73]

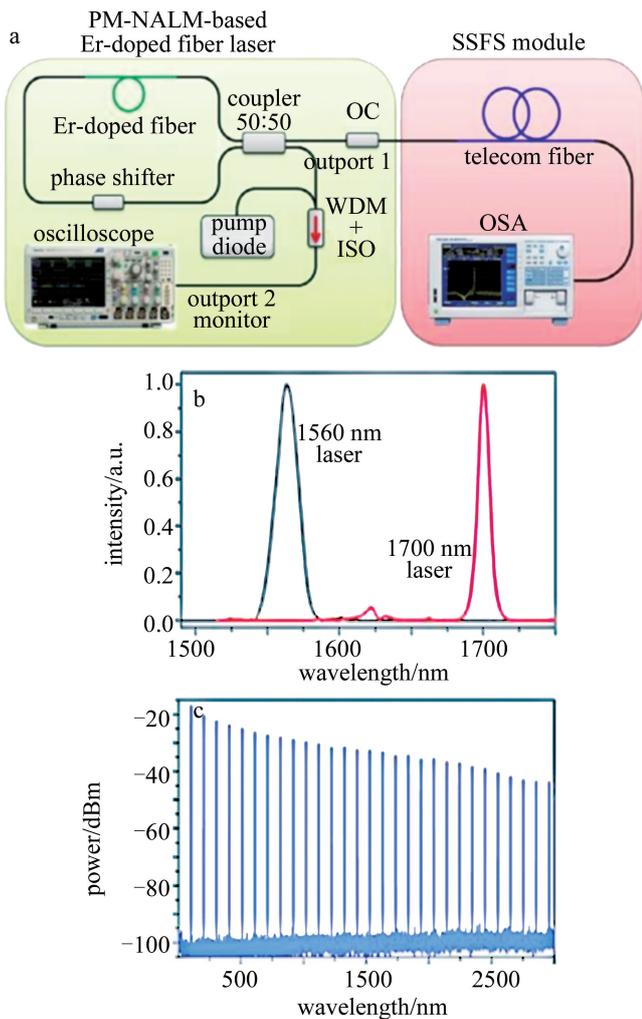


图 11 1.7 μm 全光纤脉冲激光器结构及实验结果^[73]

Fig. 11 1.7 μm full fiber pulse laser structure and experimental results^[73]

3 1.7 μm 波段激光器的应用

由于 1.7 μm 波段位于脂肪的吸收峰并处于水的低吸收区,因此对富含脂肪的组织有着重要的靶向作用,1.7 μm 波段光源常被用作对脂质成像的光源,脂肪和水的红外光谱如图 12 所示。该波段同样覆盖了 C—H 共价键的吸收峰,也被用作气体检测、有机聚合物加工、原子分子探测等,其中部分聚合物的红外光谱

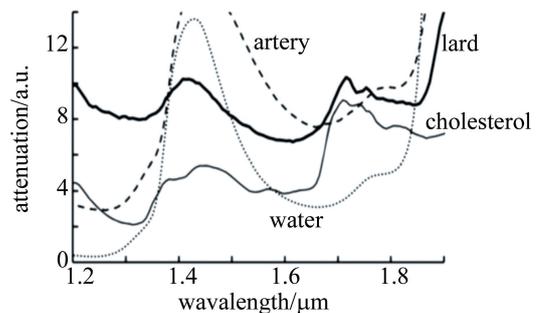


图 12 脂肪及水的红外吸收光谱图^[9]

Fig. 12 Infrared absorption spectrogram of fat and water^[9]

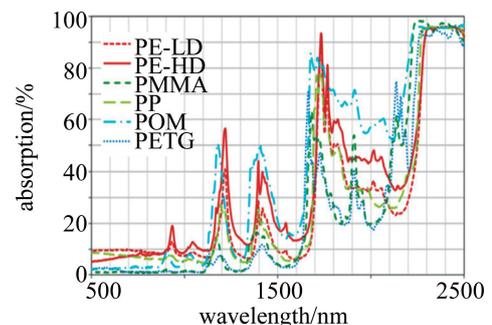


图 13 聚合物样品的吸收曲线图^[5]

Fig. 13 Absorption plot of the polymer sample^[5]

如图 13 所示。除了在该波长范围内直接应用光源外,短波长 TDF 还可以通过抽运掺镨氟化物,得到长波长的中红外激光($4.2\ \mu\text{m}\sim 4.7\ \mu\text{m}$)输出^[74-84]。另外,随着现有的通信波段日趋饱和,1.7 μm 波段也会在通信领域大放异彩^[76-78]。

3.1 应用于有机物检测

2016 年,法国里昂大学 ANSELMO 等人利用 1.7 μm 波段光学相似吸收光谱检测甲烷浓度^[79]。2017 年,ZHU 等人利用中心发射波长为 1.7 μm 的 DFB 激光器作为光源,研制出高效在线氯化氢(HCl)检测装置^[80]。2018 年,大阪府立大学 TANO 等人利用多模 1.7 μm 激光系统对酒精浓度进行了评估,证实了其有效性^[81]。实验结构和结果如图 14 所示。

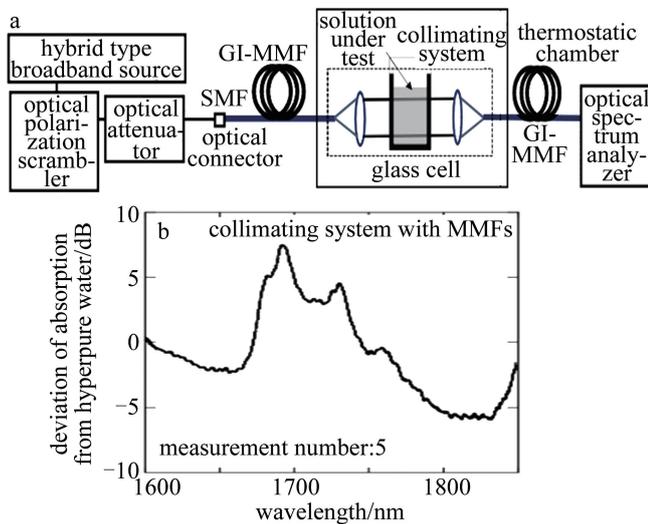


图 14 测量酒精浓度实验结构及结果^[81]

Fig. 14 Structure and results of measuring alcohol concentration^[81]

3.2 应用于中红外激光抽运

2018 年,瑞士电子技术中心 VIZBARAS 等人报道了基于 I 型碲化镓(GaSb)增益芯片技术的宽调谐扫描波长激光器的最新进展^[82],为 1.7 $\mu\text{m}\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 范围激光的发展奠定了新的技术基础。同年,麦考瑞大学 MAJEWSKI 等人用 1.7 μm 喇曼光纤激光器抽运具有 573 nm 连续可调谐输出范围的中红外掺镨氟化物光纤激光器^[83]。2020 年,中国工程物理研究院 QU 等人利用 1.7 μm 和 2.3 μm 双波长抽运掺镨(Dy)氟化铟(InF₃)光纤去除自终止效应,并实现 4.3 μm 波段中红外激光输出^[84],实验结构如图 15 所示。2019 年,普罗霍罗夫综合物理研究所 DOROSHENKO 等人利用光谱为 1735 nm 的掺铒氟化钪锂晶体(YLF:Er)激光器作抽运源实现了 4.4 μm 波长输出^[85]。

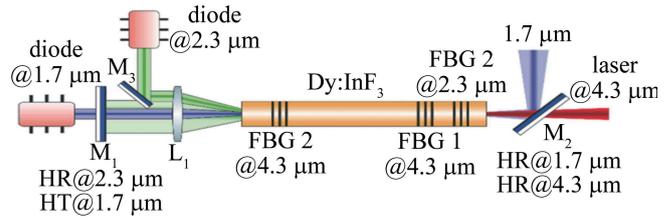


图 15 4.3 μm 光纤激光器的设计示意图^[84]

Fig. 15 Design diagram of 4.3 μm fiber laser^[84]

3.3 应用于脂质成像

目前,1.7 μm 波段激光器多用于脂质成像,并在生物成像方面取得了丰硕成果。2017 年,加州大学 LI 等人利用中心波长为 1.7 μm 的血管内光学相干断层成像研究动脉粥样硬化,与典型 1.3 μm 波段相比,1.7 μm 波段成像深度与识别灵敏度显著提高^[86]。2018 年,密歇根大学 BUMA 等人演示了波长在 1050 nm~1714 nm 之间富脂组织的光学分辨率声学显微镜(optical resolution photoacoustic microscope, OR-PAM)^[18],成像样品为富含脂肪的果蝇幼虫。2018 年,丹麦技术大学 DASA 等人提出了一种高效高脉冲能量超连续谱光源^[87],其脉冲能量密度在 1650 nm~1850 nm 范围内高达 25 nJ/nm,并成功地区分了两种不同的脂肪(胆固醇和脂肪组织),实验结构和结果如图 16 所示。2018 年,AKHOUNDI 等人研制了一种小型多光子内窥镜^[13],利用 1700 nm 波长飞秒光纤激光器作为激发源,克服了生物组织的散射,降低了对水分的吸收。

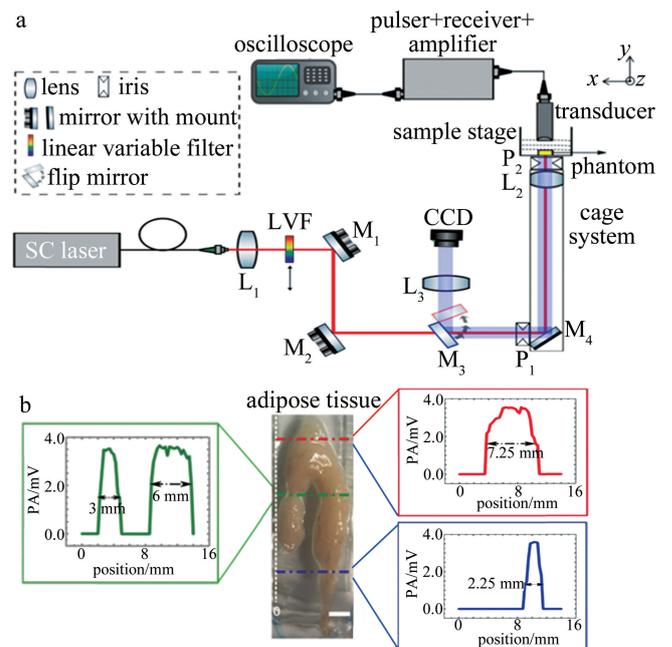


图 16 光声成像实验结构及结果^[87]

Fig. 16 Photoacoustic imaging experimental structure and results^[87]

2018 年,香港大学演示了一种 1.7 μm 波长可调

谐增益开关光纤激光器^[88],并在2019年进一步实现了用于脂质体积光声成像的高能全光纤短波长增益开关掺铽光纤激光器^[89],激光器工作波长为1725 nm,横向分辨率为18.8 μm ,轴向分辨率为172.9 μm ,实验结构和结果如图17所示。2020年,香港大学开发近红外波段双照明光学分辨率光声技术显微镜检查,用于提高无标记脂质成像的灵敏度^[90],激光器波长为1750 nm,对富含脂肪的黄油进行成像。2021年,光州科学技术学院 YOON 等人研制了一种波长为1.7 μm 扫描光源的OCT,具有较深的穿透深度和较高的脂类吸收,并对脑肿瘤模型进行了成像^[91]。

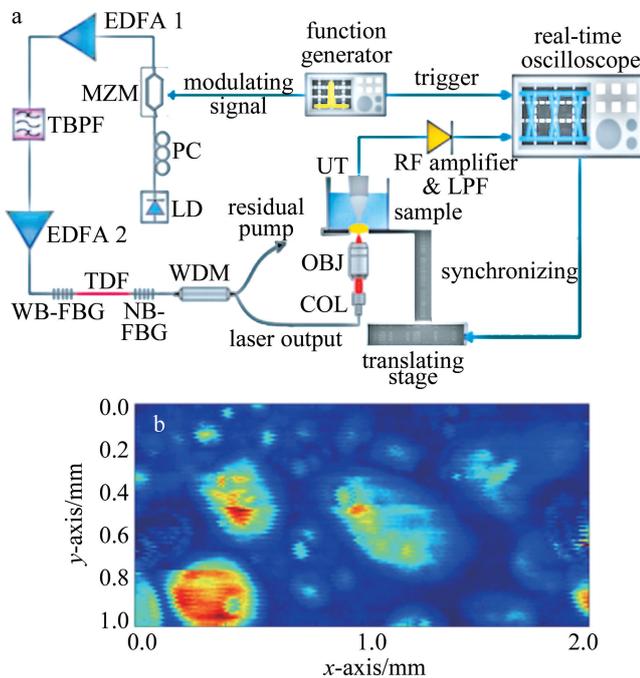


图17 光声成像实验结构及结果^[89]

Fig. 17 Photoacoustic imaging experimental structure and results^[89]

4 长春理工大学1.7 μm 波段光纤激光器研究进展

2016年,本文作者所在课题组总结了国内外1.7 μm 波段光纤光源的研究进展^[19]。本课题组在1.7 μm 波段宽带增益谱的产生、宽带光源的产生及其应用、连续光纤激光器的技术研究、脉冲光纤激光器技术研究以及1.7 μm 波段光纤光源的应用等方面进行了深入的理论和实验验证,并取得了一定的研究成果。

4.1 1.7 μm 波段光纤宽带光源的产生

2018年,本课题组通过抽运掺铽光纤(TDF)获得了中心波长为1744 nm、峰值功率为-45 dBm、5 dB谱宽为87 nm的宽带光谱^[92]。图18为实验装置图。当抽运功率为33 dBm时,直接抽运4 m TDF的ASE光

谱,如图19所示。而后通过优化色散补偿光纤(dispersion compensating fiber, DCF)和TDF长度使光谱向短波方向移动并获得最佳输出光谱,如图20所示。

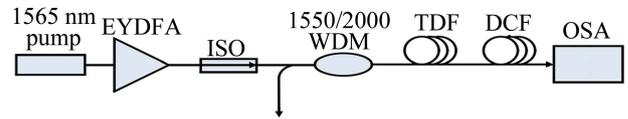


图18 1.7 μm 波段宽带光源实验装置^[92]

Fig. 18 1.7 μm broadband light source experimental setup^[92]

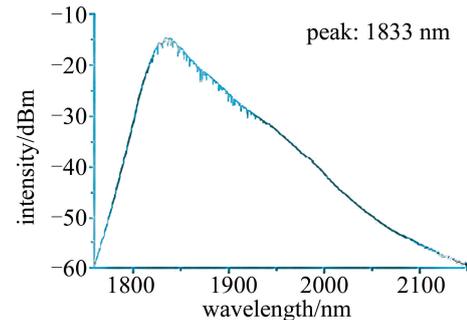


图19 抽运4 m TDF的ASE光谱^[92]

Fig. 19 ASE spectrogram of pump 4 m TDF^[92]

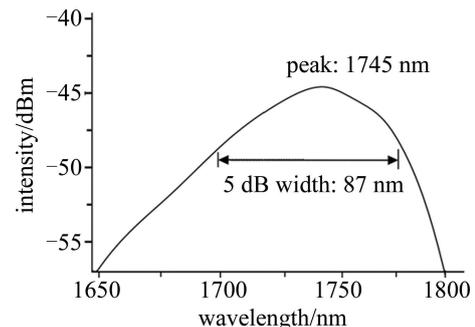


图20 优化TDF和DCF后光谱图^[92]

Fig. 20 Spectrogram after optimized TDF and DCF^[92]

由于得到的宽带光源输出能量较低、抽运效率不高,在此实验基础上,本课题组基于非线性效应从而产生连续光谱的原理做出如下改进。

实验中采用中心波长为1550 nm的ASE光源作为抽运源,高非线性光纤(high nonlinear fiber, HNLf)和色散位移光纤(DSF)作为增益介质,并利用5 m长掺铒光纤(erbium doped fiber, EDF)吸收残余抽运得到1.7 μm 波段宽带光源,峰值功率相对得到了明显提升^[92]。实验结构和结果如图21所示。OC表示光学元件(optical component)。

此外,课题组基于级联调制器抽运源实现了1.7 μm 波段宽带光源^[93],得到20 dB谱宽约为419 nm的宽带光源,实验装置和输出光谱如图22所示。

综上所述,所得到的宽带光源中心波长达到了1.7 μm 波段,虽然相较改进前的峰值功率有了提高,但输出功率仍然较低,本课题组仍会在以后的实验研究中考虑如何提高输出功率,提高转换效率,获得高性能激光器。

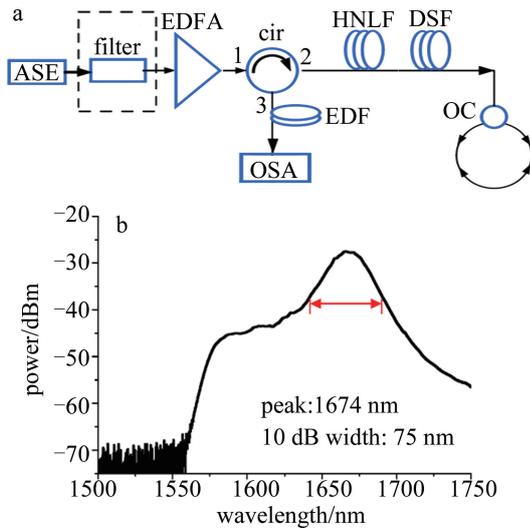


图 21 改进后的 1.7 μm 宽带光源实验结构和结果^[92]

Fig. 21 Experimental structure and results of 1.7 μm broadband light source after improvement^[92]

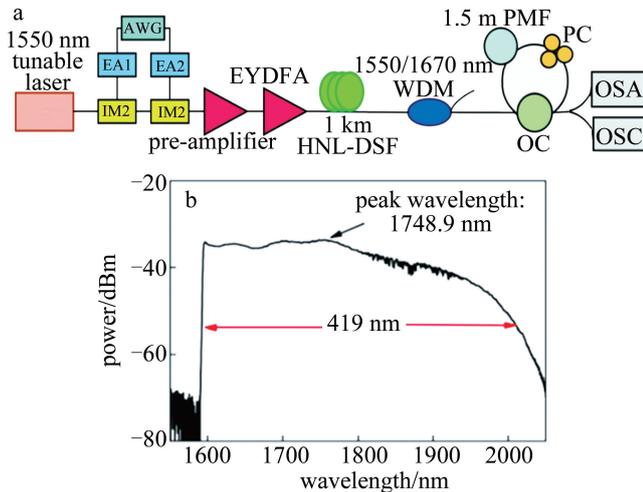


图 22 1.7 μm 宽带光源实验装置及实验结果^[93]

Fig. 22 1.7 μm broadband light source experimental device and the experimental results^[93]

4.2 1.7 μm 波段连续光纤激光器

在 1.7 μm 波段宽带光源的基础上,本课题组通过加入 Sagnac 环进行滤波,实现了输出波长为 1.7 μm 波段的可调谐多波长喇曼光纤激光器^[94],实验装置如图 23 所示。

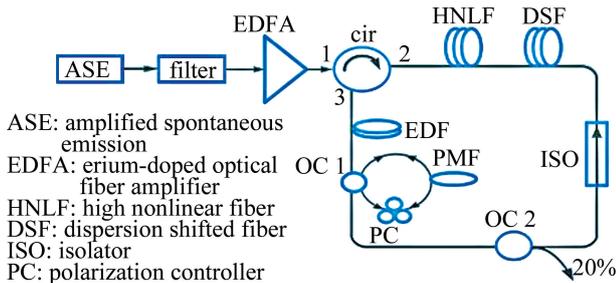


图 23 1.7 μm 波段可调谐喇曼激光器装置^[94]

Fig. 23 1.7 μm tunable Raman laser device^[94]

Sagnac 环滤波器具有梳状滤波的作用,用于实现多波长激光输出^[94]。测量光谱图如图 24 所示。单波长激光其峰值波长为 1686.24 nm,输出功率为 -4.011 dBm,光谱 3 dB 线宽为 0.08 nm。通过增加抽运功率实现了可调谐的双波长激光器,调谐范围为 9.72 nm(1654.88 nm~1664.60 nm),测量双波长激光器的输出功率抖动约为±2 dB。

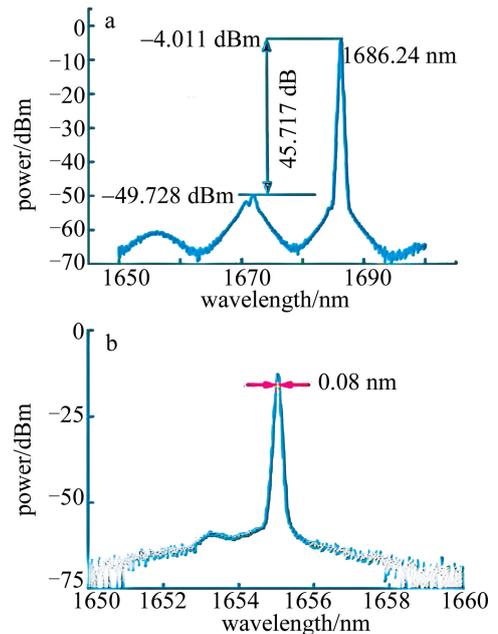


图 24 激光器光谱图^[94]

Fig. 24 Laser spectrum^[94]

除利用非线性效应产生 1.7 μm 波段的增益谱外,本课题组通过抽运 3 m TDF 并利用光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)滤波的方式实现 1.7 μm 连续光纤激光器^[95]。实验结构和输出光谱如图 25 所

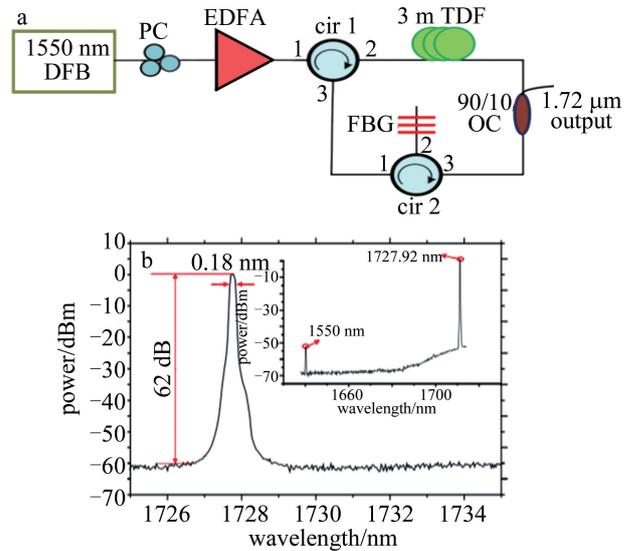


图 25 1.7 μm 波段连续光纤激光器及实验结果^[95]

Fig. 25 1.7 μm continuous fiber laser and the experimental results^[95]

示。激光中心波长为 1727.92 nm, 3 dB 光谱线宽约为 0.18 nm, 边模抑制比 (side-mode suppression ratio, SMSR) 约为 62 dB。

该激光器具有良好的输出稳定性, 在 40 min 内中心波长的抖动为 ± 0.02 nm, 输出功率抖动为 ± 0.01 dBm。但由于较长的掺铥光纤导致产生的 1.7 μm 波段的增益光被二次吸收, 因此该激光器斜效率较低为 1.75%, 本课题组在后面的实验研究中将会在提高斜效率方面对此激光器作进一步改进。

4.3 1.7 μm 波段脉冲光纤激光器

在 1.7 μm 波段连续光纤激光器的基础上, 本课题组利用增益开关技术获得重复频率和脉冲宽度均可调谐的 1.7 μm 波段脉冲激光器^[95]。实验装置图如图 26 所示。利用函数信号发生器驱动, 最后由光电探测器连接示波器观察输出的脉冲波形。

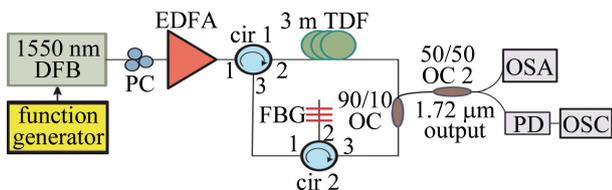


图 26 1.7 μm 波段脉冲光纤激光器实验装置^[95]

Fig. 26 1.7 μm pulse fiber laser experimental device^[95]

函数信号发生器产生 40 kHz 方波信号, 当抽运功率为 31.8 dBm 时, 得到脉冲宽度为 1.2 μs 、重复频率

为 40 kHz 稳定的激光脉冲输出^[95]。实验结果如图 27 所示, 输出脉冲光的基频为 40 kHz。

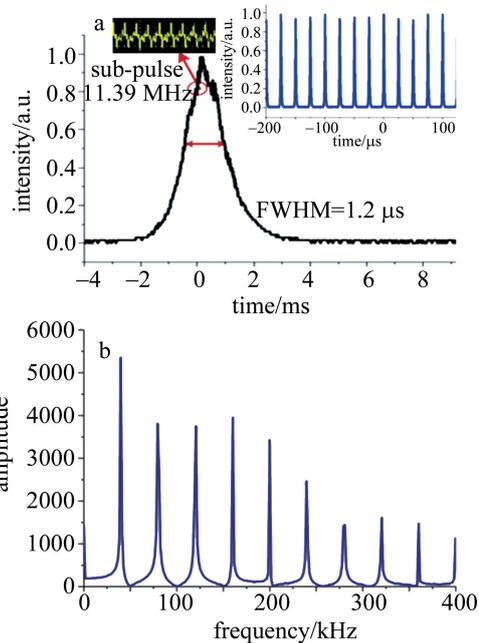


图 27 脉冲序列图及频谱图^[95]

Fig. 27 Pulse sequence diagram and frequency spectrum diagram^[95]

本课题组进行了基于同步抽运效应的脉冲激光器实验研究, 实验装置的总腔长约为 18 m, 相应的基本重复频率约为 11.39 MHz, 通过调节偏振控制器得到稳定的脉冲序列^[95]。脉冲激光器输出特性如图 28 所示。

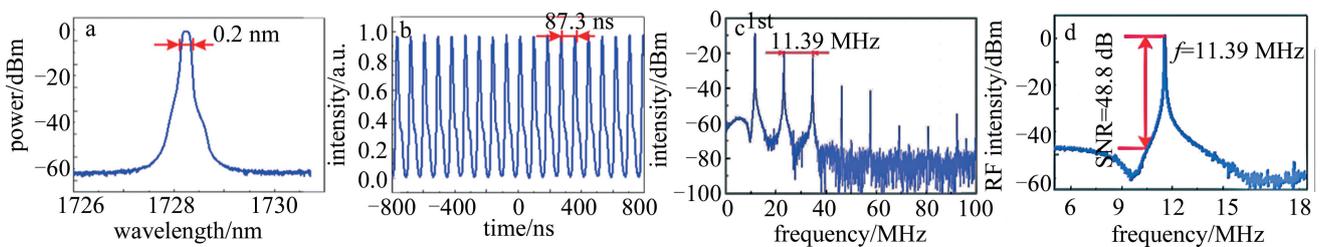


图 28 1.7 μm 脉冲激光器输出特性^[95]

a—光谱图 b—输出脉冲序列 c—频域信号 d—射频输出频谱

Fig. 28 Output characteristics of 1.7 μm pulse laser^[95]

a—spectrum b—output pulse sequence c—frequency domain signal d—radio frequency (RF) output spectrum

通过将调制频率调整为基频的整数倍观察到 2 次谐波 (22.78 MHz), 3 次谐波 (34.17 MHz) 和 4 次谐波 (45.56 MHz) 锁模抽运光和输出光脉冲序列如图 29 所示^[95]。

虽然本课题组实现了 1.7 μm 波段脉冲光纤激光器, 但是由于 1.7 μm 波段光纤器件的缺失造成一定的腔内损耗, 使抽运阈值增加, 输出功率较低, 同时掺铥光纤在 1.7 μm 波段增益较低, 同样对输出功率带来影响。因此, 本课题组通过采用双向抽运 1 m 长铥

钛共掺光纤, 利用调制抽运和非线性偏转效应实现了 1.7 μm 波段调 Q 锁模混合激光信号产生, 并对混合激光信号进行了分析和优化^[96], 具体实验结构如图 30 所示。通过抽运测得 1.7 μm 波段连续激光器输出中心波长为 1724 nm, 斜率效率为 0.07%, 2.5 W 抽运功率下 3 dB 线宽为 0.1 nm, 边模抑制比为 16.66 dB, 实验结果如图 31 所示。将抽运功率增加至 5 W 时实现稳定锁模脉冲序列, 得到 1.7 μm 波段锁模脉冲光纤激光器的输出特性如图 32 所示。

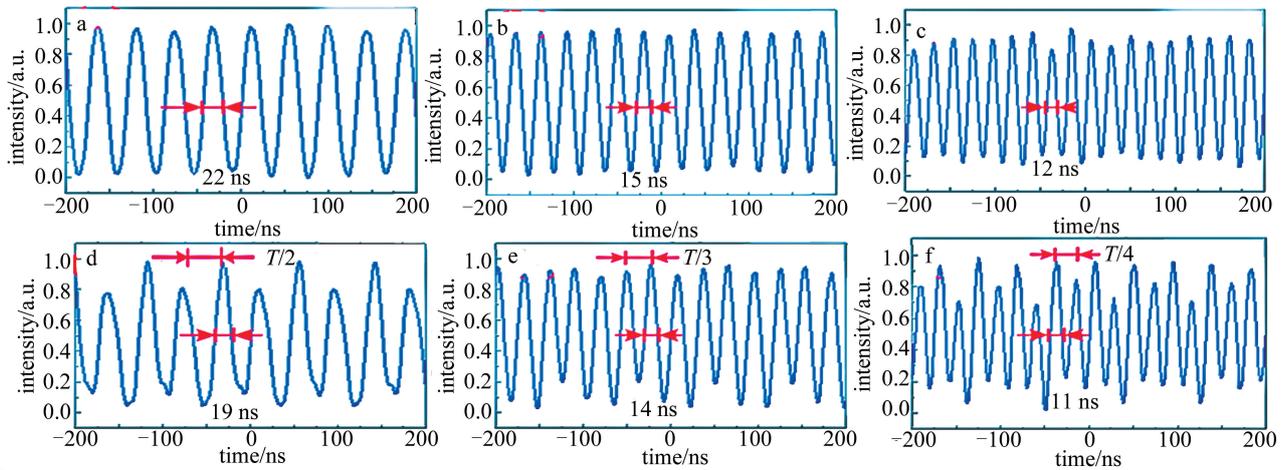


图 29 抽运光的脉冲序列和输出激光的脉冲序列^[95]

Fig. 29 Pulse sequence of pump light and pulse sequence of output laser^[95]

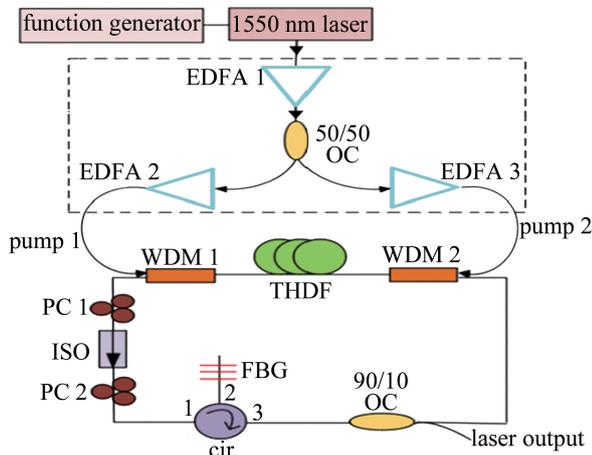


图 30 1.7 μm 脉冲光纤激光器实验装置^[96]

Fig. 30 1.7 μm pulsed optical fiber laser experimental device^[96]

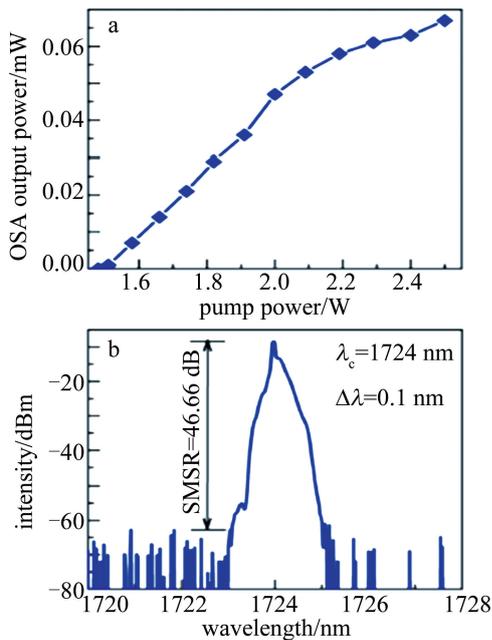


图 31 斜率效率和激光输出光谱^[96]

Fig. 31 Slope efficiency and laser output spectra^[96]

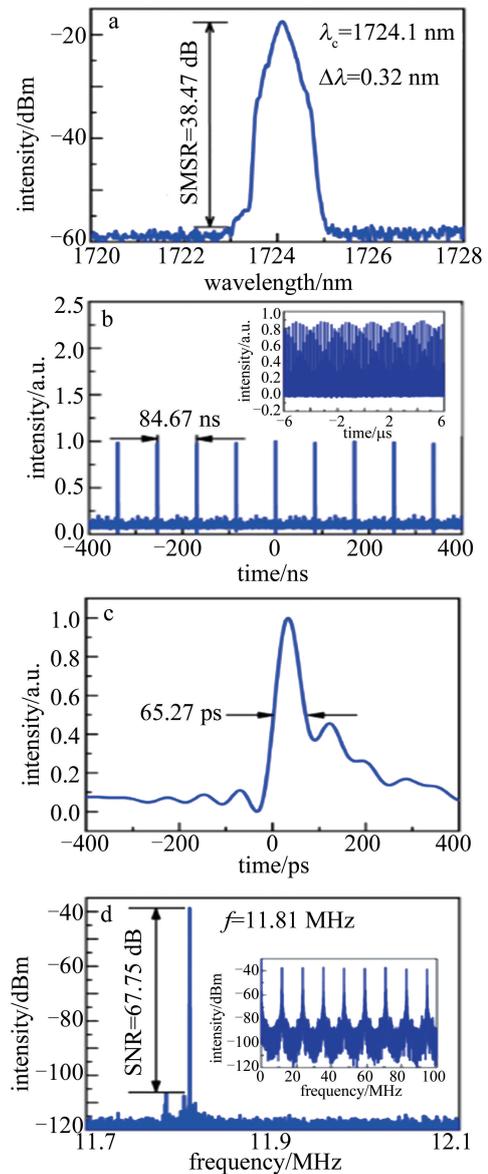


图 32 1.7 μm 锁模脉冲光纤激光器的输出特性^[96]

Fig. 32 Output characteristics of 1.7 μm mode-locked pulse fiber laser^[96]

4.4 1.7 μm 波段光源的应用

由于 1.7 μm 波段处于 C—H 共价键的吸收峰附近且对水的吸收相对较低,乙醇等有机化合物富含大量的 C—H 共价键,故本课题组利用 1.7 μm 波段用于乙醇的浓度检测及水雾波形传输实验研究,酒精实验装置如图 33 所示,验证了 1.7 μm 波段对酒精浓度测量的可行性^[95]。水雾波形传输实验如图 34 所示。

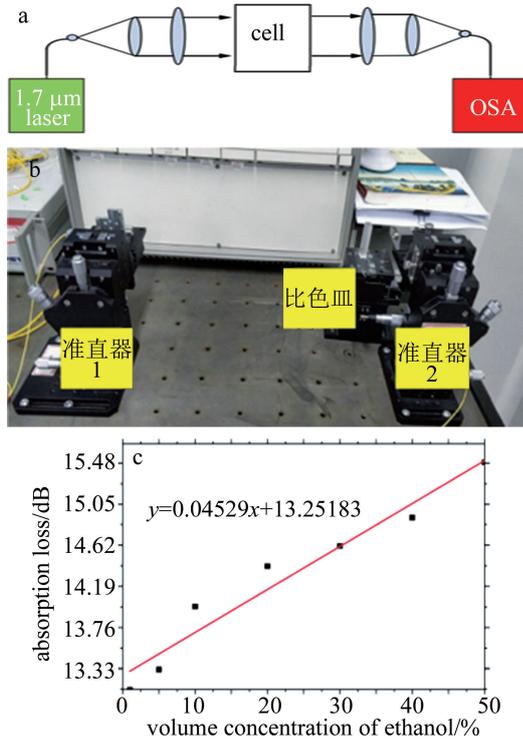


图 33 酒精体积分数测量装置实物图及实验结果^[95]

Fig. 33 Alcohol volume concentration measurement device real products and experimental results^[95]

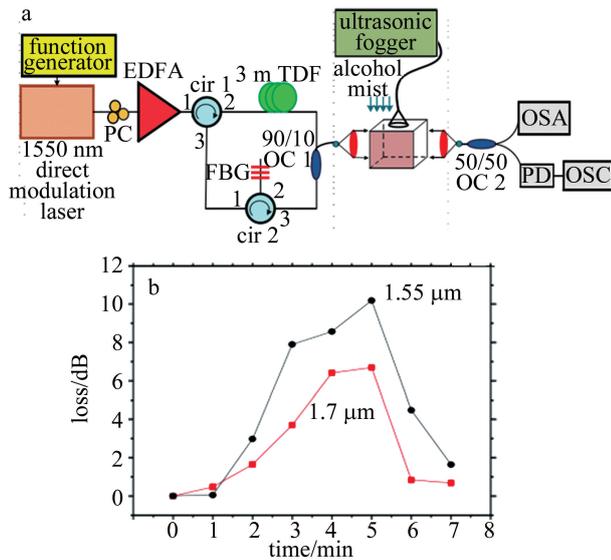


图 34 水雾波形传输装置及实验结果^[95]

Fig. 34 Water fog waveform transmission device and experimental results^[95]

结果表明,水雾传输过程中 1.7 μm 波段光信号比 1.5 μm 波段功率损耗减少最多 4.5 dB^[95]。

以上是迄今为止本课题组对 1.7 μm 波段光源的全部研究,针对 1.7 μm 波段连续激光器输出功率较低,且腔内损耗斜率效率仅达到 1.75% 这一问题,后续研究重点课题组倾向于针对提高激光器斜率效率方面做出改善,获得高性能激光器。在 1.7 μm 波段激光器的应用研究方面,倾向于飞秒脉冲锁模光纤激光器及耗散孤子的产生,对脂质的显微成像研究以及搭建频域 OCT 系统进行生物成像研究。

5 结束语

综上所述,1.7 μm 波段光源是一个应用广泛,发展前景蓬勃的优秀光源,但与近红外 800 nm 或 1 μm 波段激光系统相比,1.7 μm 波段激光的发展尚不成熟,有待深入研究。本文中总结了 1.7 μm 波段激光产生的主要技术方案,1.7 μm 波段激光的产生主要依赖于抽运掺铥光纤,目前,英国通过抽运掺铥光纤获得输出功率高达 48 W,斜率效率达到 80% 的激光输出,是目前为止斜率效率及输出功率最高的 1.7 μm 波段连续光纤激光器。虽然国内的 1.7 μm 波段掺铥光纤激光器斜率效率达到 50%,但输出功率还未突破 10 W,与美俄等国家相比尚存在较大差距。国内外 1.7 μm 波段脉冲激光器均已达到飞秒量级的脉冲输出,但就脉冲能量和输出功率来讲,国内实验室还是与国外有着较大差距。值得一提的是,国防科技大学通过抽运充氢气晶体光纤实现斜率效率为 84% 的脉冲光纤激光器,是迄今为止斜率效率最高的 1.7 μm 波段脉冲光纤激光器。

目前国内 1.7 μm 波段连续激光器的研究主要集中在波长调节和功率调节以及提高斜率效率上,1.7 μm 波段光纤光源没有被广泛应用的原因归结为:(1)国内 1.7 μm 波段激光器效率不高,存在一定损耗,输出功率有限;(2)1.7 μm 波段光纤器件并未完全普及,还处于实验室研究阶段,限制了该波段光源的发展。未来,窄线宽、高功率、高效率将会是 1.7 μm 波段连续光纤激光器的发展趋势,进一步缩短脉冲宽度是 1.7 μm 波段脉冲激光器发展的主要方向,目前国内 1.7 μm 波段锁模脉冲很少突破飞秒仍停留在皮秒阶段,对于 1.7 μm 波段脉冲激光器而言,可基于高平均功率的皮秒抽运源,实现高效率、高脉冲能量、高重频、窄线宽、周期量级的飞秒脉冲宽度的激光脉冲输出。

从近些年来 1.7 μm 波段激光器的应用发展趋势看,在中红外激光器、激光通信、聚合物加工及气体检测、生物医疗成像等领域都具有更广阔的发展前景。

(1)在发展高平均功率中红外激光技术方面,设计小型化、集成化的 1.7 μm 波段抽运源也是很有必要的,利用波长更长、功率更高、效率更好的 1.7 μm 波段抽运源实现长波长的高效红外激光输出。

(2)在激光通信领域技术方面,研制 1.7 μm 波段模式可控光纤激光器可以更好地提高保密性能,应用于大气通信及水下通信方面,激光高亮度的特点在能源利用上也有其独特的优势。

(3)在聚合物加工及气体检测领域,由于 1610 nm 和 1790 nm 之间的 C—H 键拉伸共振泛音意味着聚合物和其它含碳氢化合物的材料在该波段内具有强吸收,设计窄线宽、波长可调谐、平均功率高的 1.7 μm 波段光源将在材料加工方面具有独特的优势。

(4)在医疗及生物成像技术方面,1.7 μm 波段多模光纤激光器相关报道较少,尽管传统的单模激光器具有亮度高、效率高和输出方向性强等特点,然而到目前为止,激光还没有被广泛地用作全场成像和显示应用的照明光源。这一局限性的存在是因为现有激光器的高度空间相干性导致相干伪影,如散斑。发展 1.7 μm 波段多模激光器可以在医学成像领域消除散斑,提高成像分辨率。传统的高速视频显微镜采用低空间相干度,而高空间相干度用于提取流动过程的动态信息。激光相干控制为消除相干伪影提供了一种有效的手段,因此发展 1.7 μm 波段具有可调谐的空间相干性的照明源是可取的,将会在成像和波前整形方面有新的发展和应用。

随着对相关技术的不断了解和学习,1.7 μm 波段光纤激光器在研发和应用方面亟待解决的难题将会被攻克,在激光手术、生物医学、激光通信、有机物检测、中红外激光产生、聚合物加工等领域展现它独特的优势,发挥重大作用造福人类。

参 考 文 献

- [1] LI P X, YANG Ch, YAO Y F, *et al.* Research progress of 980 nm optical fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100001 (in Chinese).
李平雪,杨春,姚毅飞,等. 980 nm 光纤激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100001.
- [2] HAN K, MA Y X, WANG X L, *et al.* Progress of high power Tm-doped fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(10): 101406 (in Chinese).
韩凯,马阎星,王小林,等. 高功率掺铥光纤激光的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(10): 101406.
- [3] SUN G Y, YANG J, QU R H, *et al.* Research and progress of multi-wavelength Erbium-doped fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 90004 (in Chinese).
孙国勇,杨敬,瞿荣辉,等. 多波长掺铒光纤激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 90004.
- [4] KIRSCH D C, CHEN S, SIDHARTHAN R, *et al.* Short-wave IR ultrafast fiber laser systems; Current challenges and prospective applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(18): 180906.
- [5] 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.
- [6] WOOD J, TURNER P H. Monitoring of itaconic acid hydrogenation in a trickle bed reactor using fiber-optic coupled near-infrared spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 2003, 57(3): 293-298.
- [7] MAEDA Y, YAMADA M, ENDO T, *et al.* 1700 nm ASE light source and its application to mid-infrared spectroscopy [C]//2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology. Melbourne, Australia: IEEE, 2014: 410-411.
- [8] CHAMBERS P, AUSTIN E A D, DAKIN J P. Theoretical analysis of a methane gas detection system, using the complementary source modulation method of correlation spectroscopy [J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(8): 1629-1636.
- [9] BASHKATOV A N, GENINA E A, KOCHUBEY V I, *et al.* Optical properties of the subcutaneous adipose tissue in the spectral range 400-2500 nm [J]. *Optics and Spectroscopy*, 2005, 99(5): 836-842.
- [10] HORTON N G, WANG K, KOBAT D, *et al.* In vivo three-photon microscopy of subcortical structures within an intact mouse brain [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(3): 205-209.
- [11] TANAKA M, HIRANO M, MURASHIMA K, *et al.* 1.7 μm spectroscopic spectral-domain optical coherence tomography for imaging lipid distribution within blood vessel [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6645-6655.
- [12] GUESMI K, ABDELADIM L, TOZER S, *et al.* Dual-color deep-tissue three-photon microscopy with a multiband infrared laser [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 1-9.
- [13] AKHOUNDI F, QIN Y, PEYGHAMBARIAN N, *et al.* Compact fiber-based multi-photon endoscope working at 1700 nm [J]. *Biomedical Optics Express*, 2018, 9(5): 2326-2335.
- [14] LU Y, LI Zh L, WANG X Ch, *et al.* Development of 50 kHz intravascular swept source coherence tomography system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0207001 (in Chinese).
卢宇,李中梁,王向朝,等. 50 kHz 血管内扫频光学相干层析成像系统[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0207001.
- [15] WU M, JANSEN K, VAN DER STEEN A F W, *et al.* Specific imaging of atherosclerotic plaque lipids with two-wavelength intravascular photoacoustics [J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(9): 3276-3286.
- [16] 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.
- [17] HASEGAWA T, SOGAWA I, SUGANUMA H. A near infrared endoscope visualizing lipid within arterial vessel wall based on multi-spectral image in 1.7 μm wavelength band [C]//Endoscopic Microscopy VIII. San Francisco, California, USA: International Society

- for Optics and Photonics, 2013: 8575-8581.
- [18] BUMA T, CONLEY N C, CHOI S W. Multispectral photoacoustic microscopy of lipids using a pulsed supercontinuum laser[J]. Biomedical Optics Express, 2018, 9(1): 276-288.
- [19] ZHANG Y, ZHANG P, LIU P, *et al.* Fiber light source at 1.7 μm waveland and its application [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9):090002(in Chinese).
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.
- [20] LI H, HUANG W, CUI Y L, *et al.* Progress and prospect of fiber lasers operating at 1.7 μm band [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(19): 1900001(in Chinese).
李昊, 黄威, 崔宇龙, 等. 1.7 μm 波段光纤激光器研究进展与展望[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 1900001.
- [21] ZHAN Z Y, CHEN J X, LIU M, *et al.* Recent progress of 1.7 μm ultrafast fiber laser (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 223-237(in Chinese).
战泽宇, 陈吉祥, 刘萌, 等. 1.7 μm 超快光纤激光器研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 223-237.
- [22] AGGER S, POVLSEN J H, VARMINING P. Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser [J]. Optics Letters, 2004, 29(13): 1503-1505.
- [23] ZHU H, GUO J, DUAN Y, *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.
- [24] SUN J J, CHEN Y, ZHANG K, *et al.* Efficient continuous wave and acousto-optical Q-switched Tm:Lu₂O₃ laser pumped by the laser diode at 1.7 μm [J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 116: 103771.
- [25] TILMA B W, JIAO Y, KOTANI J, *et al.* Integrated tunable quantum-dot laser for optical coherence tomography in the 1.7 μm wavelength region [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(2): 87-98.
- [26] XU J, WANG L, LIU J, *et al.* Narrow line-wide 1653 nm Raman fiber amplifiers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602001(in Chinese).
徐佳, 汪磊, 刘江, 等. 1653 nm 窄线宽拉曼光纤放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602001.
- [27] YAMADA M, ONO H, OHTA K, *et al.* 1.7 μm band optical fiber amplifier [C]//Optical Fiber Communication Conference. San Francisco, California, USA: Optical Society of America, 2014: Tu2D.
- [28] LI Z, ALAM S U, DANIEL J M O, *et al.* 90 nm gain extension towards 1.7 μm for diode-pumped silica-based thulium-doped fiber amplifiers [C]//2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC). Cannes, France: IEEE, 2014: 1-3.
- [29] EMAMI S D, KHODAEI A, GANDAN S, *et al.* Thulium-doped fiber laser utilizing a photonic crystal fiber-based optical low-pass filter with application in 1.7 μm and 1.8 μm band [J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19681-19688.
- [30] LI Z, JUNG Y, DANIEL J M O, *et al.* Extreme short wavelength operation (1.65-1.7 μm) of silica-based thulium-doped fiber amplifier [C]//Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles, California, USA: Optical Society of America, 2015: Tu2C.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] LI Z, JUNG Y, DANIEL J M O, *et al.* Exploiting the short wavelength gain of silica-based thulium-doped fiber amplifiers [J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2197-2200.
- [34] CREEDEN D, JOHNSON B R, RINES G A, *et al.* High power resonant pumping of Tm-doped fiber amplifiers in core-and cladding-pumped configurations [J]. Optics Express, 2014, 22(23): 29067-29080.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] PARK J, RYU S, YEOM D I. All-fiber Tm-Ho codoped laser operating at 1700 nm [J]. Current Optics and Photonics, 2018, 2(4): 356-360.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] DIANOV E M, FIRSTOV S V, KHOPIN V F, *et al.* Bismuth-doped fibers and fiber lasers for a new spectral range of 1600-1800 nm [C]//Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications. San Francisco, California, USA: International Society for Optics and Photonics, 2016: 9728.
- [41] FIRSTOV S V, ALYSHEV S V, RIUMKIN K E, *et al.* Laser-active fibers doped with bismuth for a wavelength region of 1.6-1.8 μm [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(5): 1-15.
- [42] NEMOVA G, QIAO J, CHEN L R, *et al.* Dual-wavelength, cascaded cavities bismuth-doped fiber laser in 1.7 μm wavelength range [C]//Fiber Lasers XVI: Technology and Systems. San Francisco, California, USA: International Society for Optics and Photonics, 2019, 10897.
- [43] 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.
- [44] THOUROUDE R, GILLES H, ROBIN T, *et al.* Efficient random Raman fiber laser at 1650 nm [C]//Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications. Vienna, Austria: Optical Society of America, 2019: JTh3A.
- [45] LEHNEIS R, STEINMETZ A, LIMPERT J, *et al.* All-fiber pulse shortening of passively Q-switched microchip laser pulses down to sub-200 fs [J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5806-5809.
- [46] ZHANG Z, YAN Z, ZHOU K, *et al.* All-fiber 250 MHz fundamental repetition rate pulsed laser with tilted fiber grating polarizer [J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(4): 045102.
- [47] ZHAO C, ZHANG H, QI X, *et al.* Ultra-short pulse generation by a

- topological insulator based saturable absorber[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(21): 211106.
- [48] ZHANG Z, MOU C, YAN Z, *et al.* Sub-100 fs mode-locked erbium-doped fiber laser using a 45°-tilted fiber grating[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28297-28303.
- [49] OBER M H, HOFER M, FERMAN M E. 42-fs pulse generation from a mode-locked fiber laser started with a moving mirror[J]. Optics Letters, 1993, 18(5): 367-369.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] KHEGAI 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.
- [54] CHEN S, CHEN Y, LIU K, *et al.* W-type normal dispersion thulium-doped fiber-based high-energy all-fiber femtosecond laser at 1.7 μm [J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3637-3640.
- [55] MORIN P, BOIVINET S, YEHOUESSI J P, *et al.* Sub-150-fs all-fiber polarization maintaining tunable laser in the mid-infrared[C]//Fiber Lasers XVII: Technology and Systems. San Francisco, California, USA; International Society for Optics and Photonics, 2020: 112601M.
- [56] GRIMES A, HARIHARAN A, SUN Y, *et al.* Hundred-watt CW and Joule level pulsed output from Raman fiber laser in 1.7 μm band[C]//Fiber Lasers XVII: Technology and Systems. San Francisco, California, USA; International Society for Optics and Photonics, 2020: 112601S.
- [57] CHEN S, CHEN Y, 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.
- [58] XUE G, ZHANG B, YIN K, *et al.* All-fiber wavelength-tunable Tm/Ho-codoped laser between 1727 nm and 2030 nm[J]. Proceedings of the SPIE, 2015, 9255: 92550U.
- [59] XIAO X Sh. 3W narrow-linewidth ultra-short wavelength operation near 1707nm in thulium-doped silica fiber laser with bidirectional pumping[J]. Applied Physics, 2017, B123(4): 1-6.
- [60] ZHANG J X, SHENG Q, SUN Sh, *et al.* 1720 nm narrow-linewidth all-fiber ring laser based on thulium-doped fiber[C]//Fiber Lasers XVII: Technology and Systems. San Francisco, California, USA; International Society for Optics and Photonics, 2020: 112600V.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] ZHANG L, ZHANG J, SHENG Q, *et al.* Watt-level 1.7 μm single-frequency thulium-doped fiber oscillator[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27048-27056.
- [64] ZHANG L, ZHANG J, 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.
- [65] CEN X, GUAN X, YANG C, *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.
- [66] ZHANG Y, SONG J, 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.
- [67] FANG X, WANG Z, 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.
- [68] PEI W, 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.
- [69] LI H, PEI W, HUANG W, *et al.* Highly efficient nanosecond 1.7 μm fiber gas Raman laser by H₂-filled hollow-core photonic crystal fibers[J]. Crystals, 2021, 11(1): 32-34.
- [70] PEI W, LI H, HUANG W, *et al.* Pulsed fiber laser oscillator at 1.7 μm by stimulated Raman scattering in H₂-filled hollow-core photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 33915-33925.
- [71] 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.
- [72] DU T, RUAN Q, YANG R, *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.
- [73] HE X. Femtosecond fiber laser for deep biological tissue multiphoton[D]. Xi'an: Northwestern University, 2020: 61-70 (in Chinese). 何鑫. 用于深层生物组织多光子成像的飞秒光纤激光器研究[D]. 西安: 西北大学, 2020: 61-70.
- [74] JELÍNKOVÁ H, DOROSHENKO M E, ŠULC J, *et al.* Laser-diode pumped dysprosium-doped lead thiogallate laser output wavelength temporal evolution and tuning possibilities at 4.3-4.7 μm [C]//Solid State Lasers XXV: Technology and Devices. San Francisco, California, USA; International Society for Optics and Photonics, 2016: 97261A.
- [75] QUIMBY R S, SHAW L B, SANGHERA J S, *et al.* Modeling of cascade lasing in Dy:chalcogenide glass fiber laser with efficient output at 4.5 μm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 123-125.
- [76] LIU Y, YU J L, WANG H J, *et al.* Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser based on feedback fiber loop[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 202003 (in Chinese). 刘毅, 于晋龙, 王红杰, 等. 基于反馈光纤环的可调多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 202003.
- [77] MA D, CAI Y, ZHOU C, *et al.* 37.4 fs pulse generation in an Er: fiber laser at a 225 MHz repetition rate[J]. Optics Letters, 2010, 35(17): 2858-2860.
- [78] HE Y L, LUO H Y, LI J, *et al.* High power all fiber passively mode-locked thulium-doped fiber laser[J]. High Power all Laser and Particle Beams, 2014, 26(10): 102-106 (in Chinese). 何雨莲, 罗鸿禹, 李静, 等. 全光纤高功率被动锁模掺铒光纤激

- 光器[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(10):102-106.
- [79] ANSELMO C, WELSCHINGER J Y, CARIU J P, *et al.* Gas concentration measurement by optical similitude absorption spectroscopy: Methodology and experimental demonstration[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 12588-12599.
- [80] ZHU Y J, FAN X H, GAO Ch, *et al.* Laser gas sensor for open path hydrogen chloride detection[J]. Laser Journal, 2017, 38(7): 17-20(in Chinese).
朱雁军, 樊孝华, 高潮, 等. 用于开放光程氯化氢检测的激光气体传感器[J]. 激光杂志, 2017, 38(7): 17-20.
- [81] TANO Y, TANAKA M, HONDA Y, *et al.* Evaluation of high alcohol concentration using a 1.7 μm band near-infrared spectroscopy system using multi-mode optical fibers[C]//2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Jeju, Korea: IEEE, 2018: 1-2.
- [82] VIZBARAS A, ŠIMONYTĖ I, MIASOJEDOVAS A, *et al.* Swept-wavelength lasers based on GaSb gain-chip technology for non-invasive biomedical sensing applications in the 1.7-2.5 μm wavelength range[J]. Biomedical Optics Express, 2018, 9(10): 4834-4849.
- [83] 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.
- [84] QU Ch B, KANG M Q, XIANG X J, *et al.* Theoretical study of 4.3 μm dual-wavelength pumped Dy: InF₃ high energy mid-infrared fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0801003 (in Chinese).
瞿崇兵, 康民强, 向祥军, 等. 双波长泵浦 4.3 μm Dy:InF₃ 高能中红外光纤激光理论研究[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0801003.
- [85] DOROSHENKO M E, JELÍNKOVÁ H, ŘÍHA A, *et al.* Mid-IR (4.4 μm) Zn_{1-x}Mn_xSe: Cr²⁺, Fe²⁺ ($x=0.3$) laser pumped by 1.7 μm laser using Cr²⁺-Fe²⁺ energy transfer[J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2724-2727.
- [86] LI Y, MURTHY R S, ZHU Y, *et al.* 1.7-Micron optical coherence tomography angiography for characterization of skin lesions-a feasibility study[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2021, 40(9): 2507-2512.
- [87] DASA M K, MARKOS C, MARIA M, *et al.* High-pulse energy supercontinuum laser for high-resolution spectroscopic photoacoustic imaging of lipids in the 1650-1850 nm region[J]. Biomedical Optics Express, 2018, 9(4): 1762-1770.
- [88] LI C, SHI J, GONG X, *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.
- [89] LI M Sh, SHI J W, YIU C C Y, *et al.* Near-infrared double-illumination optical-resolution photoacoustic microscopy [J]. Journal of Biophotonics, 2021, 14(3): e202000392.
- [90] LI C, SHI J, WANG X, *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.
- [91] YOON T I, PARK J S, LEE B H, *et al.* Brain tumor margin detection using 1.7 μm spectroscopic swept-source OCT[C]//European Conference on Biomedical Optics. Munich, Germany: Optical Society of America, 2021: EW1C. 6(1-3).
- [92] DU Q L. 1.7 μm fiber broadband light source and its application in optical coherence tomography system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018:1-53(in Chinese).
都权力. 1.7 μm 光纤宽带光源及其在光学相干层析成像系统中的应用[D]. 长春: 长春理工大学, 2018:1-53.
- [93] WU D, ZHANG P, LI X Y, *et al.* Broadband light source at 1.7 μm based on cascade-modulator pumping[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0506003 (in Chinese).
吴迪, 张鹏, 李晓燕, 等. 基于级联调制器抽运源的 1.7 μm 波段宽带光源[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0506003.
- [94] HE Zh X, ZHANG P, WU D, *et al.* Experimental study of a 1.7 μm tunable multi-wavelength Raman fiber laser based on an amplified spontaneous emission pump[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071403(in Chinese).
贺振兴, 张鹏, 吴迪, 等. 基于 ASE 泵浦的 1.7 μm 波段可调谐多波长拉曼光纤激光器实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071403.
- [95] HE Zh X. Research on technology of 1.7 μm pulse fiber laser [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020:1-64(in Chinese).
贺振兴. 1.7 μm 波段脉冲光纤激光器技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020:1-64.
- [96] LI Q, ZHANG P, FAN Y, *et al.* 1.7 μm gain-switched and mode-locked hybrid Tm-Ho codoped fiber laser signal generation and optimization[J]. Applied Optics, 2022, 61(2): 455-462.