

激光与光电子学进展

中红外玻璃光纤光栅制备及其应用研究进展

刘婷^{1,3,4}, 李耀威^{1,3,4}, 戴世勋^{1,3,4}, 王训四^{1,3,4}, 王鹏飞², 张培晴^{1,3,4*}

¹宁波大学高等技术研究院红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211;

²哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150006;

³浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211;

⁴先进红外光电材料及器件浙江省工程研究中心, 浙江 宁波 315211

摘要 中红外波段包含了极其重要的大气红外窗口和众多重要分子的指纹区, 该波段的光源和光器件在光电对抗、环境监测、生物传感和医疗诊断等领域具有重要应用。作为全光纤化中红外激光的关键元件, 中红外玻璃光纤光栅成为人们的研究热点。氟化物光纤光栅、硫系光纤光栅和碲酸盐光纤光栅是目前应用最广泛的中红外玻璃光纤光栅, 本文分门别类地对这 3 种光纤光栅的性能特点、制备工艺、研究现状和应用领域等进行了全面系统的概述, 并分析了目前中红外玻璃光纤光栅的优势和局限性, 为进一步提升中红外光纤激光器的性能, 拓展中红外光纤光栅的应用领域提供参考和借鉴。

关键词 材料; 中红外波段; 光纤光栅; 光纤光栅制备; 光纤激光器; 传感应用

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1516015

Research Progress on Fabrication and Application of Mid-Infrared Glass Fiber Gratings

Liu Ting^{1,3,4}, Li Yaowei^{1,3,4}, Dai Shixun^{1,3,4}, Wang Xunsi^{1,3,4}, Wang Pengfei², Zhang Peiqing^{1,3,4*}

¹Laboratory of Infrared Materials and Devices, Institute of Advanced Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

²School of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150006, Heilongjiang, China;

³Zhejiang Key Laboratory of Photoelectric Detection Materials and Devices, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

⁴Zhejiang Engineering Research Center for Advanced Infrared Photoelectric Materials and Devices, Ningbo 315211, Zhejiang, China

Abstract The mid-infrared band contains extremely important atmospheric infrared windows and the fingerprint regions of many important molecules. The light sources and optical devices in this band have important applications in the fields of optoelectronic countermeasures, environmental monitoring, biological sensing, and medical diagnosis. As a key component of all-fiber mid-infrared lasers, mid-infrared glass fiber gratings have become a recent research hotspot. Fluoride fiber gratings, chalcogenide fiber gratings, and tellurite fiber gratings are the most widely used mid-infrared glass fiber gratings. This paper gives a comprehensive and systematic overview of the performance characteristics, fabrication process, research status, and application fields of the three kinds of fiber gratings, and analyzes the advantages and limitations of the current mid-infrared glass fiber gratings. It provides a reference for further improving the performance of mid-infrared fiber lasers and expanding the application field of mid-infrared fiber gratings.

Key words materials; mid-infrared band; fiber grating; fiber grating fabrication; fiber laser; sensing application

1 引言

光纤光栅是一种高效的光无源器件, 其工作原理是利用光纤的光敏特性, 通过对光纤纤芯的折射率进

行周期的调制, 使特定波长的光传输受到损耗或反射。根据光栅周期的长度来分类, 周期小于 $1\ \mu\text{m}$ 的光栅称为光纤布拉格光栅 (FBG), 它能将前向传输的纤芯模式的光耦合到后向传输的纤芯模式中, 该过程具有波

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-05-05; 录用日期: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金 (62075107, 61935006, 62090064)、宁波大学王宽诚幸福基金

通信作者: *zhangpeiqing@nbu.edu.cn

长选择性,只有满足布拉格条件的波长才会发生耦合;周期在几十至几百微米之间的光栅称为长周期光纤光栅(LPFG),其原理是将前向传输的纤芯模式的光耦合到同向传输的不同包层模式中,包层模在传输一定距离后会被损耗掉,对应的在光谱中留下一系列的损耗峰。光纤光栅具有插入损耗低、光纤兼容性好、特异性波长选择等优点,在光纤激光器、光纤通信和传感领域得到了广泛的应用。

自从 1978 年 Hill 等^[1]制备了世界上第一根光纤光栅后,基于石英材料的光纤光栅在理论分析和实验制备方面建立了成熟的理论系统和完备的光刻制备工艺,并在光纤通信与传感等领域起到了举足轻重的作用,成为目前不可或缺的光学元件。但是,由于石英材料的波长透过范围局限于 $2\ \mu\text{m}$ 以内,限制了其中重要的中红外区域的应用。

中红外波段包括了极其重要的大气红外窗口和众多的分子指纹区,是透过率最高的波段。中红外波段的光纤光栅在光纤传感器、光纤光开关、光纤滤波器、光纤激光器、生物医疗、环境污染检测以及国防安全等领域都有着非常重要的应用价值。随着红外材料及器件科学技术的发展,红外基质的光纤光栅引起国内外学者的广泛关注和持续研究,已成为现代光学研究的热点之一。氟化物、硫化物和碲酸盐光纤等软玻璃光纤不仅具有较高的线性和非线性折射率,而且具有宽的中红外波段光谱传输范围^[2-5]。中红外光纤光栅是全光纤化中红外激光的关键元件,虽然国内外对其的研究已取得丰富成果,但与传统石英光纤光栅相比,中红外光纤光栅制备及研究水平还处于起步阶段,存在一些关键的科学问题和技术难题尚待深入探索。本文详细介绍了中红外波段应用最广泛的氟化物、硫系和碲酸盐玻璃光纤光栅,对其制备方法、研究现状和应用领域进行了全面的综述与分析。

2 光纤光栅制备方法

光纤光栅的制备通常是将连续或脉冲激光照射到光纤的纤芯内,利用材料的光敏特性产生周期性的折射率变化而获得。目前,国内外对光纤光栅的光刻制备方法通常主要包括驻波法、全息干涉法、相位掩模法和激光直写法等方式:

1) 驻波干涉法:也称作内部写入法或简称驻波法,其制作方法是入射激光通过光纤端面耦合进光纤中,传播至光纤尾端面形成菲涅耳反射,入射光和反射光这两束反向光在光纤中形成驻波干涉条纹,经过一段时间曝光后,使纤芯的折射率产生周期性分布。自 1978 年加拿大的 Hill 等^[1]通过向掺锗光纤发射 $488\ \text{nm}$ 的强氩离子激光,采用驻波干涉法在光纤中写入了世界上第一个永久折射率光栅,也称为 FBG。

2) 双光束全息干涉法:又称外侧写入法,利用分光器将写入光分成两束等强光束,通过平面镜反射后

两束光以某个角度相互干涉,把光纤放置在干涉场中,并与干涉条纹垂直,干涉条纹对光纤纤芯进行曝光即可形成光纤光栅。光栅周期主要是通过改变光束间的夹角或旋转光纤放置的方式来调整。该方法光路简单,但是对光源的相干性有很高的要求,需要系统具有高稳定性。1989 年,美国技术研究中心 Meltz 等^[6]利用侧写技术使用两束相干紫外光源形成干涉条纹照射掺锗光纤从而在光纤纤芯中刻写了 FBG,与之前的驻波干涉法相比刻写效率有了显著的提高,这促使人们对光纤光敏性研究和光纤光栅的形成方式产生了浓厚的兴趣。

3) 相位掩模法:这是目前最有效、应用最多的一种方法。相位掩模板通常是在石英板表面刻写的周期性结构,是一种衍射光学元件。相位掩模法是利用相位掩模板的抑制 0 级、增强 1 级的衍射功能,将入射光束分为 +1 和 -1 级衍射光束,它们的光功率相等,两束激光干涉形成明暗相间的条纹,照射到光敏光纤,使纤芯的折射率周期性调制,形成光纤光栅。利用相位掩模法制备光纤光栅操作简单、易于制备,并且光栅周期只与相位掩模板的周期有关。相位掩模法的缺点是掩模制作复杂,且每种掩模通常只能制造一种周期的光纤光栅。1993 年,美国贝尔实验室和加拿大通信研究中心^[7]分别提出了将紫外线以一定的夹角照射相位掩模板,进而靠近相位掩模板的光敏光纤纤芯中,相位掩模光栅条纹垂直于光轴,形成折射率周期性扰动,利用相位掩模紫外曝光法在单模光敏光纤中制备了 FBG。1996 年, Vengsarkar 等^[8]通过对掺锗硅酸盐光纤的载氢处理,利用紫外激光 ($248\ \text{nm}$) 经过振幅掩模板聚焦于光纤上,刻写了世界上第一根 LPFG。

4) 激光直写法:利用聚焦激光束在光纤上逐点曝光而形成光栅,先将聚焦光束在光纤纤芯的某一点上进行曝光,待曝光完成后,将曝光点在纤芯上通过控制光纤固定逐渐移动光束或者光束固定逐步移动光纤,移动一个周期再进行曝光,如此重复而形成纤芯折射率的周期性调制,即为光纤光栅。目前,常见的有 CO_2 激光逐点写入法、飞秒激光写入法等,该方法具有光栅周期便于控制、可对光栅的折射率调制结构进行任意设计等优点。

3 中红外光纤光栅制备研究进展

中红外软玻璃光纤与石英光纤的软化温度、机械强度和物化特性等具有极大的差别,目前成熟的石英光纤光栅的制备技术在面对中红外软玻璃光纤时受到诸多局限,中红外光纤光栅的制备技术仍存在着巨大的挑战,诸多学者对其开展了深入的研究,并取得了丰富的成果。

3.1 氟化物光纤光栅

氟化物光纤尤其是 ZBLAN ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$) 光纤在可见、近红外和中红外波段具有低

损耗传输性能,被广泛应用于中红外光纤激光器中。由于 ZBLAN 光纤没有光敏性,基于紫外光源干涉的刻写光栅技术无法适用于氟化物光纤光栅的制备。一种可行的方法是在 ZBLAN 玻璃基质中掺杂稀土元素,以提高其光敏性。稀土掺杂氟化物光纤光栅的研究始于 1994 年, Taunay 等^[9]在 Cr^{3+} :ZBLAN 光纤中使用紫外光刻获得了反射率约 10% 的光纤光栅。2013 年, Saad 等^[10]在 $\text{Cr}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 共掺 ZBLAN 光纤中利用 248 nm 的准分子激光器制备了反射率为 96% 的 FBG。虽然紫外连续激光可以制备氟化物光纤光栅,但由于其为线性吸收,光刻时需要利用材料的光敏性,刻写光栅的折射率调制度较小,热学稳定性和抗激光损伤阈值低。相较而言,飞秒激光刻写光纤光栅是利用材料的非线性吸收效应,制备的光纤光栅具有较高的折射率调制度和热学稳定性。而且利用飞秒激光刻写光纤光栅不依赖材料的光敏性,制作时无需对光纤进行额外的敏化处理,可大大降低生产消耗与成本。因此利用飞秒激光刻写氟化物光纤光栅开始成为获得高质量和高稳定性光纤光栅的最有效方法,是制备高质量氟化物光纤光栅最成功的技术。飞秒激光制备氟化物光纤光栅主要包括相位掩模法和激光直写法。

在相位掩模法制备稀土掺杂氟化物光纤光栅研究方面:2007 年,加拿大拉瓦尔大学的 Bernier 等^[11]利用波长 800 nm、重复频率 1 kHz、脉冲宽度 115 fs 的飞秒激光脉冲在 Tm^{3+} 掺杂和未掺杂的 ZBLAN 光纤中利用相位掩模技术分别写入了约 5 mm 长的 FBG,获得了 10^{-3} 量级的折射率调制,但制备的光栅在 125 °C 的热处理 30 min 后最大折射率调制度减小了 50%;2009 年,拉瓦尔大学 Bernier 等^[12]又在高掺 Er^{3+} :ZBLAN 双包层光纤中制备了中心波长为 2.82 μm ,反射率为 95%

的 FBG,搭建了 FBG 作为反馈的中红外全光纤激光器,得到了 5 W 的激光输出功率,激光转换效率达到 32%;2015 年,加拿大拉瓦尔大学的 Fortin 等^[13]利用 800 nm 的飞秒激光脉冲在 ZBLAN 光纤中通过相位掩模技术制备了中心波长为 2.938 μm ,反射率大于 99% 的高反射率 FBG,将其熔接到 10 m 长的掺 Er^{3+} :ZBLAN 光纤中,并在掺铒氟化物光纤一端写入了相同中心波长但反射率仅为 15% 的低反射率光栅,在 2.94 μm 处得到了高达 30.5 W 的连续激光输出功率,其实验装置如图 1(a) 所示;2018 年,加拿大拉瓦尔大学的 Aydin 等^[14]在 6.5 m 长的 Er^{3+} :ZBLAN 光纤两端使用 800 nm 的飞秒脉冲和扫描相位掩模技术,写入了中心波长为 2.82 μm ,反射率分别为 99.5% 的高反射率和 8% 的低反射率 FBG,采用双向同时泵浦得到了 2.82 μm 波长处 41.6 W 的激光输出功率,是迄今为止中红外光纤激光器的最大平均输出功率,其实验装置如图 1(b) 所示;2019 年,拉瓦尔大学的 Maes 等^[15]利用 800 nm 的飞秒激光脉冲在 2.5 m 长高掺杂 Er^{3+} :ZBLAN 光纤两端采用相位掩模技术写入了中心波长为 3.42 μm ,反射率分别为 96% 的高反射率和 55% 的低反射率光栅,利用 1976 nm 和 976 nm 激光同时泵浦掺杂光纤的纤芯和包层,在 3.42 μm 激光波长处得到了高达 38.6% 的激光输出效率。相位掩模法制备光纤光栅具有较高的光学质量和较好的重复性,已经被成功地应用于各种中红外光纤激光器中。但相位掩模法每次只能写入特定波长的光纤光栅,且对于双包层光纤和光子晶体光纤等复杂结构的光纤光栅的制备存在较大的困难;此外,由于相位掩模板与光纤相隔很近,相位掩模板的低损伤阈值限制了飞秒激光可使用的脉冲能量范围。

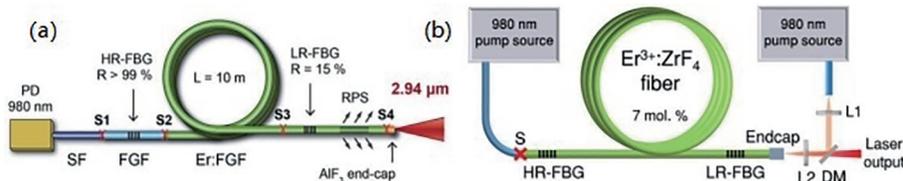


图 1 氟化物光纤激光器装置示意图。(a)工作在 2.94 μm 的 30.5 W 的全光纤激光器的实验装置^[13]; (b)工作在 2.82 μm 处 41.6 W 的氟化物光纤激光器的实验装置^[14]

Fig. 1 Schematic diagram of fluoride fiber laser device. (a) Experimental setup of 30.5 W all-fiber laser operating at 2.94 μm ^[13]; (b) experimental setup of 41.6 W fluoride fiber laser operating at 2.82 μm ^[14]

在飞秒激光直写制备稀土掺杂氟化物光纤光栅研究方面:2013 年,澳大利亚悉尼大学的 Hudson 等^[16]在 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺的 ZBLAN 光纤中利用 800 nm、120 fs 飞秒激光脉冲逐点写入了 20 mm 长、中心波长 2.9 μm 和周期为 986 nm 的布拉格光纤光栅;2017 年,澳大利亚麦考瑞大学的 Bharathan 等^[17]在未剥除涂覆层的 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺的双包层有源 ZBLAN 光纤中采用飞秒激光(800 nm、115 fs)逐行写入法刻写了 15 mm 长的二阶 FBG,中心波长为 2.88 μm ,反射率约为 50%;

2018 年,日本大阪大学的 Goya 等^[18]采用波长较短的 513 nm 飞秒激光在双包层掺 Er^{3+} :ZBLAN 光纤中写入了 2.5 mm 长、中心波长 2.8 μm 和周期 0.947 μm 的一阶光栅,折射率调制为 1.1×10^{-3} ,反射率达到 97%,用于光纤激光器中得到了高达 29.1% 的激光输出效率。

飞秒激光直写法制备光纤光栅结构灵活,可以在双包层或微结构光纤中直写出高质量的光栅结构。为了得到低插入损耗与理想光谱特性的光栅结构,在氟

化物光纤中形成的光纤光栅主要为 type-I 型调制, 折射率调制深度不够, 模式重叠系数小, 且写入时间长, 对三维位移平台的精度要求较高^[19]。此外, 作为高反射率腔镜的光栅结构, 在高激光功率作用下由于结构吸收产生声子振动引起光栅区局部温度升高, 导致光纤光栅中心波长的漂移, 需要做冷却处理或者在结构设计时做补偿。

目前, 国际上在稀土掺杂氟化物光纤获得中红外波段激光输出的研究报道基本都是基于商用的稀土掺杂氟化物玻璃光纤, 多为法国 Le Verre Fluoré 公司和日本

Fiberlabs 公司生产, 国内目前科研机构报道的激光输出实验中所使用的氟化物光纤也大多是从这两家公司购买, 价格非常昂贵, 且性能参数严重受限, 光纤具体参数见表 1。近年来, 国内在低损耗氟化物光纤制备方面也开展了大量的研究, 如中国科学院上海光学精密机械研究所和哈尔滨工程大学等研究团队在氟化物玻璃 (ZrF₃ 基、AlF₃ 基和 InF₃ 基玻璃) 方面取得了卓有成效的系列研究成果, 并实现了稀土掺杂光纤激光输出^[20-24], 但总体而言, 国内在低损耗氟化物光纤制备、光纤光栅刻写和激光性能方面与国际水平仍有一定的差距。

表 1 典型商业氟化物光纤产品的性能参数

Table 1 Performance parameters of typical commercial fluoride fiber products

Company	Fiberlabs		Thorlabs		Le Verre Fluoré	
	AlF ₃ -based	ZBLAN	ZBLAN	InF ₃ -based	ZBLAN	InF ₃ -based
Type						
Transmission range / μm	0.35-3.50	0.3-4.0	0.29-4.50	0.30-5.50	0.3-4.3	0.3-5.5
Core refractive index	1.46	1.51	—	—	—	—
Core diameter / μm	200	9	9	9	6.5	16
Numerical aperture	0.22	0.16-0.26	0.19	0.26	0.08-0.35	0.2
Typical loss / (dB·m ⁻¹)	<0.1@	<0.1@1.5 μm	<0.2 dB/m	<0.45 dB/m	≤0.05 dB/m	≤0.2 dB/m
	2.9 μm	0.3@4 μm	@2.3-3.6 μm	@3.2-4.6 μm	@0.3-3.4 μm	@3.4-4.0 μm
Core diameter deviation / %	<5.0	<11.1	<5.6	<5.6	—	—

3.2 硫系光纤光栅

硫系玻璃是一种优良的红外玻璃材料, 在光学上具有极宽的红外透过范围、高的线性和非线性折射率、极低的声子能量等优点, 可以用于制备衍射光栅、波导和光纤结构, 引起研究人员的极大兴趣, 成为可替代石英材料实现红外光子调控的理想材料^[25]。随着硫系光纤制备技术的进步, 硫系光纤光栅的研究也引起了学者们的密切关注。硫系玻璃光纤光栅的制备方法与石英和氟化物光纤光栅相似, 主要采用双光束全息干涉法、掩模法以及逐点直写法, 光刻光源包括连续激光和飞秒激光。

由于硫系玻璃在可见及紫外区域具有特殊的光敏性, 因此可以利用该波段的连续激光刻写硫系光纤光栅。1995年, 日本北海道大学的 Tanaka 等^[26]报道了利用输出功率 5 mW, 波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光器, 通过全息干涉在硫化砷 (As₂S₃) 光纤中制备了反射波长为 1.55 μm 的 FBG, 但刻写的硫系光纤光栅的热稳定性较差, 低温退火便可将光栅擦除。1998年, 加拿大拉瓦尔大学 Meneghini 等^[27]成功地利用 800 nm 飞秒激光的双光子吸收效应, 在 2 mm 的 As₂S₃ 硫系玻璃上制备了高质量的光栅结构, 其折射率调制度较大, 光学显微镜下便可看到清晰的光栅结构。2008年, 澳大利亚悉尼大学的 Eggleton 等^[28]利用低功率的 785 nm 连续激光干涉在单模硒化砷 (As₂Se₃) 光纤中制备了通信波段的 FBG, 获得了 1.55 μm 的反射带隙, 折射率调制度高达 10⁻³ 量级。2011年, 加拿大麦吉尔大学的 Ahmad 等^[29]分别利用工作波长 633 nm 和 1.55 μm 的

激光在 As₂Se₃ 拉锥光纤中制备了通信波段的 FBG, 并研究了其光致折射率的变化规律, 基于亚微米 As₂Se₃ 的光纤光栅有力地促进了非线性光学设备以及中红外光纤传感的发展。2017年, 南昌大学邹林儿等^[30]利用 532 nm 激光结合 +1/-1 级相位掩模板在 As₂S₃ 光纤中刻写出 FBG, 平均折射率变化随曝光时间可达 10⁻³ 数量级。2020年, Cai 等^[31]报道了在锥形的 As₂S₃ 玻璃光纤上使用 532 nm 波长的近带隙干涉图案刻写了中红外微 FBG。在约 4.5 μm 的波长下, 光纤光栅具有 15 dB 的消光比和 2 × 10⁻² 的正光致折射率变化, 制备示意图如图 2 所示。

虽然连续激光具有较高的光束质量, 刻写硫系光纤光栅时光路简单, 但由于其为线性吸收, 光刻时需要利用材料的光敏性, 对照射激光存在明显的波长依赖, 且刻写的光栅的折射率调制度较小, 热学稳定性和抗激光损伤特性较差, 众多实验中虽能观察到明显的光学带隙, 但制备的光纤光栅均未见其在光纤激光器及传感领域应用的报道。相较而言, 飞秒激光直写技术是制备高质量硫系光纤光栅的最有力手段。2008年, 美国海军实验室 Florea 等^[32]利用工作波长 800 nm 飞秒激光直写技术在 As₂S₃ 光纤中获得了周期为 4 μm 的光纤光栅 (图 3), 其制备的光栅的最大折射率调制度达到 0.06, 为飞秒激光脉冲直写制备硫系光纤光栅奠定了研究基础。2013年, 加拿大拉瓦尔大学的 Bernier 等^[33]利用 800 nm 飞秒激光在包含 polymer 保护层的 As₂S₃ 光纤中光刻出 FBG, 并利用制备的光纤光栅搭建出全硫系玻璃光纤拉曼激光器, 获得了 3.34 μm 的

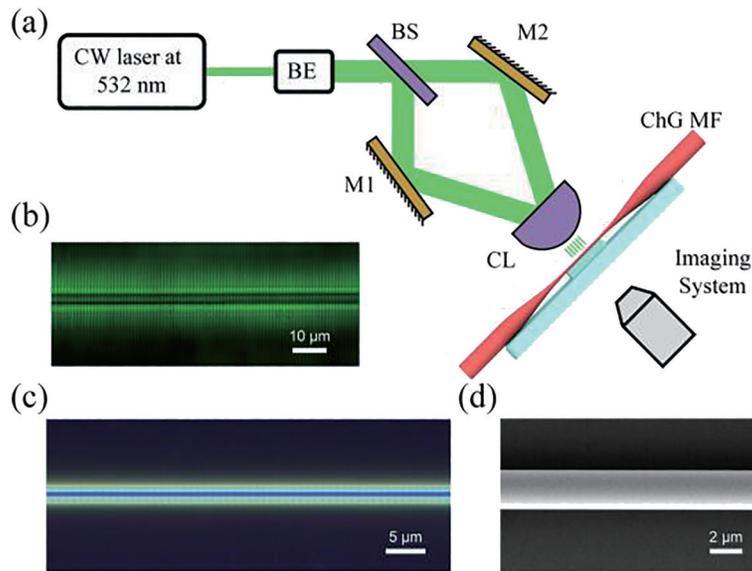


图 2 硫系光纤微FBG的制备过程^[31]。(a)光栅制备装置示意图;(b)光栅制备过程中成像系统的典型光学显微照片;直径为 2.4 μm 的硫系微FBG的(c)光学显微照片和(d)SEM图像

Fig. 2 Fabrication process of chalcogenide fiber micro-FBG^[31]. (a) Schematic diagram of grating fabrication device; (b) typical optical micrograph of imaging system during grating fabrication process; (c) optical microscope image and (d) SEM image of chalcogenide micro-FBG with diameter of 2.4 μm

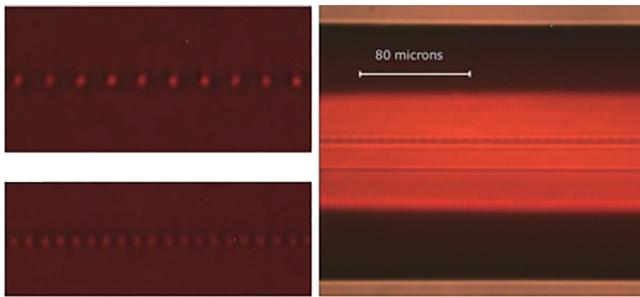


图 3 利用飞秒激光直写在硫系玻璃块体和光纤中制备的光栅结构^[32]

Fig. 3 Grating structures fabricated in chalcogenide glass bulk and fiber by femtosecond laser direct writing^[32]

激光输出。2014年, Bernier等^[34]又利用飞秒激光在单模As₂S₃光纤中刻写光纤光栅, 搭建出级联拉曼光纤激光器, 实现了3.77 μm的中红外激光输出, 这是目前在硫系拉曼光纤激光器中的最长输出波长。

在硫系光纤光栅的飞秒光刻制备过程中, 折射率调制度的精确控制是实现高质量光纤光栅的关键, 由于硫系玻璃的物化和光学特性与传统石英玻璃存在较大的不同, 该问题的研究仍面临不小的挑战。法国国家科学中心(CNRS)的Masselin等^[35]在研究飞秒激光诱导As₂S₃折射率变化时发现, 在低功率激光作用下, 玻璃折射率的变化与激光功率的分布基本呈线性关系; 当激光功率超过某一阈值后, 玻璃折射率呈现奇怪的变化, 在激光能量密度较大的中心区域折射率变化为正值, 而在边缘区域为负值。飞秒激光诱导硫系玻璃折射率变化的奇异特性对于精确调控光纤光栅的折射率变化提出了极大的挑战, 由于飞秒激光与硫系玻

璃的相互作用包含复杂的能量吸收、传递和转化过程, 飞秒激光诱导硫系玻璃折射率变化机理及调控方法仍有待深入探索。

除激光写入法和掩模法以外, 研究人员还利用机械应力和超声波等方法获得了硫系光纤光栅。2006年, 澳大利亚悉尼大学Eggleton等^[36]利用机械应力装置(图4)将螺纹杆压在6 μm纤芯的As₂Se₃光纤上制备了LPFG, 获得了1.55 μm的透射带隙, 最后通过加热光栅装置监测透射光谱, 在1540 nm处测量的波长偏移为0.43 nm/°C, 这大约比使用同样的工艺在石英光纤中制备的LPFG大一个数量级。2008年, Eggleton等^[37]利用830 kHz超声波共振技术在As₂Se₃写入了135 mm的LPFG, 光栅周期约为0.76 mm, 获得了1.55 μm的透射带隙, 并将其成功应用于超快光开关中, 基于LPFG的As₂Se₃光纤全光开关具有50 W的开关功率, 这比之前在二氧化硅中报道的低两个数量级, 为锁模激光器和低功率信号再生的开关器件发展提供了有利的途径。

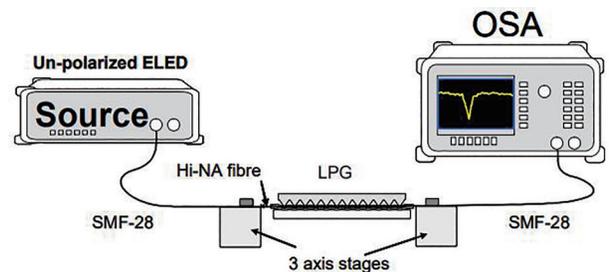


图 4 机械应力装置制备LPFG示意图^[36]
Fig. 4 Schematic diagram of LPFG fabrication by mechanical stress device^[36]

3.3 碲酸盐光纤光栅

碲酸盐玻璃具有较高的折射率和光学非线性, 较低的声子能量, 耐腐蚀、低熔融温度高辐射率以及机械强度高优点, 从可见光到中红外区域 ($< 6 \mu\text{m}$) 的传输性能良好。碲酸盐光纤光栅是一种很有发展前景的光子学材料, 可应用于非线性光学开关、光学放大器和激光器设备中, 已成为生物、化学和气体传感应用中的理想光纤主体。

由于碲酸盐光纤对于紫外吸收非常大, 所以这种光纤可以通过紫外辐射的方法来刻写光栅结构。2003年, Fujiwara 等^[38]发现, 掺铒的碲酸盐玻璃在紫外准分子激光的照射下, 玻璃的折射率发生了大幅度的变化, 这种光致折射率变化适用于在碲酸盐掺铒光纤放大器中制作布拉格光栅。2009年, Suo 等^[39]使用脉宽为 120 fs 的 800 nm 飞秒激光和周期为 1697.33 nm 的相位掩模, 成功地在三芯的无源和有源碲酸盐光纤中刻写了 FBG 结构, 如图 5 所示, 二阶 FBG 共振在约 1694 nm

和 1677 nm 处的共振最强, 分别表现出 14.3 dB 和 10.6 dB 的反射率。此外, 还对中红外碲酸盐玻璃光纤中的 FBG 热响应特性进行了探索, 当有源三芯的碲酸盐 FBG 温度从 10 °C 升高到 60 °C 时, 平均温度热响应性约为 20 pm/°C。最后, 碲酸盐光纤的应变特性测量表明, 碲酸盐光纤作为负载传感元件具有突出优势。2012年, Shi 等^[40]通过数值模拟在无源高折射率碲酸盐光纤中写入相移布拉格光栅, 可以在 100 mW 范围内使用阈值功率的厘米长激光器实现拉曼分布式反馈光纤激光器振荡, 其在红外波段的振荡距离远大于目前使用的稀土掺杂二氧化硅玻璃。2017年, Behzadi 等^[41]通过理论分析与结构设计研究了基于 π 相移 FBG 的中红外分布反馈 (DFB) 拉曼光纤激光器 (RFL) 的潜在性能特征, 将布拉格光栅写入低声子能量的碲酸盐与硒化砷 (As_2Se_3) 中红外光纤中。关于氟碲酸盐光纤光栅的研究国际上还鲜有报道, 这将是目前中红外波段研究领域的新焦点, 需要人们进一步去挖掘其应用潜力。

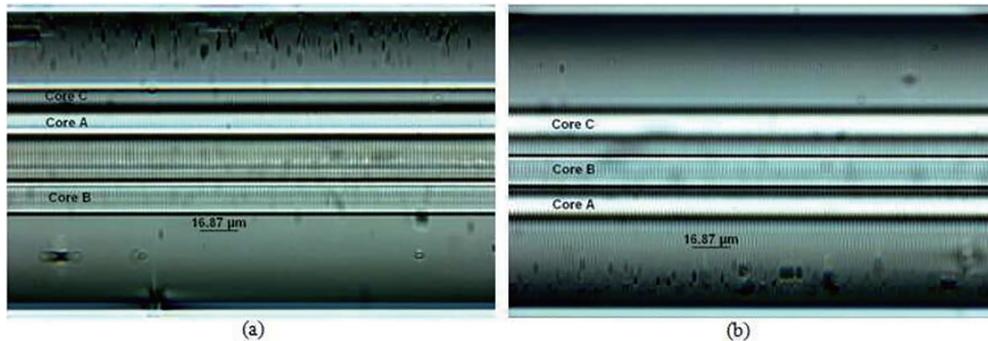


图 5 无源三芯碲酸盐 FBG 结构的显微图像^[39]。(a) 俯视图; (b) 侧视图

Fig. 5 Microscopic images of passive three-core tellurite FBG structures^[39]. (a) Top view; (b) side view

4 中红外玻璃光纤光栅的应用领域

4.1 中红外光纤激光器

中红外光纤激光器因其特殊的输出波长和良好的光束质量, 在军事对抗、生物医疗、环境监测、材料加工、科学研究等重要领域有着广泛的应用前景^[42-44]。1988年, 英国电信实验室的 Brierley 等^[45]在 Er^{3+} : ZBLAN 光纤中实现了波长 2.7 μm 处 191 mW 的中红外连续激光输出, 从而揭开了中红外光纤激光的研究序幕。中红外光纤光栅是构建高功率全光纤中红外激光器的基础。为了使中红外光纤激光器具有结构紧凑、工作稳定的全光纤结构, 更好地满足机载和军事等领域对高功率的需求, 世界各国研究人员展开了针对多种中红外光纤光栅的探索工作, 有力地促进了全光纤结构中红外光纤激光器的发展。

4.1.1 氟化物光纤激光器的应用

氟化物玻璃具有从紫外、可见到中红外波段宽的透光范围 (0.3~5 μm), 由于其光纤在 2.5~3.5 μm 波段的理论损耗仅为 10^{-3} dB/km, 20 世纪 70 年代被认为

是最有希望的超长波段的通信光纤材料。经过近 50 年的研究发展, 相继出现了以 ZBLAN ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$)、 InF_3 基、 AlF_3 基等几种为代表的氟化物玻璃体系光纤, 由于 AlF_3 基氟化物玻璃声子能量高, 难以实现 3~4 μm 波段激光输出, 因此研究集中于稀土掺杂 ZBLAN 和 InF_3 基光纤^[46]。

稀土掺杂氟化物光纤激光的研究始于 ZBLAN 光纤。早在 1987 年, 研究人员使用 Nd^{3+} 掺杂的多模 ZBLAN 光纤作为增益介质, 在 514 nm 氩离子激光器的泵浦下获得了 1 μm 波段的激光输出。随着增益光纤及激光技术的不断发展, 已经在 Er^{3+} 掺杂摩尔分数为 7% 的 ZBLAN 光纤中获得了 41.6 W 的 2.82 μm 的激光输出^[14], 这是目前为止在氟化物光纤激光中获得的最高功率。1992 年, 德国布伦瑞克工业大学的 Többen^[47]使用 655 nm 的染料激光器作为泵浦源, 12 cm 长的 Er^{3+} 掺杂摩尔分数为 1% 的 ZBLAN 光纤作为增益介质, 获得了 3.48 μm 及 3.54 μm 激光输出, 激光功率为 8.5 mW, 斜率效率为 2.8%, 这是首次在室温下获得波长大于 3 μm 的光纤激光输出。

掺 Er^{3+} 的 ZBLAN 光纤中获得的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段中红外激光波长约为 $3.5\ \mu\text{m}$ 。自从 1992 年实现 $3.5\ \mu\text{m}$ 的光纤激光输出之后,对 $3.5\ \mu\text{m}$ 激光的研究几乎停滞,直到 2014 年,澳大利亚阿德莱德大学的 Henderson-Sapir 等^[48]采用一种新型的泵浦方式—双波长泵浦,第二台泵浦激光器谐振腔由高反射率的 $1973\ \text{nm}$ 的 FBG 和另一端的菲涅耳反射构成。在 Er^{3+} 掺杂摩尔分数为 1% 的 ZBLAN 光纤中,将约 $3.5\ \mu\text{m}$ 激光的输出功率提高到 $260\ \text{mW}$,斜率效率提高到 16%。2016 年,加拿大拉瓦尔大学的 Fortin 等^[49]在 Er^{3+} 掺杂摩尔分数为 1% 的 ZBLAN 光纤中写入了 FBG 作为反馈及输出器件,同样采用 $974\ \text{nm}$ 及 $1976\ \text{nm}$ 的双波长泵浦的方式,获得了 $3.44\ \mu\text{m}$ 瓦级激光输出(功率 $1.5\ \text{W}$)。2017 年,加拿大拉瓦尔大学的 Maes 等^[50]在 Er^{3+} 掺杂摩尔分数为 1% 的 ZBLAN 光纤两端分别刻写了反射率为 90% 及 30% 的 FBG,搭建了一个单片集成的光纤激光腔,激光器结构如图 6 所示,将 $3.55\ \mu\text{m}$ 激光的功率提高到 $5.6\ \text{W}$,这也是目前国际上报道的功率最高的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的光纤激光。2018 年,加拿大拉瓦尔大学的 Jobin 等^[51]使用 $976\ \text{nm}$ 连续激光与 $1976\ \text{nm}$ 调 Q 脉冲激光双波长泵浦方式获得了 $3.552\ \mu\text{m}$ 波长处的增益调制激光输出,激光器由两个 FBG 构成,如图 7 所示,激光脉冲重复频率为 $15\ \text{kHz}$ 时的峰值功率为 $204\ \text{W}$ 。2019 年,拉瓦尔大学的 Maes 等^[15]在 $2.5\ \text{m}$ 长高掺杂 Er^{3+} :ZBLAN 光纤两端写入了中心波长 $3.42\ \mu\text{m}$ 、反射率分别为 96% 的高反射率光栅和 55% 的低反射率光栅,在 $3.42\ \mu\text{m}$ 激光波长处得到了高达 38.6% 的激光输出效率。虽然拉瓦尔大学利用飞秒激光刻写了作为反射腔镜的光栅结构,但还存在光栅插入损耗大、波长难于精确控制等问题。光纤尖端退化仍然是 $3\ \mu\text{m}$ 光纤激光器功率缩放和长期可靠性的主要问题之一。

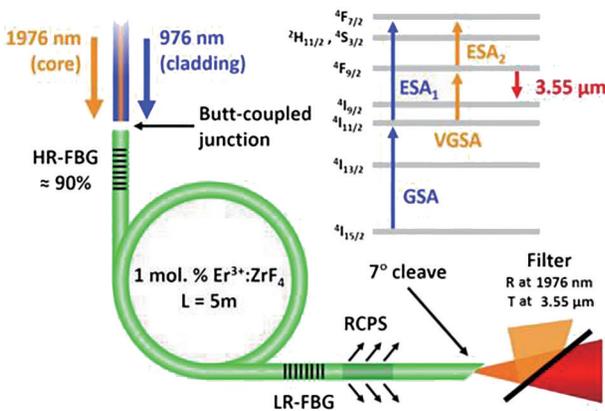


图 6 $3.55\ \mu\text{m}$ 全光纤激光器的结构^[50]
Fig. 6 Structure of $3.55\ \mu\text{m}$ all-fiber laser^[50]

在掺 Ho^{3+} 的 ZBLAN 光纤中获得的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段中红外激光波长主要约为 $3.9\ \mu\text{m}$ 和 $3.0\ \mu\text{m}$,在掺 Dy^{3+} 的 ZBLAN 光纤中获得的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的中红外

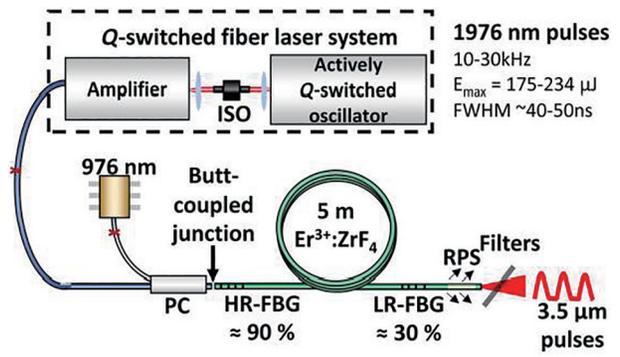


图 7 $3.55\ \mu\text{m}$ 增益开关光纤激光器原理图^[51]
Fig. 7 Schematic diagram of $3.55\ \mu\text{m}$ gain-switched fiber laser^[51]

激光波长主要为 $2.8\sim 3.4\ \mu\text{m}$,它们的中红外光纤激光输出研究现状如表 2 所示。从稀土掺杂 ZBLAN 光纤的 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 中红外激光输出研究情况不难看出,在稀土掺杂的 ZBLAN 光纤中可以获得较高功率的 $3\sim 3.5\ \mu\text{m}$ 波段激光输出,然而对于 $3.6\ \mu\text{m}$ 以上波段,激光功率和斜率效率非常低。综上所述,目前虽在 ZBLAN 光纤中获得了 $3.9\ \mu\text{m}$ 的激光输出,但是激光输出需要低温条件,且激光输出功率及效率很低。要提高中红外光纤激光输出功率及效率需使用具有更低声子能量的增益光纤, InF_3 基光纤是目前所有氟化物光纤中声子能量最低的,是研制高效率中红外光纤激光的理想材料,基于稀土掺杂 InF_3 基光纤的 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 中红外激光输出现状见表 2。

4.1.2 硫系光纤激光器的应用

硫系玻璃具有超低的声子能量 ($300\sim 450\ \text{cm}^{-1}$),硫系光纤的传输范围是所有玻璃光纤中最宽的(达到 $1\sim 12\ \mu\text{m}$),同时硫系玻璃还兼具极高的三阶非线性系数 ($10^2\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 量级,比石英高 2 个数量级,比氟化物高 3 个数量级)^[60]、极高的布里渊散射增益系数 g_B ($10^{-9}\ \text{m/W}$ 量级,比石英高 2 个数量级)^[61],以及极高的拉曼增益系数 g_R ($10^{-11}\ \text{m/W}$ 量级,比石英、氟化物高 2 个数量级)^[62]等优点。由于声子能量是造成光纤工作波长的关键,为了获得中红外光纤激光,要求增益光纤具有低声子能量,高拉曼增益系数,并在中红外波段的传输损耗较小,理论上硫系光纤是唯一可实现 $4\ \mu\text{m}$ 以上中红外拉曼激光的工作介质。近年来,利用硫系玻璃光纤拉曼频移效应已经取得突破性进展,已实现了 $3\ \mu\text{m}$ 以上波段中红外拉曼光纤激光输出。

在基于硫系玻璃光纤的拉曼激光器研究方面:2006 年,澳大利亚悉尼大学 Jackson 等^[63]利用工作波长为 $2051\ \text{nm}$ 的掺铊光纤激光器作为泵浦源,采用 As_2Se_3 光纤作为拉曼增益介质,实现了工作波长为 $2166\ \text{nm}$ 的拉曼激光输出,其输出功率约为 $16\ \text{mW}$,这是首次从实验上发现了硫系拉曼光纤激光输出,从而真正开启了中红外硫系光纤拉曼激光器研究的热潮。

表 2 稀土掺杂的氟化物玻璃光纤及 3~4 μm 中红外光纤激光输出研究现状

Table 2 Research status of rare earth doped fluoride glass fiber and 3-4 μm mid-infrared fiber laser output

Fluoride fiber	Year	Institution	Laser wavelength / μm	Laser power / mW	Reference
Ho ³⁺ doped ZBLAN fiber	1995	Brunswick University of Technology, Germany	3.92	1	[52]
	1997	Brunswick University of Technology, Germany	3.9	11	[53]
	2011	University of Sydney, Australia	3.002	770	[54]
	2015	University of Electronic Science and Technology of China	2.9-3	337	[55]
Dy ³⁺ doped ZBLAN fiber	2016	The University of Adelaide, Australia	3.26	80	[56]
	2018	The University of Adelaide, Australia	3.15	1.06 × 10 ³	[57]
	2016	Laval University, Canada	3.24	10 ⁴	[56]
Dy ³⁺ doped InF ₃ fiber	2018	The University of Adelaide, Australia	2.95	80	[58]
Ho ³⁺ doped InF ₃ fiber	2018	Laval University, Canada	3.92	200	[59]

2013年,加拿大拉瓦尔大学的 Bernier 等^[64]报道了利用工作波长为 3.005 μm 的掺钬氟化物光纤激光器作为泵浦源,采用 3 m 长的 As₂S₃ 光纤作为拉曼增益介质,并在 As₂S₃ 光纤的两端刻入 FBG,研制出工作波长为 3.34 μm 的全光纤拉曼激光器,如图 8 所示,其最大输出平均功率为 47 mW,相应的斜率效率为 39%。2014 年,

Bernier 等^[34]进一步采用级联的法布里-珀罗(F-P)腔结构在硫系光纤中实现了 3.766 μm 激光输出,这是迄今为止在拉曼光纤激光器中获得的最长工作波长,这一成果代表朝着在 3~5 μm 大气透明窗口中发射紧凑型激光源的发展迈出了重要的一步,激光器结构如图 9 所示。

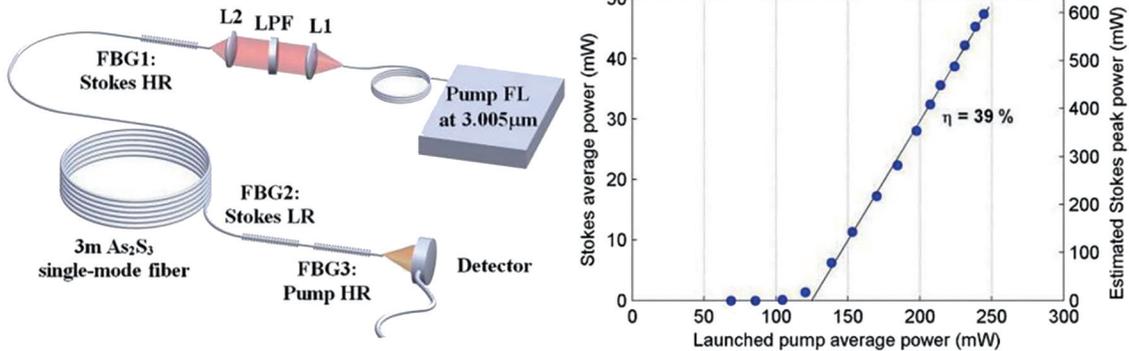


图 8 基于 As₂S₃ 光纤的 3.34 μm 级联拉曼激光器及激光平均输出功率与泵浦功率的关系^[65]

Fig. 8 3.34 μm cascaded Raman laser based on As₂S₃ fiber and relationship between average laser output power and pump power^[65]

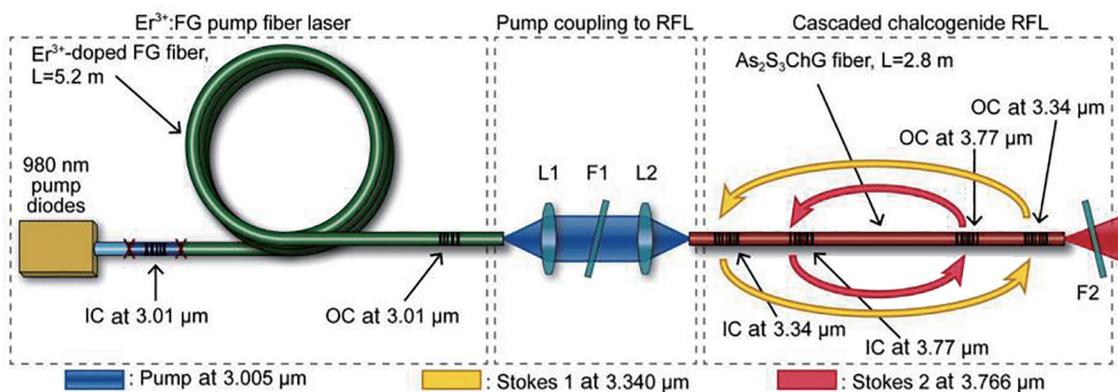


图 9 基于 As₂S₃ 光纤光栅的 3.77 μm 级联拉曼光纤激光器装置^[34]

Fig. 9 3.77 μm cascaded Raman fiber laser device based on As₂S₃ fiber grating^[34]

2019年,宁波大学研究团队^[65]通过数值模拟研究了利用 As₂Se₃ 光纤作为拉曼增益介质实现全光纤 4.3 μm 拉曼激光器的可行性。当泵浦光功率为 1.5 W 时,通

过一级拉曼频移技术可获得输出功率为 0.269 W 的 4.3 μm 激光输出,从理论上论证了利用硫系玻璃光纤作为拉曼增益介质研制 4~5 μm 波段中红外激光器的

可行性。级联拉曼光纤激光器因增益介质长、噪声低、调谐范围宽、可实现多波长输出、以及与光纤耦合效率高优点,尤其受到关注。但目前工作波长大于 $4\ \mu\text{m}$ 的硫系玻璃光纤拉曼激光器研究仍未见实验报道,这将是中红外激光器领域发展的新驱动力。

4.1.3 碲酸盐光纤激光器的应用

碲酸盐玻璃光纤的峰值拉曼增益系数是氟化物光纤的 35 倍,因此实现高效率中红外拉曼激光所需的光纤长度仅为米量级,这使得碲酸盐玻璃光纤可用于研制高效率中红外拉曼光纤激光器。1994 年,美国罗格斯大学 Wang 等^[66]制备了稀土离子掺杂碲酸盐玻璃光纤,其玻璃组分为 $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$ (TZN), 光纤的传输损耗约为 $1\ \text{dB/m}@1.4\ \mu\text{m}$ 。为了降低碲酸盐玻璃光纤的损耗,1998 年,日本电报电话公司 (NTT) 光子学实验室 Mori 等^[67]采用单质 Te (纯度 $> 6\text{N}$) 氧化法自制高纯 TeO_2 , 研制出低损耗的碲酸盐玻璃光纤,所使用的玻璃组分为 $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$ (TBZN), 与使用商用 TeO_2 作为原材料制得的光纤相比,光纤损耗从 $0.9\ \text{dB/m}$ 降低至 $0.054\ \text{dB/m}@1200\ \text{nm}$ 。2001 年, Mori 等^[68]通过进一步优化光纤制备工艺,将碲酸盐玻璃光纤损耗降低至 $0.02\ \text{dB/m}@1200\ \text{nm}$, 并利用其作为拉曼增益介质,实现了工作波长范围覆盖 $1490\sim 1650\ \text{nm}$ 的超宽带光纤拉曼放大器。2008 年,吉林大学秦冠仕等^[69]利用上述 Mori 等研制的低损耗碲酸盐玻璃光纤作为拉曼增益介质,采用 $1480\ \text{nm}$ 激光作为泵浦光,实现了工作波长范围覆盖 $1495\sim 1665\ \text{nm}$ 的宽调谐拉曼激光输出,其输出功率为数十毫瓦量级,该碲酸盐玻璃光纤的拉曼频移为 $22.3\ \text{THz}$, 拉曼增益系数为 $55\ \text{m}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$, 该实验结果证明了碲酸盐玻璃光纤在实现拉曼激光方面的可行性。2015 年,美国亚利桑那大学 Zhu 等^[70]通过数值模拟研究了利用碲酸盐玻璃光纤作为拉曼增益介质实现高功率 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 激光的可行性。基于一阶和二阶拉曼散射的拉曼碲酸盐光纤激光

器结构如图 10 所示,高反射(HR)FBG 用作腔镜,而部分反射(PR)FBG 用作输出耦合器。当泵浦光功率为 $20\ \text{W}$ 时,可实现输出功率为 $10\ \text{W}$ 的 $3.53\ \mu\text{m}$ 激光以及输出功率为 $1.5\ \text{W}$ 的 $4.36\ \mu\text{m}$ 激光^[71]。2020 年,吉林大学秦冠仕等^[71]又制备出一系列氟碲酸盐玻璃光纤,其损耗约为 $0.3\ \text{dB/m}@3.8\ \mu\text{m}$, 研制出工作波长范围覆盖 $0.93\sim 3.95\ \mu\text{m}$ 波段、可长期稳定运转的高功率全光纤超连续谱激光器,其输出功率达到 $22.7\ \text{W}$ 。目前国际上关于碲酸盐光纤光栅的应用研究还少有报道,这将是今后中红外领域研究方向的重点。

4.2 中红外光纤传感器

中红外光纤光栅除了在非线性光学领域有许多重要的应用外,在光纤传感方面也起着举足轻重的作用。中红外光纤光栅作为传感器具有抗电磁干扰、光学插入损耗小、体积小、重量轻、灵敏度高和抗恶劣环境等优异特性,并且可以克服传统石英光纤无法应用于 $2\ \mu\text{m}$ 以上波段的限制。根据光栅周期的长短,可以将中红外区域的传感应用分为 FBG 传感器和 LPFG 传感器。FBG 的芯-芯模耦合, LPFG 的芯-包层模耦合,形成光纤光栅的谐振波长对外界环境的变化非常敏感,如温度、折射率、应力、浓度和其他外部因素等,因此被有效地应用于光纤传感中。

2006 年, Pudo 等^[72]报道了在硫系 As_2Se_3 光纤中可广泛调谐的声光共振传感器,半峰全宽为 $17\ \text{nm}$ 的光共振深度可调至 $-9\ \text{dB}$, 可在 $1450\ \text{nm}$ 左右的 $235\ \text{nm}$ 范围内调谐,为全光处理和在中红外应用提供了可能性。2011 年, Ahmad 等^[29]在 PMMA 涂层亚微米的 As_2Se_3 拉锥光纤中制备了通信波段的 FBG, 光栅的消光比达到 $40\ \text{dB}$, 该器件为光纤传感和非线性设备在中红外光处理中的应用开辟了一条新道路。2017 年, Yang 等^[73]展示了一种基于锗碲硒 (Ge-Sb-Se) 硫系 LPFG 的温度传感器, 该传感器在 $3\ \mu\text{m}$ 的共振波长处的最大温度灵敏度可达到 $9.02\ \text{nm}/^\circ\text{C}$, 所设计的 LPFG 温度传感器对环境折射率具有极强的传感稳定性。2018 年, Zhang 等^[74]提出了一种基于 Ge-Sb-Se 的多模 FBG 的温度传感器, 通过将工作波长从通信范围转移到中红外区域, 传感器在 $3390\ \text{nm}$ 处的温度灵敏度超过 $0.16\ \text{nm}/^\circ\text{C}$, 比 $1550\ \text{nm}$ 处的温度灵敏度高 2.2 倍, 是石英 FBG 的 15 倍。2019 年, Wang 等^[75]报道了一种 LPFG 的高灵敏度温度传感器, 在多模锥形硫系光纤上刻写光栅, 通过减小锥形光纤的束腰直径来显著提高温度灵敏度, 当 LPFG 的周期为 $176\ \mu\text{m}$ 时, 在 $3\ \mu\text{m}$ 的共振波长下最大温度灵敏度达到 $12.6\ \text{nm}/^\circ\text{C}$, 可用于中红外光谱区域。2020 年, Cai 等^[31]展示了一个在亚波长直径的 As_2Se_3 微光纤上制备的中红外 FBG, 透射光谱在约 $4.5\ \mu\text{m}$ 的波长下, 微 FBG 具有 $15\ \text{dB}$ 的消光比和 2×10^{-2} 的光诱导折射率, 该器件在紧凑型中红外激光器、分子传感和 FBG 辅助参数放大器等领域具有潜在的应用价值。2021 年, She 等^[76]利用飞秒激光

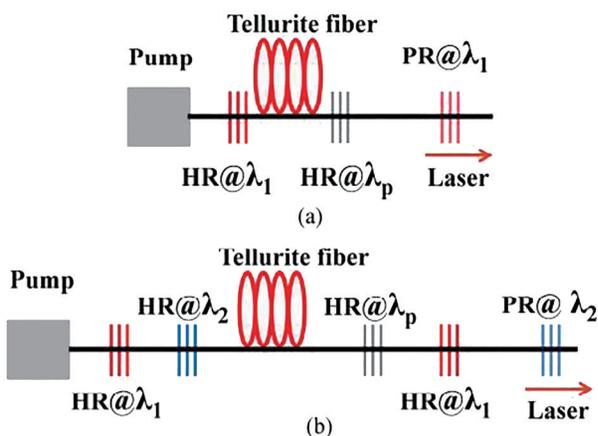


图 10 一阶(a)和二阶(b)拉曼碲酸盐光纤激光器示意图^[71]
Fig. 10 Schematic diagram of (a) first-order and (b) second-order Raman tellurite fiber lasers^[71]

在含氟化物光纤中制备了 LPFG, 通过在 LPFG 上施加 $0 \sim 2000 \mu\epsilon$ 的应变, 在中红外波长范围内的应变灵敏度高达 $4.23 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 传输光谱如图 11 所示, 可用于高灵敏度的应变传感器, 为中红外波长领域的新应用奠定了基础。

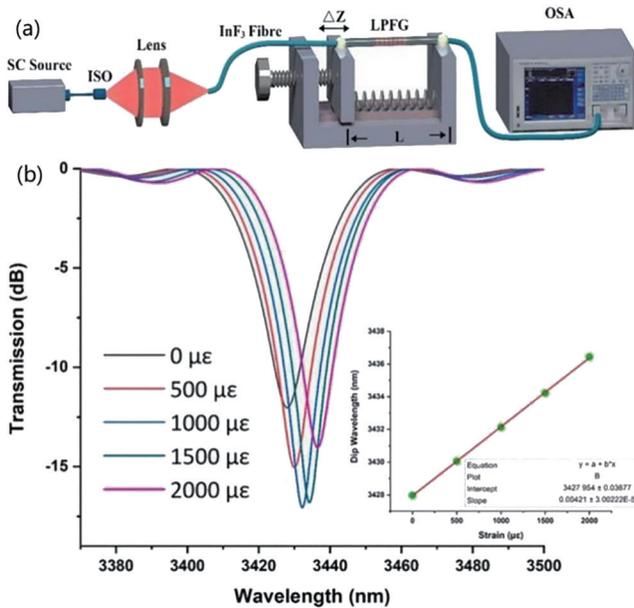


图 11 LPFG 应力传感器^[76]。(a) 实验装置; (b) 传输光谱
Fig. 11 LPFG stress sensor^[76]. (a) Experimental setup; (b) transmission spectrum

4.3 其他应用

由于中红外光纤光栅在中红外波段具有宽的工作范围和极高的非线性效应, 除上述红外拉曼激光器、光纤传感等领域有重要的应用外, 在光纤光开关、光学耦合器方面也扮演着十分重要的角色。

2008 年, Nguyen 等^[37]报道了一种基于 As_2Se_3 LPFG 的非线性全光开关, 使用声波在一根 135 mm 的硫系光纤中制备 LPFG, 利用皮秒脉冲调制到相对于光栅共振的不同波长, 得到脉冲峰值功率约为 50 W 的光开关, 功率阈值相比石英光纤中报道的光开关小两个数量级。2016 年, Fortin 等^[49]通过飞秒激光在 800 nm 处使用相位掩模直接写入 FBG, 将沉积在输入光纤尖端上的高反射分色镜和作为输出耦合器的 FBG 相结合, 产生稳定的激光发射, FBG 输出耦合器的反射率为 55%。2018 年, Heck 等^[77]在氟化物玻璃光纤中使用 800 nm 飞秒激光脉冲诱导长周期光栅, 获得了一 24 dB 衰减峰值, 将光栅热退火至 250°C 可显著降低诱导的折射率变化。这种光栅可以应用于各种集成中红外光学器件, 如光纤放大器中的光学陷波滤波器等。2019 年, 日本大阪大学和三菱钻石公司的研究人员^[78]同样利用改进型的纤-纤侧泵技术, 使用 513 nm 飞秒激光在有源光纤的两侧通过逐面刻写制作了两个高反射率(HR)和低反射率(LR)的 FBG, 并通过了一级主控振荡器的功率放大器(MOPA)放大将 $2.8 \mu\text{m}$

波长处激光功率有效提升至 33 W, 该结果是当前世界范围已报道的通过光纤耦合输入并放大后获得功率最高的光纤激光器, 也由此获得了全光纤泵浦机制中承受泵浦功率最高的耦合器。

5 展 望

随着激光和新材料技术的进步, 中红外波段的激光光源和光器件在国防建设和国民经济中的作用日益凸显。在中红外光纤激光器中, 光纤光栅是实现全光纤化红外激光器的关键光学器件; 而在中红外光纤传感器、光纤光开关和光纤滤波器等应用中, 光纤光栅也是不可或缺的组成元件。基于光纤光栅的光器件由于结构紧凑、易于维护、抗电磁干扰强等优点, 越来越受到研究者的重视。中红外光纤激光及光器件特殊的应用环境也对高质量中红外光纤光栅的性能提出了更高的要求。与石英材料相比, 软玻璃光纤光栅具有更高的折射率和光学非线性, 但其光学、热学和化学稳定性及机械损伤阈值更低, 特殊的应用场合亟需开发新型高稳定性中红外光纤基质材料。此外, 与可见光和近红外波段相比, 中红外玻璃光纤由于光学和热学稳定性较差, 高质量中红外光纤光栅制备技术仍存在巨大的挑战, 仍需不断地改进和完善。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [2] Toth L M, Quist A S, Boyd G E. Raman spectra of zirconium(IV) fluoride complex ions in fluoride melts and polycrystalline solids[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1973, 77(11): 1384-1388.
- [3] Mori A. Tellurite-based fibers and their applications to optical communication networks[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2008, 116(1358): 1040-1051.
- [4] Aggarwal I D, Sanghera J S. Development and applications of chalcogenide glass optical fibers at NRL [J]. Journal of Optoelectronic Advanced Materials, 2002, 4(3): 665-678.
- [5] 贾志旭, 郭晓慧, 焦亚东, 等. 基于特种玻璃光纤的中红外拉曼激光器研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101004.
Jia Z X, Guo X H, Jia Y D, et al. Progress on mid-infrared raman lasers based on special glass fibers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101004.
- [6] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 823-825.
- [7] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [8] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, et al. Long-

- period fiber gratings as band-rejection filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 58-65.
- [9] Taunay T, Niay P, Bernage P, et al. Ultraviolet-induced permanent Bragg gratings in cerium-doped ZBLAN glasses or optical fibers[J]. Optics Letters, 1994, 19(17): 1269-1271.
- [10] Saad M, Chen L R, Gu X J. Highly reflective fiber Bragg gratings inscribed in Ce/Tm co-doped ZBLAN fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(11): 1066-1068.
- [11] Bernier M, Faucher D, Vallée R, et al. Bragg gratings photoinduced in ZBLAN fibers by femtosecond pulses at 800 nm[J]. Optics Letters, 2007, 32(5): 454-456.
- [12] Bernier M, Faucher D, Caron N, et al. Highly stable and efficient erbium-doped 2.8 μm all fiber laser[J]. Optics Express, 2009, 17(19): 16941-16946.
- [13] Fortin V, Bernier M, Bah S T, et al. 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm [J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2882-2885.
- [14] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, et al. Towards power scaling of 2.8 μm fiber lasers[J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [15] Maes F, Stihler C, Pleau L P, et al. 3.42 μm lasing in heavily-erbium-doped fluoride fibers[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2170-2183.
- [16] Hudson D D, Williams R J, Withford M J, et al. Single-frequency fiber laser operating at 2.9 μm [J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2388-2390.
- [17] Bharathan G, Woodward R I, Ams M, et al. Direct inscription of Bragg gratings into coated fluoride fibers for widely tunable and robust mid-infrared lasers[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30013-30019.
- [18] Goya K, Matsukuma H, Uehara H, et al. Plane-by-plane femtosecond laser inscription of first-order fiber Bragg gratings in fluoride glass fiber for *in situ* monitoring of lasing evolution[J]. Optics Express, 2018, 26(25): 33305-33313.
- [19] 熊贤伟, 陈胜平, 朱宏田, 等. 飞秒激光直写高反射率中红外光纤布拉格光栅[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101014.
- Xiong X W, Chen S P, Zhu H T, et al. High reflectivity mid-infrared fiber Bragg grating by femtosecond laser direct inscription method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101014.
- [20] Huang F F, Liu X Q, Ma Y Y, et al. Origin of near to middle infrared luminescence and energy transfer process of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fluorotellurite glasses under different excitations[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8233.
- [21] Huang F F, Liu X Q, Hu L L, et al. Spectroscopic properties and energy transfer parameters of Er^{3+} -doped fluorozirconate and oxyfluoroaluminate glasses[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5053.
- [22] Huang F F, Ma Y Y, Li W W, et al. 2.7 μm emission of high thermally and chemically durable glasses based on AlF_3 [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 3607.
- [23] Wang S B, Li C Z, Yao C F, et al. $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped TeO_2 - BaF_2 - Y_2O_3 glasses for $\sim 1.2 \mu\text{m}$ laser applications [J]. Optical Materials, 2017, 64: 421-426.
- [24] Yao C F, He C F, Jia Z X, et al. Holmium-doped fluorotellurite microstructured fibers for 2.1 μm lasing[J]. Optics Letters, 2015, 40(20): 4695-4698.
- [25] 张豪, 郭海涛, 许彦涛, 等. 用于红外激光传输的硫系玻璃光纤研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101007.
- Zhang H, Guo H T, Xu Y T, et al. Research progress in chalcogenide glass fibers for infrared laser delivery[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101007.
- [26] Tanaka K, Toyosawa N, Hisakuni H. Photoinduced Bragg gratings in As_2S_3 optical fibers[J]. Optics Letters, 1995, 20(19): 1976-1978.
- [27] Meneghini C, Villeneuve A. As_2S_3 photosensitivity by two-photon absorption: holographic gratings and self-written channel waveguides[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1998, 15(12): 2946-2950.
- [28] Brawley G A, Ta'eed V G, Bolger J A, et al. Strong photoinduced Bragg gratings in arsenic selenide optical fibre using transverse holographic method[J]. Electronics Letters, 2008, 44(14): 846.
- [29] Ahmad R, Rochette M, Baker C. Fabrication of Bragg gratings in subwavelength diameter As_2Se_3 chalcogenide wires[J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 2886-2888.
- [30] 邹林儿, 何盼盼, 傅继武, 等. $+1/-1$ 相位掩模板和 532 nm 激光下低损耗 As_2S_3 硫系光纤布喇格光栅的制备[J]. 光子学报, 2017, 46(7): 0706001.
- Zou L E, He P P, Fu J W, et al. Fabrication of Bragg gratings in low-loss As_2S_3 chalcogenide fibers using $+1/-1$ phase mask and 532 nm laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(7): 0706001.
- [31] Cai D W, Xie Y, Wang P, et al. Mid-infrared microfiber Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2020, 45(22): 6114-6117.
- [32] Florea C, Sanghera J S, Aggarwal I D. Direct-write gratings in chalcogenide bulk glasses and fibers using a femtosecond laser[J]. Optical Materials, 2008, 30(10): 1603-1606.
- [33] Bernier M, Fortin V, Caron N, et al. Mid-infrared chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(2): 127-129.
- [34] Bernier M, Fortin V, El-Amraoui M, et al. 3.77 μm fiber laser based on cascaded Raman gain in a chalcogenide glass fiber[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2052-2055.
- [35] Masselin P, le Coq D, Bychkov E. Refractive index variations induced by femtosecond laser direct writing in the bulk of As_2S_3 glass at high repetition rate[J]. Optical Materials, 2011, 33(6): 872-876.
- [36] Pudo D, Mägi E C, Eggleton B J. Long-period gratings in chalcogenide fibers[J]. Optics Express, 2006, 14(9): 3763-3766.
- [37] Nguyen H C, Yeom D I, Mägi E C, et al. Nonlinear long-period gratings in As_2Se_3 chalcogenide fiber for all-optical switching[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(10): 101127.
- [38] Fujiwara T, Nakamoto T, Honma T, et al. Refractive index change induced by ultraviolet laser irradiations in

- erbium-doped tellurite glasses[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(22): 1576-1577.
- [39] Suo R, Lousteau J, Li H X, et al. Fiber Bragg gratings inscribed using 800 nm femtosecond laser and a phase mask in single- and multi-core mid-IR glass fibers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 7540-7548.
- [40] Shi J D, Alam S U, Ibsen M. Highly efficient Raman distributed feedback fibre lasers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5082-5091.
- [41] Behzadi B, Aliannezhadi M, Hossein-Zadeh M, et al. Design of a new family of narrow-linewidth mid-infrared lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(12): 2501-2513.
- [42] Tao G M, Ebendorff-Heidepriem H, Stolyarov A M, et al. Infrared fibers[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 379-458.
- [43] Zhao Z M, Wu B, Wang X S, et al. Mid-infrared supercontinuum covering 2.0-16 μm in a low-loss telluride single-mode fiber[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(2): 1700005.
- [44] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 423-431.
- [45] Brierley M C, France P W. Continuous wave lasing at 2.7 μm in an erbium-doped fluorozirconate fibre[J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(15): 935-937.
- [46] 徐昌骏, 张集权, 刘墨, 等. 基于钬掺杂 ZBYA 玻璃光纤的中红外激光研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(1): 0101016.
- Xu C J, Zhang J Q, Liu M, et al. Midinfrared laser in Ho^{3+} -doped ZBYA glass fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(1): 0101016.
- [47] Többen H. Room temperature cw fibre laser at 3.5 μm in Er^{3+} -doped ZBLAN glass[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(14): 1361-1362.
- [48] Henderson-Sapir O, Munch J, Ottaway D J. Mid-infrared fiber lasers at and beyond 3.5 μm using dual-wavelength pumping[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 493-496.
- [49] Fortin V, Maes F, Bernier M, et al. Watt-level erbium-doped all-fiber laser at 3.44 μm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 559-562.
- [50] Maes F, Fortin V, Bernier M, et al. 5.6 W monolithic fiber laser at 3.55 μm [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2054-2057.
- [51] Jobin F, Fortin V, Maes F, et al. Gain-switched fiber laser at 3.55 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1770-1773.
- [52] Schneider J. Fluoride fibre laser operating at 3.9 μm [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(15): 1250-1251.
- [53] Schneide J, Carbonnier C, Unrau U B. Characterization of a Ho^{3+} -doped fluoride fiber laser with a 3.9- μm emission wavelength[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(33): 8595-8600.
- [54] Li J F, Hudson D D, Jackson S D. High-power diode-pumped fiber laser operating at 3 μm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3642-3644.
- [55] Li J F, Luo H Y, Wang L L, et al. Tunable Fe^{2+} : ZnSe passively Q-switched Ho^{3+} -doped ZBLAN fiber laser around 3 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22362-22370.
- [56] Majewski M R, Jackson S D. Highly efficient mid-infrared dysprosium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2173-2176.
- [57] Woodward R I, Majewski M R, Bharathan G, et al. Watt-level dysprosium fiber laser at 3.15 μm with 73% slope efficiency[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1471-1474.
- [58] Majewski M R, Woodward R I, Carreé J Y, et al. Emission beyond 4 μm and mid-infrared lasing in a dysprosium-doped indium fluoride (InF_3) fiber[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1926-1929.
- [59] Maes F, Fortin V, Poulain S, et al. Room-temperature fiber laser at 3.92 μm [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 761-764.
- [60] Sanghera J S, Florea C M, Shaw L B, et al. Non-linear properties of chalcogenide glasses and fibers[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354(2/3/4/5/6/7/8/9): 462-467.
- [61] Abedin K S. Observation of strong stimulated Brillouin scattering in single-mode As_2Se_3 chalcogenide fiber[J]. *Optics Express*, 2005, 13(25): 10266-10271.
- [62] Thielen P A, Shaw L B, Pureza P C, et al. Small-core As-Se fiber for Raman amplification[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(16): 1406-1408.
- [63] Jackson S D, Anzueto-Sánchez G. Chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(22): 221106.
- [64] Bernier M, Fortin V, Caron N, et al. Mid-infrared chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 127-129.
- [65] Peng X F, Zhang P Q, Wang X S, et al. Modeling and simulation of a mid-IR 4.3 μm Raman laser in chalcogenide glass fibers[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(8): 2281-2292.
- [66] Wang J S, Vogel E M, Snitzer E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices[J]. *Optical Materials*, 1994, 3(3): 187-203.
- [67] Mori A, Kobayashi K, Yamada M, et al. Low noise broadband tellurite-based Er^{3+} -doped fibre amplifiers[J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(9): 887-888.
- [68] Mori A, Masuda H, Shikano K, et al. Ultra-wideband tellurite-based Raman fibre amplifier[J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(24): 1442-1443.
- [69] Qin G S, Liao M S, Suzuki T, et al. Widely tunable ring-cavity tellurite fiber Raman laser[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(17): 2014-2016.
- [70] Zhu G W, Geng L X, Zhu X S, et al. Towards ten-watt-level 3-5 μm Raman lasers using tellurite fiber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7559-7573.
- [71] Li Z R, Jia Z X, Yao C F, et al. 22.7 W mid-infrared supercontinuum generation in fluorotellurite fibers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1882-1885.
- [72] Littler I C M, Fu L B, Mägi E C, et al. Widely tunable, acousto-optic resonances in chalcogenide As_2Se_3 fiber[J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8088-8095.

- [73] Yang D D, Zhang P Q, Zeng J H, et al. SRI-immune highly sensitive temperature sensor of long-period fiber gratings in Ge-Sb-Se chalcogenide fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(18): 3974-3979.
- [74] Zhang Q, Zeng J H, Zhu L, et al. Temperature sensors based on multimode chalcogenide fibre Bragg gratings[J]. *Journal of Modern Optics*, 2018, 65(7): 830-836.
- [75] Wang L L, Ma W Q, Zhang P Q, et al. Design and analysis of long-period fiber gratings in tapered multimode chalcogenide glass fiber for temperature measurement[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(7): 1792-1798.
- [76] She L, Qi Q Y, Zhang P Q, et al. Mid-infrared fluorindate glass long-period fiber grating by femtosecond laser inscription[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 116: 103808.
- [77] Heck M, Nolte S, Tünnermann A, et al. Femtosecond-written long-period gratings in fluoride fibers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 1994-1997.
- [78] Uehara H, Konishi D, Goya K, et al. Power scalable 30-W mid-infrared fluoride fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(19): 4777-4780.