DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.03.017

我国关键有源光纤材料发展战略研究

宋向阳[1, 2, 3]，唐国武[4]，董国平[2, 3]，杨中民[1, 2, 3*]

（1. 华南理工大学物理与光电学院，广州 510640；2. 华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室，广州 510640；3. 广东省光纤激光材料与应用技术重点实验室，广州 510640；4. 广东工业大学物理与光电工程学院，广州 510006）

摘要：光纤激光器及放大器广泛应用于智能制造、生命健康、新一代信息技术以及国防军事等领域，而有源光纤是光纤激光器和放大器的关键材料。本文综述了红外波段（近红外1.0 μm、近中红外1.3~1.5 μm、中红外2.0~3.0 μm）关键有源光纤材料的研究进展，从增益系数、增益带宽、特种光纤应用等角度分析了国内外有源光纤材料的发展现状和趋势，指出了我国在该领域所面临的生产设备国产化率不高、高端工业化产品不足等问题，提出了我国关键有源光纤材料未来的重点发展思路、发展方向和发展目标。最后从基本理论自主创新、产业可持续发展、推动政策体系构建、高技术产品引领、全产业链循环发展、领域人才梯队培养等方面提出了对策建议，以期推动我国关键有源光纤材料领域优质、快速发展。

关键词：有源光纤材料；红外波段；光纤增益；光纤带宽

中图分类号：TN29　　**文献标识码：**A

Development Strategy of Key Active Optical Fiber Materials in China

Song Xiangyang[1, 2, 3], Tang Guowu[4], Dong Guoping[2, 3], Yang Zhongmin[1, 2, 3*]

(1. School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Fiber Laser Materials and Applied Techniques, Guangzhou 510640, China; 4. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Fiber lasers and amplifiers are widely used in intelligent manufacturing, life and health, new generation of information technology, national defense, and military fields. In addition, active optical fibers are key materials for fiber lasers and amplifiers. This study reviews the research progress of key active optical fibers in the infrared band (including near infrared 1.0 μm, 1.3–1.5 μm, and mid infrared 2.0–3.0 μm) and analyzes the research status and development trend of active optical fibers both in China and abroad from the perspectives of gain coefficient, gain bandwidth, and application of special fibers. Moreover, it explores the problems faced by China in this field, including a low localization rate of production equipment and lack of high-end industrialized products, and puts forward the key development strategies, directions, and goals of key active optical fibers in China. Furthermore, we propose several suggestions from the aspects of basic theoretical innovation, sustainable industrial development, policy system construction, high-tech products, circular development of the entire industry chain, and personnel training, thereby promoting the high-quality and rapid development of key active optical fibers in China.

Keywords: active optical fiber materials; infrared band; fiber gain; fiber bandwidth

收稿日期：2024-05-25；**修回日期：**2024-06-18

通讯作者：*杨中民，华南理工大学物理与光电学院教授，主要研究方向为激光光纤、光纤激光器及应用；E-mail: yangzm@scut.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“关键材料体系自立自强战略研究”(2022-PP-02)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

有源光纤材料是指具有激活离子掺杂的增益光纤，是当前光纤激光器与光纤放大器技术高速发展的核心材料基础。在当今世界进入百年未有之大变局的时代背景下，面对世界新工业革命飞速发展，数字化智能化的快速转型与普及，光纤材料成为大国竞争、国防科技、工业发展、数字化生产等方面不可或缺的战略性材料。保障我国关键有源光纤材料的可持续发展态势，突破我国在关键有源光纤材料领域的技术难题，确保我国战略性关键有源光纤材料的高质量发展与升级，事关国家国防科技、工业制造、信息化发展、数字化经济转型等多个重要领域。

我国在有源光纤材料领域需求巨大，尽管已实现了关键光纤材料产业链主要环节的自主可控，但上游原材料等部分关键环节仍然依赖进口，存在一定的短板。党的二十大报告提出，推动战略性新兴产业融合集群发展，构建新一代信息技术、人工智能、生物技术、新能源、新材料、高端装备、绿色环保等一批新的增长引擎。其中，新一代信息技术、新材料和高端装备的发展需求，为关键光纤材料的研制与工程化制备技术创新提供了发展机遇和战略政策支持。

鉴于对关键有源光纤材料及其制备技术需求的重要性和紧迫性，亟需对其开展全面且深入的创新研究。本文从多个波段关键有源光纤材料的增益特性、带宽特性、特种应用等角度开展分析，对比国内外关键光纤材料的发展现状，分析、研判我国相关领域面临的问题与挑战，提出我国关键有源光纤材料的未来发展思路和发展目标，并针对性给出相应对策建议，以期为推动我国关键有源光纤材料的发展提供借鉴。

二、国外关键有源光纤材料的发展现状

红外波段有源掺杂光纤在智能制造、生命健康、新一代信息技术以及国防军事等领域具有重要的应用价值。根据掺杂激活离子的发射波段，红外波段主要包括近红外 1 μm 波段、近中红外 1.3~1.5 μm 波段以及中红外 2.0~3.0 μm 波段。美国、欧洲等国家和地区作为激光光纤的技术发源地，经过长期的技术积累和工业设备试验，已在该领域形成一定的先发优势。

（一）近红外 1.0 μm 波段关键光纤材料

1.0 μm 波段作为激光光纤领域的一个重要波段，在高功率泵浦源、激光雷达、医疗以及科学研究等领域有较大的应用需求。1.0 μm 波段激光光纤材料通常采用镱（Yb^{3+}）或钕（Nd^{3+}）离子作为激活离子，可实现 909~1140 nm 范围的近红外激光输出，基质玻璃材料可选用石英玻璃或磷酸盐玻璃等。

1. 高增益光纤材料

为获得高增益激光光纤，可通过提高稀土离子掺杂浓度、稀土离子发射截面、材料折射率等方法来实现；相应的关键材料为高纯石英原料、磷酸盐光学玻璃以及高纯稀土原料。国外在高纯石英原料、磷酸盐光学玻璃等方面的研究开展较早，具有雄厚的材料工艺、设备和生产技术基础，目前商业化较成熟，在全球占有较大市场份额。

商用 Yb^{3+} 掺杂石英光纤的国外生产厂家主要有美国 Coherent 公司、加拿大 CorActive 公司、芬兰 LIEKKI 公司和英国 Fibercore 公司等。常规商用 Yb^{3+} 掺杂石英光纤的掺杂浓度约为 1.2×10^{20} ions/cm^3，在 1.0 μm 的增益系数约为 0.17 dB/cm[1]。相关研究机构包括英国的南安普顿大学、美国的亚利桑那大学、新加坡的南洋理工大学以及瑞典的中瑞典大学等。2019 年，美国亚利桑那大学报道的磷酸盐玻璃光纤的增益系数为 0.86 dB/cm @1030 nm[2]。基于磷酸盐玻璃材料的应用，稀土离子掺杂浓度得到了较大的提升，进而有效提高了有源光纤增益系数，这对稀土掺杂光纤在激光器及放大器领域的应用具有重要意义。

2. 宽带光纤材料

稀土离子的能级分裂会受到基质玻璃微观局域环境的影响，通过调控稀土掺杂纤芯玻璃的网格结构，可从材料角度实现增益带宽的拓展。此外，还可通过发射波长相近的稀土离子共掺的方式，来实现宽的增益带宽。2019 年，美国亚利桑那大学报道了放大自发辐射（ASE）谱的 3 dB 带宽为 10.4 nm 的磷酸盐玻璃 Yb^{3+} 掺杂光纤[3]。2021 年，新加坡南洋理工大学报道了一种 Yb^{3+} 掺杂 6 芯光纤，其 ASE 谱 3 dB 带宽达到了 31.6 nm[4]。国外鲜有报道在 1.0 μm 波段稀土离子共掺方式的宽带有源光纤。

3. 大模场激光光纤

在1.0 μm波段，为获得高功率光纤激光输出，大模场面积激光光纤也得到了广泛研究。为获得大模场面积光纤，最常见的方式是增大光纤芯径，但要获得单模激光输出，则需减小光纤数值孔径。然而，受制于材料本身特性，光纤的数值孔径不可能无限制减小，并且当数值孔径过小时，将会导致光纤传输损耗增大。当前商用大模场掺Yb^{3+}光纤的生产厂家主要有芬兰的LIEKKI公司，型号为Yb1200-30/250DC的双包层光纤和型号为Yb1200-30/250DC-PM的双包层保偏光纤；加拿大INO公司，型号为Yb-MCOF-35/250-07-2.5-PM的Yb^{3+}掺杂保偏光纤；美国Coherent公司，型号为PLMA-YDF-30/250-UFYb的掺杂保偏光纤等。光子晶体光纤、多芯光纤、多沟槽光纤等微结构光纤的出现极大地推动了单模大模场光纤的研究进展。早在2003年，德国Jena大学便报道了纤芯直径为28 μm的Yb^{3+}掺杂双包层光子晶体光纤[5]。2021年，新加坡南洋理工大学报道了模场面积达到1432 μm^2的多芯掺Yb^{3+}光纤[4]。

（二）近中红外1.3~1.5 μm波段关键光纤材料

1.3~1.5 μm波段是当前光纤通信的主要波段。1.3 μm波段主要应用于中长距离（40 km）光通信，稀土离子中镨离子（Pr^{3+}）发射覆盖该波段，因此Pr^{3+}掺杂玻璃光纤材料在光纤放大器领域具有重要的应用价值。由于铒离子（Er^{3+}）发射谱可以覆盖1.5 μm波段，同时Er^{3+}发射谱位于人眼安全波段，因此Er^{3+}掺杂关键光纤材料在光通信、遥感、医疗等领域具有广泛的应用价值。随着第五代移动通信技术全面商用，对高容量、高速率的光纤通信网络需求不断增加，作为现代光纤通信网络中的重要组成部分，Er^{3+}掺杂关键光纤材料具有重要的研究意义。此外，除了稀土离子外，重金属铋离子（Bi）掺杂光纤的增益范围也可覆盖1150~1700 nm，是通信波段的新型增益光纤材料。

1. 高增益光纤材料

Er^{3+}掺杂关键光纤材料的基质材料主要有石英玻璃、磷酸盐玻璃、硅酸盐玻璃和碲酸盐玻璃等。商用Er^{3+}掺杂光纤的生产厂家主要有美国Coherent公司、加拿大CorActive公司等。以美国Coherent公司为例，其Er^{3+}掺杂或Er^{3+}/Yb^{3+}共掺光纤产品种类丰富，约有30种不同类型的光纤，纤芯直径覆盖6~25 μm，包括保偏与非保偏多种类型。2020年，俄罗斯科学院报道了一种Er^{3+}/Yb^{3+}共掺石英光纤，通过P元素共掺，提升了石英光纤中稀土离子的掺杂浓度，最终在1550 nm处获得了0.55 dB/cm的增益系数[6]。2022年，巴基斯坦的朱夫大学报道了一种Pr^{3+}掺杂石英玻璃光纤放大器，其1310 nm理论小信号峰值增益可达56.4 dB[7]。2023年，英国南安普顿大学报道了一种Bi离子掺杂光纤放大器，在1435~1475 nm波段实现了20 dB的平坦增益，其3 dB带宽为50 nm[8]。2024年，英国阿斯顿大学报道了一种Bi离子掺杂光纤放大器，其增益达到39.8 dB，带宽可达73.5 nm，功率转化效率高达38%[9]。

2. 宽带光纤材料

通信波段按照波长区间可划分为O波段（1260~1360 nm）、E波段（1360~1460 nm）、S波段（1460~1530 nm）、C波段（1530~1565 nm）、L波段（1565~1625 nm）和U波段（1625~1675 nm）。其中O波段的光色散导致的信号失真最小，损耗最低，为早期的光通信波段，因此，被命名为O波段。E波段是5个波段中最不常见的波段，由于在1370~1410 nm波段存在OH^-离子的吸收带，所以导致传输损耗急剧加大，这个传输损耗凸点即水峰。在早期光纤制备工艺中，经常残留有水（OH^-）杂质，导致E波段的光在光纤中的传输衰减最高，难以用于通信传输。S波段光的传输损耗较O波段低，常被用于无源光网络系统的下行波长。C波段光的传输损耗最低，被广泛用于城域网、长途、超长途以及海底光缆系统。L波段光的传输损耗比C波段略低，当C波段光不足以满足带宽需求的时候，L波段光会作为补充用于光网络。U波段则主要用于网络监控。2004年，英国利兹大学报道了一种Er^{3+}/Tm^{3+}共掺的碲酸盐玻璃光纤，获得了覆盖1.35~1.6 μm的3 dB带宽约为160 nm的荧光发射[10]。2022年，马来西亚的马来亚大学报道了一种Bi/Er共掺石英光纤，其ASE谱的3 dB带宽达到57 nm[11]。通过Bi/Er共掺的方式，可有效拓宽Er^{3+}掺杂光纤的带宽，进一步丰富通信频段。

3. 特种光纤材料

基于传统的光通信系统传输技术，单波长传输速率已达到100 Tbit/s，逼近了理论香农极限。为进一步拓展通信容量，光纤通信的空分复用技术成为研究热点。可产生轨道角动量（OAM）光束的Er^{3+}

掺杂光纤在该领域展现出了潜在的应用前景。2017年，英国南安普顿大学报道了一种Er^{3+}环形掺杂的空心OAM光纤，在1565 nm波长处获得了15.7 dB的增益，并且在1555~1590 nm波段均可实现>10 dB的增益[12]。同年，日本藤仓（Fujikura）株式会社报道了一种环形芯结构的7芯少模Er^{3+}掺杂光纤并测试了其放大性能，其平坦平均增益可达20 dB[13]。

（三）中红外2.0 μm波段关键光纤材料

2.0 μm激光可广泛应用于工业加工、国防、医学、生物学、遥感、超快光学等领域。铥（Tm^{3+}）和钬（Ho^{3+}）离子均可直接产生2.0 μm波段的发射，是2.0 μm波段激光光纤中常用的激活离子。由于基质玻璃的声子能量对2.0 μm激光发射效率存在一定影响，较大的声子能量将会增大无辐射跃迁概率，降低辐射发光效率。因此2.0 μm波段关键光纤材料通常采用锗酸盐、碲酸盐、硅酸盐玻璃等。

1. 高增益光纤材料

2 μm波段商用光纤仍然是以石英玻璃基质为主。美国Coherent公司Nufern商用Tm^{3+}掺杂光纤（型号为SM-TSF-5/125）的增益系数为1 dB/cm[14]。iXblue公司的Ho^{3+}掺杂光纤在2069 nm处的增益系数为0.19 dB/cm[15]。对于2.0 μm波段稀土掺杂软玻璃光纤，由于需要保证基质材料较小的最大声子能量，重金属氧化物玻璃受到了重点关注，特别是锗酸盐玻璃，由于同时具备较小的最大声子能量（约900 cm^{-1}）、较好的抗析晶稳定性和化学稳定性，被认为是2.0 μm波段激光光纤的理想基质材料。

具有较好拉丝性能的锗酸盐玻璃最早在20世纪90年代由美国海军研究实验室报道[16]，其组分为$BaO\text{-}Ga_2O_3\text{-}GeO_2$（BGG玻璃），由于较复杂的制备工艺和重要的战略应用价值，BGG光学玻璃材料的具体配方和大尺寸块体玻璃制备技术长期被美国封锁，从而限制我国中红外激光光纤的发展。2021年，英国南安普顿大学报道了纤芯直径为20±0.5 μm的大模场面积单模Tm^{3+}掺杂锗酸盐玻璃光纤，并获得了波长为1925 nm的脉冲激光输出[17]。

2. 宽带光纤材料

由于Tm^{3+}与Ho^{3+}离子发射波长接近，可通过两种激活离子共掺的方式来拓宽2.0 μm波段的增益带宽。2019年，波兰的比亚威斯托克大学报道了一种Ho^{3+}/Tm^{3+}共掺锗酸盐玻璃光纤，其3 dB带宽达到377 nm，并在50 cm长的光纤中获得了波长为2070 nm的激光输出，但斜率效率仅为4.7%[18]；2022年，报道了$Ho^{3+}/Tm^{3+}/Er^{3+}$三掺的超宽带双包层锗酸盐玻璃光纤，测试得到ASE谱的3 dB带宽为415 nm[19]；2022年，比亚威斯托克大学又报道了一种近红外波段（1400~2200 nm）超宽带的双芯双包层锗酸盐玻璃光纤，两个纤芯分别为Tm^{3+}/Ho^{3+}共掺及Tm^{3+}/Er^{3+}共掺，在808 nm泵浦下其3 dB带宽为352 nm；在976 nm的泵浦下其3 dB带宽为346 nm[20]。此外，美国AdValue Photonics公司于2019年报道了一种多截面分区掺杂的Tm^{3+}/Ho^{3+}掺杂光纤，通过同时泵浦光纤纤芯的两种掺杂区域，使不同掺杂区域同时发光，在2.0 μm波段的带宽为160 nm[21]。分区掺杂光纤结构的出现为有源光纤的设计提供了全新的思路，既避免了多芯光纤难耦合的特点，又可解决多种稀土离子共掺时导致的非必要能量传递的问题，成为未来宽带高增益有源光纤的主流发展方向。

3. 特种光纤材料

2020年，英国南安普顿大学报道了环形Tm^{3+}掺杂石英光纤，有效地降低了光纤中的热负载，并成功抑制了长波区域（>1950 nm）的增益，最终实现了波长为1907.3 nm、斜率效率为65%、功率大于60 W的连续激光输出[22]。2020年，新加坡南洋理工大学报道了基于W-型阶跃折射率分布的Tm^{3+}掺杂光纤色散控制工程，并实验证明通过合理的色散设计可提升脉冲能量，以及在短波区域（1700~1800 nm）可实现高能锁模激光输出。基于W-型特种光纤，测得其3 dB带宽约为170 nm，并于1750 nm波长处获得了脉冲能量为32.7 nJ，重复频率为5.5 MHz，脉宽为2.76 ps的脉冲激光输出[23]。特种激光光纤材料的定制性较强，需要在光纤结构设计、激光介质材料设计与制备、复合结构预制棒制备以及光纤精密拉制等方面同时具备一定的技术和工艺积累，目前美国、英国、新加坡等在该领域位于世界前列。

（四）中红外3.0 μm波段关键光纤材料

3.0 μm波段激光处于分子指纹区，在医疗外科、气体检测、军事应用等领域都有重要的应用价值。石英玻璃在波长大于2.5 μm波段存在较强的吸收而无法使用，尽管硫系玻璃是目前工作波段范围最大（1.5~16 μm）的光纤基质材料，但其难以掺

入稀土离子，导致光纤增益系数较低。碲酸盐和锗酸盐玻璃的红外介质波长均可达到6 μm，且稀土离子的溶解度高，但由于OH^-在3.0 μm具有强烈的吸收，所以需要进一步降低碲酸盐和锗酸盐玻璃的羟基含量。氟化物玻璃工作波段为0.3~12 μm，具有低声子能量（500~600 cm^{-1}）和低损耗的优势，可以掺杂多种稀土离子，是当前中红外3.0 μm波段激光光纤最常用的基质材料，并已实现商业化。当前国际上氟化物（3 μm波段）关键光纤材料的主要生产公司有日本的Fiberlabs公司，法国的LeVerreFluore公司和美国的Thorlabs公司。3.0 μm波段激光光纤的激活离子主要有Er^{3+}、Ho^{3+}和镝离子（Dy^{3+}）三种，其中心波长分别位于2.7 μm，2.8 μm和3.0 μm。2010年，日本东京大学报道了基于FiberLabs公司生产的Er^{3+}掺杂氟化物玻璃多模光纤的10瓦级稳定激光输出[24]。2019年，加拿大拉瓦尔大学报道了基于Dy^{3+}掺杂氟化物光纤的10瓦级3.24 μm激光输出，该光纤由法国LeVerreFluore公司生产[25]。国外关键有源光纤材料的部分特性及参数见表1。

三、我国关键有源光纤材料的发展现状

我国从20世纪90年代开始逐步研发有源光纤材料，在国家科技重大专项、国家重点研发计划等国家级科技和产业计划的持续支持下，已从最初的激光光纤完全依赖进口发展至目前的基本可以自给。从近红外至中红外的激光光纤材料均已具备一定的自给率，且1.0 μm、1.3~1.5 μm以及2.0~3.0 μm波段的关键激光光纤材料已实现一定量的商业化。当前，国内的光纤生产公司主要有长飞光纤光缆股份有限公司和烽火通信科技股份有限公司，研究机构主要有华南理工大学、中国科学院上海光学精密机械研究所（简称上海光机所）、华中科技大学、中国科学院西安光学精密机械研究所、哈尔滨工程大

表1　国外关键有源光纤部分特性及参数

激活离子	对应波段/μm	光纤材料	光纤特性	增益系数/(dB·cm^{-1})	增益带宽/nm	参考文献
Yb^{3+}	1.0	石英	高增益系数	0.17	—	[1]
Yb^{3+}	1.0	磷酸盐玻璃	高增益系数	0.86	—	[2]
Yb^{3+}	1.0	磷酸盐玻璃	宽带	—	10.4	[3]
Yb^{3+}	1.0	石英	宽带	—	31.6	[4]
Yb^{3+}	1.0	石英	大模场特种光纤	—	—	[5]
Yb^{3+}	1.0	石英	多芯大模场特种光纤	—	—	[4]
Pr^{3+}	1.3	石英	高增益	—	—	[7]
Bi^{n+}	1.4	石英	高增益宽带	—	73.5	[9]
Er^{3+}/Yb^{3+}	1.5	石英	高增益系数	0.55		[6]
Er^{3+}/Tm^{3+}	1.5	碲酸盐玻璃	宽带	—	160（荧光发射）	[10]
Bi^{n+}/Er^{3+}	1.5	石英	宽带	—	57	[11]
Er^{3+}	1.5	石英	环形空心OAM特种光纤	—	—	[12]
Er^{3+}	1.5	石英	环形芯多芯少模特种光纤	—	—	[13]
Tm^{3+}	2.0	商用石英（Nufern）	高增益系数	1	—	[14]
Ho^{3+}	2.0	商用石英（iXblue）	高增益系数	0.19	—	[15]
Tm^{3+}	2.0	锗酸盐玻璃	单模大模场	—	—	[17]
Tm^{3+}/Ho^{3+}	2.0	锗酸盐玻璃	宽带	—	377	[18]
$Ho^{3+}/Tm^{3+}/Er^{3+}$	1.5~2.0	锗酸盐玻璃	宽带双包层	—	415	[19]
$Ho^{3+}/Tm^{3+}/Er^{3+}$	1.5~2.0	锗酸盐玻璃	宽带双芯双包层	—	352	[20]
Tm^{3+}/Ho^{3+}	2.0	石英	宽带多截面分区掺杂	—	160	[21]
Tm^{3+}	1.8	石英	环形稀土掺杂特种光纤	—	—	[22]
Tm^{3+}	1.8	石英	W-型阶跃折射率特种光纤	—	170	[23]
Er^{3+}	3.0	氟化物玻璃	商用氟化物光纤（FiberLabs）	—	—	[24]
Dy^{3+}	3.0	氟化物玻璃	商用氟化物光纤（LeVerreFluore）	—	—	[25]

学和吉林大学等。

（一）近红外 1.0 μm 波段关键光纤材料

在高增益光纤方面，2020 年，山东大学报道了一种 Yb: YAG 衍化的硅酸盐玻璃 Yb^{3+} 掺杂光纤，在 1064 nm 处的增益系数为 1.7 dB/cm[26]。2022 年，上海大学报道了一种 Yb^{3+} 掺杂的硅酸盐玻璃光纤，在 1030 nm 处的增益系数达到 6 dB/cm[27]。华南理工大学基于自主研发的 Yb^{3+} 掺杂磷酸盐激光玻璃，成功制备出高增益 Yb^{3+} 掺杂磷酸盐玻璃光纤，在 1.0 μm 波段的增益系数高达 10.08 dB/cm。高增益光纤为超短线性腔单频光纤激光器的研制提供了可能性。在宽带光纤方面，2018 年，上海光机所报道了 Nd^{3+}/Yb^{3+} 共掺的石英光纤，3 dB 带宽约为 31 nm[28]。2021 年，上海光机所报道了 3 dB 带宽约为 41.5 nm 的 Nd^{3+}/Yb^{3+} 共掺的硅酸盐玻璃光纤[29]。2023 年，华南理工大学报道了 3 dB 带宽为 60 nm 的 Nd^{3+}/Yb^{3+} 共掺磷酸盐纤芯硅酸盐包层玻璃光纤[30]。在 Yb^{3+} 掺杂特种有源光纤方面，上海光机所和华中科技大学投入了大量研究，成功制备了 Yb^{3+} 掺杂的光子晶体光纤。例如，2021 年上海光机所报道了一种纤芯直径为 40 μm 的 Yb^{3+} 掺杂保偏光子晶体光纤，并成功实现了平均放大功率为 103 W、斜率效率为 52% 的输出[31]。

（二）近中红外 1.3~1.5 μm 波段关键光纤材料

对于掺 Bi^{3+} 光纤，2022 年上海光机所报道了一种使用改进化学气相沉积法制备的 Bi^{3+} 掺杂石英光纤，并基于该光纤在 1355 nm 处获得了 20 dB 的净增益[32]。2023 年，华南理工大学报道了一种纤芯为 Bi^{3+} 掺杂锗酸盐玻璃的多组分玻璃光纤，在 808 nm 泵浦下，该光纤的 ASE 谱覆盖 1000~1600 nm，3 dB 带宽约为 450 nm[33]。在 1.5 μm 高增益光纤方面，华南理工大学报道了增益系数高达 9.13 dB/cm 的 Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺多组分磷酸盐玻璃光纤[34]。2022 年，华中科技大学报道了增益系数约为 0.09 dB/cm 的 Er^{3+} 掺杂石英玻璃光纤[35]。在宽带光纤方面，2023 年华南理工大学报道了 3 dB 带宽为 120 nm 的 Er^{3+} 掺杂锗酸盐玻璃光纤[36]。2024 年，上海光机所报道了一种 Er^{3+} 掺杂硅酸盐玻璃光纤，该光纤在 1625 nm 处的增益系数达到 0.047 dB/cm[37]。在特种有源光纤领域，华中科技大学、华南师范大学等在 Er^{3+} 掺杂特种光纤方面做了大量研究，2021 年，华中科技大学报道了一种 7 芯 Er^{3+} 掺杂石英特种光纤，并基于该多芯光纤，在 C 波段获得了 16 dB 增益，且平均噪声系数小于 6 dB，不同纤芯之间的增益差小于 4 dB[38]。2024 年，华南师范大学报道了一种具有空气孔包层的新型多芯 Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺微结构光纤及其放大特性，该光纤具有 13 个纤芯，可实现 23.8 dB 的平均增益，且在 1529~1565 nm 波段内芯间增益差小于 2 dB[39]。该报道在纤芯数量、增益、芯间增益差方面都达到了更好的指标。

（三）中红外 2.0 μm 波段关键光纤材料

在高增益光纤方面，2016 年，上海光机所报道了增益系数为 0.86 dB/cm 的 Tm^{3+} 掺杂石英光纤[40]。2020 年，华南大学报道了 1950 nm 处增益系数为 2.7 dB/cm 的 Tm^{3+} 掺杂硅酸盐玻璃光纤，并获得了 240mW 的激光输出[41]。2022 年，华南理工大学报道了一种掺 Tm^{3+} 锗酸盐玻璃复合光纤，其纤芯为 Tm^{3+} 掺杂锗酸盐玻璃，Tm^{3+} 掺杂浓度达到 9.8×10^{20} ions/cm^3，该光纤在 1950 nm 处的增益系数达到 6.11 dB/cm，并基于该增益光纤实现了基频重复率高达 4.3 GHz 的锁模激光输出[42]。在宽带光纤方面，2022 年，华南理工大学报道了一种 Tm^{3+}/Ho^{3+} 共掺锗酸盐玻璃复合光纤，其 3 dB 带宽为 247.8 nm，在 1950 nm 处的增益系数为 4.52 dB/cm[43]。当前，有源光纤带宽的提升方式已面临一定瓶颈，很难保证在高掺杂浓度、高增益系数的条件下进一步拓宽光纤带宽，未来需进一步在光纤的结构设计上加大研究投入，从光纤结构的角度进一步优化光纤特性。在特种激光光纤方面，2015 年，吉林大学报道了一种 Ho^{3+} 单掺氟碲酸盐玻璃微结构光纤，该光纤纤芯直径约为 6.6 μm，数值孔径为 0.3，为少模光纤。在 1992 nm 掺 Tm^{3+} 光纤激光器的泵浦下，在 27 cm 长的氟碲酸盐微结构光纤中实现了输出功率为 161 mW、斜率效率为 67.4% 的激光输出[44]。2017 年，华南师范大学报道了 Tm^{3+} 掺杂硅酸盐玻璃光子晶体光纤，其纤芯掺杂区域直径为 27 μm，在 793 nm 激光二极管的泵浦下，实现了最大输出功率为 1.58 W、斜率效率为 46.2% 的激光输出[45]。

（四）中红外 3.0 μm 波段关键光纤材料

对于 3.0 μm 波段关键光纤材料，我国尚未实现商业化、规模化生产，当前仍处于科研阶段。哈尔

滨工程大学在该领域做了大量研究，目前已成功报道了Ho^{3+}掺杂、Er^{3+}掺杂以及Dy^{3+}掺杂的氟化物玻璃光纤，基质材料主要为AlF_3基氟化物玻璃，并获得了3.0 μm的激光输出。2024年哈尔滨工程大学报道了一种Ho^{3+}/Pr^{3+}共掺的氟化物玻璃光纤，并在该光纤中实现了3.0 μm波长处大于1 W的激光输出[46]。3.0 μm波段瓦级激光输出的实现有助于推动我国中红外有源光纤商业化、规模化生产的快速发展，为国产商用氟化物光纤的生产提供指导。我国关键有源光纤材料的部分特性及参数见表2。

四、我国关键有源光纤材料发展面临的问题

我国激光器用关键光纤材料的研究和工业化生产经过近二十年的不断创新和经验积累，已具备一定的技术优势和产业规模优势，然而关键光纤材料仍存在产业链发展不均衡、关键基础材料与生产装备对外依存度较高、销售量及利润率整体偏低、高端产品缺少等问题，与国外相比存在一定差距。尽管国内科研单位和企业开展了大量研究，也取得了一定的进展，但在关键光纤材料工业化生产、产业化应用、高端化定制等方面仍存在薄弱环节，亟需进一步地发展。

（一）高品质稀土掺杂纤芯玻璃的工业化制备问题

我国高校、科研院所虽然对稀土掺杂纤芯玻璃开展了大量研究，然而在研究过程中往往仅进行实验性研究，较少开展大尺寸稀土掺杂玻璃的工业化制备技术与工艺研究。这一现象限制了新型纤芯玻璃配方在企业开展批量生产的发展，极大地降低了关键光纤材料的规模化生产，无法获得盈利，进而影响商业化普及。以稀土掺杂锗酸盐玻璃光纤和氟化物玻璃光纤为例，我国企业尚无法制备大尺寸光纤预制棒，无法实现工业化量产。

（二）高速精密拉丝设备国产化率较低

光纤作为一种微米量级光波导，拉丝设备的精密程度对光纤成品有着重要的影响。拉丝设备是复杂的集成控制系统，一般包括：预制棒悬挂系统、拉丝炉、丝径控制系统、光纤涂覆系统、光纤张力

表2　我国关键有源光纤部分特性及参数

激活离子	对应波段/μm	光纤材料	光纤特性	增益系数/($dB\cdot cm^{-1}$)	增益带宽/nm	参考文献
Yb^{3+}	1.0	硅酸盐玻璃	高增益系数YAG衍生光纤	1.7	—	[26]
Yb^{3+}	1.0	硅酸盐玻璃	高增益系数	6.0	—	[27]
Yb^{3+}	1.0	磷酸盐玻璃	高增益系数	10.08	—	—
Nd^{3+}/Yb^{3+}	1.0	石英	宽带	—	31	[28]
Nd^{3+}/Yb^{3+}	1.0	石英	宽带	—	41.5	[29]
Nd^{3+}/Yb^{3+}	1.0	石英	宽带	—	60	[30]
Yb^{3+}	1.0	石英	保偏光子晶体光纤	—	—	[31]
Bi^{n+}	1.4	石英	高增益系数	—	—	[32]
Bi^{n+}	1.3~1.5	锗酸盐玻璃	宽带	—	450	[33]
Er^{3+}/Yb^{3+}	1.5	磷酸盐玻璃	高增益系数	9.13	—	[34]
Er^{3+}	1.5	石英	高增益系数	0.09	—	[35]
Er^{3+}	1.5	锗酸盐玻璃	宽带		120	[36]
Er^{3+}	1.5	硅酸盐玻璃	L波段高增益	0.047	—	[37]
Er^{3+}/Yb^{3+}	1.5	石英	多芯微结构光纤	—	—	[39]
Tm^{3+}	2.0	石英	高增益系数	0.86	—	[40]
Tm^{3+}	2.0	硅酸盐玻璃	高增益系数	2.7	—	[41]
Tm^{3+}	2.0	锗酸盐玻璃	高增益系数	6.11	—	[42]
Tm^{3+}/Ho^{3+}	2.0	锗酸盐玻璃	宽带	—	247.8	[43]
Ho^{3+}	2.0	氟碲酸盐玻璃	微结构特种光纤	—	—	[44]
Tm^{3+}	2.0	硅酸盐玻璃	大模场光子晶体光纤	—	—	[45]
Ho^{3+}/Pr^{3+}	3.0	氟化物玻璃	—	—	—	[46]

检测系统、收丝系统和集成控制系统；拉丝时，需要联合控制拉丝温度、送棒速度、拉丝速度、炉内气氛等关键参数，轻微的波动即会对成品光纤的丝径、均匀度、同心度等参数造成影响。当前，国内高精密拉丝塔、石墨拉丝炉、激光丝径仪、高精度伺服电机等设备依然需要从美国、英国和日本等国家进口，对国产拉丝塔的开发形成“卡脖子”技术，制约了关键光纤材料的研究与发展空间。

（三）特种光纤预制棒工程化生产工艺需进一步规范

光纤预制棒的品质直接影响光纤的质量，因此，为扩大关键光纤材料的生产规模，提高大批量光纤产品质量，需建立完整的特种光纤预制棒生产工艺制度，对大尺寸光纤预制棒的品质完成参数化、制度化规范，并建立相应的标准。然而，我国当前在关键光纤材料领域，由于存在多种预制棒材料、不同单位具有不同的生产方式，导致国内相同类型材料预制棒质量存在较大区别，增大了不同批次光纤的差异，降低了光纤材料的长期使用性和可替换性。

（四）高端特种光纤生产规模不足

我国关键光纤材料领域存在“大而不强”的特点，尽管 Yb^{3+}、Er^{3+}、Tm^{3+}掺杂光纤均已实现商业化，然而高端特种光纤，如大模场光纤、保偏光纤、高掺杂光纤、氟化物光纤等，产量仍然较小，且品质无法达到国际先进水平，导致我国高端关键光纤材料的应用受制于人，必须依赖进口。

五、我国关键有源光纤材料发展思路和发展目标

（一）发展思路

关键有源光纤材料具有研发周期长、基础科学研发量大、研发投入大、工艺技术复杂、工业化过渡难等特点，较大地依赖于人才投入、资金投入和资源投入。当前，国际上关键光纤材料的发展速度放缓，我国在相关领域受益于国家环境稳定和政策支持，发展速度逐渐提升，具有稳步前进的态势。面向市场，在光纤放大器与激光器领域，2023 年我国掺杂光纤放大器行业市场规模为 100.06 亿元，同比增长 9.03%；2023 年我国稀土掺杂光纤激光器的市场规模约为 117 亿元，同比增长 8%。整体来看，我国关键光纤材料发展的机遇与风险并存。

为确保我国关键光纤材料自主可控且安全地发展，需对该领域的发展进行整体化、系统化设计，以关键材料研究为基本路线，围绕其开展全产业链的部署，突破关键光纤材料制备技术以及生产装备的国产化，实现光纤设计、原料提纯、组分优化、制备技术和生产设备的同步发展，提升我国关键光纤材料的核心竞争力。

（二）主要发展方向

激光光纤材料：经过近半个世纪的发展，已进入当前的复合化发展阶段。关键光纤材料将从光纤基质材料组成、光纤结构设计等方面开展复合化研究，深入特种光纤的特种应用场景研究；光纤玻璃材料基础理论方面的研究需进一步开展；光纤材料关键生产装备的国产化研发及国产特种光纤材料的工程化生产技术亟需得到发展。

复合关键光纤材料：光纤材料已从石英玻璃基质发展至多组分软玻璃基质，未来需进一步开发不同基质材料复合的材料复合光纤，如不同类型玻璃复合光纤、晶体–玻璃复合光纤、量子点–玻璃复合光纤、陶瓷–玻璃复合光纤、金属–玻璃复合光纤等。通过结合不同材料的优势特点，使得关键光纤材料具备高性能和多功能，满足关键光纤材料在特种领域的应用需求。

结构复合关键光纤材料：在常规阶跃型或渐变型折射率分布光纤的基础上，未来需进一步针对不同需求，设计和优化光纤结构。从光纤结构上可分为纤芯结构复合、包层结构复合以及芯–包结构一体化复合。纤芯结构复合包括：稀土分区掺杂结构复合、稀土非均匀掺杂结构复合、超表面结构复合、多芯结构复合等。包层结构复合包括：光子晶体光纤、布拉格光纤、保偏光纤、反谐振光纤等。芯–包结构一体化复合指同时在纤芯和包层结构上进行复合。

光纤玻璃材料基础理论：当前，激光玻璃材料的基本理论仍未得到完整准确的解释，拉丝过程中光纤预制棒材料状态变化、光纤材料最终特性的理论决定因素也没有得到充分的理论分析，因此需要进一步加大光纤玻璃材料基础理论的研究，从微观

领域揭示激光玻璃组分设计、性能调控、制备以及光纤拉制过程中玻璃材料状态变化的本质。

关键光纤材料生产装备的国产化及特种光纤材料的工程化生产技术：光纤材料的生产装备以及拉丝工艺制度对光纤材料最终的性质存在较大影响，为确保我国关键光纤材料特别是高端定制的特种光纤材料的战略自主和战略安全，需发展高度国产化的光纤拉丝装备，并制定符合实际情况的工程化生产工艺制度，完成国产高端特种光纤的标准化生产。

（三）发展目标

1. 2030年：追平国际上关键光纤材料的性能指标，建成关键光纤材料大国

到2030年，完成关键光纤材料产业的跟跑到并跑的过渡，追平国际上关键光纤材料的性能指标，并可实现工业化批量生产，初步建成战略自主的世界光纤强国。面向关键光纤材料在新一代信息技术、激光医疗、遥感测控、国防军工及工业加工等领域的重大发展需求，实现生产具有自主知识产权的关键光纤材料目标，并提升光纤生产装备的国产化率至90%以上，充分积累关键光纤材料工程化生产制备工艺的经验。突破石英基质商用稀土掺杂光纤的工业化生产瓶颈，解决特种商用稀土掺杂光纤的高端化生产需求，例如Yb、Er、Tm离子掺杂大模场石英光纤，稀土掺杂保偏石英光纤，高稀土掺杂浓度光纤以及稀土掺杂光子晶体光纤等。突破稀土掺杂氟化物基质光纤大批量工业化生产的“卡脖子”问题，实现稀土掺杂氟化物基质光纤自主生产与销售，并建立商用氟化物基质光纤的产业链集群。打破多种软玻璃激光光纤的技术封锁，并实现初步的自主创新，包括Nd、Yb、Er离子掺杂磷酸盐玻璃光纤，Nd、Yb、Er、Tm离子掺杂硅酸盐玻璃光纤，Tm、Ho离子掺杂锗酸盐玻璃光纤，Tm、Ho离子掺杂碲酸盐玻璃光纤，Er、Ho、Dy离子掺杂氟化物玻璃光纤等。实现特殊结构复合光纤的自主优化设计与定制生产，包括稀土掺杂光子晶体光纤、纤芯分区掺杂光纤以及多芯光纤等。初步解决光纤玻璃材料基础理论问题，建立稀土掺杂玻璃光纤材料的材料学理论研究模型，与国际上光纤材料的理论研究接轨。到2030年，基本实现我国关键光纤材料的战略自主，建成关键光纤材料大国。

2. 2035年：建成关键光纤材料强国

到2035年，在实现我国关键光纤材料战略自主的基础上，在以下方面取得重要进展：基础理论研究得到十足的发展，并基于此取得自主创新能力的大幅提升，将新一代关键光纤材料的原创知识产权掌握在自己手中；工业化生产技术积累大量实践操作经验，制定完备的关键光纤材料生产制度、工艺规范与产品标准，实现稀土掺杂石英玻璃及多组分软玻璃光纤自主可控的大规模生产，并使产业链得到良好运转；高增益稀土掺杂关键光纤材料、宽带稀土掺杂关键光纤材料、特种稀土掺杂关键光纤材料均达到国际先进水平，在国防科工、工业生产、新一代通信技术等关键领域实现大于98%的自给率；提升我国自主制定标准在新一代关键光纤材料国际标准中的占比，拥有高端关键光纤材料的国际话语权；完善该领域创新人才及团队的培养方案与流程，建立全球领先的技术创新平台与体系，为原创技术提供发展渠道。到2035年，完全实现我国关键光纤材料的战略自主，并依托我国巨大的应用市场，建设成为关键光纤材料强国。

六、对策建议

（一）注重基本理论自主创新，为可持续发展注入动力

在理论研究方面，大力推进关键材料领域的基本理论研究，推进关键光纤材料领域材料基因工程建设，丰富有源玻璃材料基因库数据，建立并完善关键有源光纤材料的数字化、智能化理论研究模型，加速新型关键光纤材料的研究进展；推动构建关键光纤材料领域光学理论研究模型，基于关键光纤材料的光学研究模型设计新型特种光纤的波导结构，将人工智能技术赋能于光纤理论特性分析，为光纤的生产提供理论指导。

（二）坚持政策推动，构建促进关键光纤材料发展的政策体系

完善国家关于关键光纤材料领域的中长期规划政策体系，对关键光纤领域形成长期稳定的国家政策支持。倡导有关部门有针对性地制定所需领域的关键光纤材料需求政策，建立关键光纤材料完整的标准体系，提供一定经费支持，为相关企业及科研单位针对性地开展关键技术攻关提供支撑。

（三）以高技术产品引领突破行业瓶颈，推动技术迭代升级和产业链发展

在关键光纤材料的研究与发展过程中，以高技术产品为引领，不断改良生产工艺，创新生产技术，在兼顾大批量常规光纤材料工业化生产的同时，着重发展高端关键光纤材料、特种光纤材料等，从而推动光纤材料制备技术的迭代升级，突破我国在高端关键光纤材料领域的瓶颈，如商用稀土掺杂氟化物玻璃光纤、大模场单模稀土掺杂光纤、低水峰光纤、复合结构光纤等。

通过对关键光纤材料的结构设计、原材料生产、玻璃组分设计、光纤预制棒制备、光纤制造以及器件应用进行统筹发展，打造关键光纤材料完整的全国产业链。以高稀土掺杂浓度有源玻璃光纤为例，将稀土掺杂浓度提升至1×10^{21} ions/cm^{3}以上且不发生浓度猝灭，同时保证玻璃材料具有良好的拉丝性能以及较好的物理化学稳定性；这对玻璃光纤材料组分的设计与优化、光学玻璃熔制工艺的优化、真空或气氛条件下玻璃熔制设备的开发以及玻璃光纤的高速精密拉制工艺的优化等多项技术提出系统性、完整性的研发要求。

（四）重视领域专业人才培养，完善人才梯队

对在关键光纤材料领域的优势研究机构和优势团队进行长期稳定支持，充分发挥老中青年专家在人才梯队建设中的作用，避免出现人才梯队断层，着重培养关键光纤材料领域的青年骨干和年轻人才，形成可持续的人才供给模式。

对于光纤材料这一交叉学科领域，其人才培养过程和培养模式更为复杂，要同时站在材料、物理、工程等多个角度看待本领域的学习与培养过程，重视基本理论、基础知识与工艺工程实践的结合。着重培养光学材料、激光光学、电子信息、材料科学与工程等专业方向人才；重视光纤光学、波动光学、激光原理与技术、材料科学基础、固体物理、高等数学等课程的学习；培养科学计算软件及计算方法方面的技能，掌握MATLAB、COMSOL Multiphysics、RSoft、Lumerical FDTD等专业计算软件的使用方法并具备一定的代码编写能力；在实验操作中，熟练掌握光学玻璃熔制与退火工艺、预制棒加工与搭建工艺、精密拉丝工艺、光路搭建等实验技巧；在工程实践中，掌握玻璃熔炼电炉热工制度、光纤精密拉丝制度等工程制度的制定方法。将材料设计优化、玻璃材料制备、光纤结构设计、预制棒制备、光纤精密拉丝、光纤材料器件应用系统地、整体地进行串联，加速推动我国关键有源光纤材料的可持续、高速发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: May 25, 2024; **Revised date:** June 18, 2024

Corresponding author: Yang Zhongmin is a professor from School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology. His major research fields include laser fiber, fiber laser and its applications. E-mail: yangzm@scut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Self-Reliance and Self-Improvement of Critical Materials System” (2022-PP-02)

参考文献

[1] Xie Z X, Shi C, Sheng Q, et al. A single-frequency 1064-nm Yb^{3+}-doped fiber laser tandem-pumped at 1018 nm [J]. Optics Communications, 2020, 461: 125262.

[2] Kotov L V, Akbulut M, Chavez-Pirson A, et al. More than 100 W, 18 cm Yb-doped phosphate fiber amplifier [C]. San Francisco: Fiber Lasers XVI: Technology and Systems, 2019.

[3] Wu J W, Zhu X S, Temyanko V, et al. Yb^{3+}-doped double-clad phosphate fiber for 976 nm single-frequency laser amplifiers [J]. Optical Materials Express, 2017, 7(4): 1310–1316.

[4] Li H Z, Zang J C, Raghuraman S, et al. Large-mode-area multicore Yb-doped fiber for an efficient high power 976 nm laser [J]. Optics Express, 2021, 29(14): 21992–22000.

[5] Limpert J, Schreiber T, Nolte S, et al. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser [J]. Optics Express, 2003, 11(7): 818–823.

[6] Rybaltovsky A A, Lipatov D S, Lobanov A S, et al. Photosensitive highly Er/Yb Co-doped phosphosilicate optical fibers for continuous-wave single-frequency fiber laser applications [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2020, 37(10): 3077–3083.

[7] Alharbi A G, Mirza J, Raza M, et al. Performance enhancement of praseodymium doped fiber amplifiers [J]. Computers, Materials & Continua, 2022, 73(3): 5411–5422.

[8] Wang Y, Halder A, Richardson D J, et al. A highly temperature-insensitive Bi-doped fiber amplifier in the E+S-band with 20 dB flat gain from 1435–1475 nm [C]. San Diego: 2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2023.

[9] Donodin A, Manuylovich E, Dvoyrin V, et al. E-band telecom-compatible 40 dB gain high-power bismuth-doped fiber amplifier with record power conversion efficiency [J]. APL Photonics, 2024, 9: 046102.

[10] Huang L H, Jha A, Shen S X, et al. Broadband emission in Er^{3+}-Tm^{3+} codoped tellurite fibre [J]. Optics Express, 2004, 12(11): 2429–2434.

[11] Al-Azzawi A A, Almukhtar A A, Hmood J K, et al. Broadband

ASE source for S+C+L bands using hafnia-bismuth based erbium Co-doped fibers [J]. Optik, 2022, 255: 168723.
[12] Jung Y, Kang Q Y, Sidharthan R, et al. Optical orbital angular momentum amplifier based on an air-hole erbium-doped fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(3): 430–436.
[13] Amma Y, Hosokawa T, Ono H, et al. Ring-core multicore few-mode erbium-doped fiber amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(24): 2163–2166.
[14] Qiao T, Cheng H H, Wen X X, et al. High-power 2 GHz fs pulsed all-fiber amplified laser system at 2.0 μm [J]. Optics Letters, 2019, 44(24): 6001–6004.
[15] Tench R E, Romano C, Delavaux J M, et al. In-depth studies of the spectral bandwidth of a 25 W 2 μm band PM hybrid Ho- and Tm-doped fiber amplifier [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(8): 2456–2463.
[16] Jewell J M, Higby P L, Aggarwal I D. Properties of $BaO–R_2O_3–Ga_2O_3–GeO_2$ (R=Y, Al, La, and Gd) glasses [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1994, 77(3): 697–700.
[17] Ren Z Q, Ben Slimen F, Lousteau J, et al. Compact chirped-pulse amplification systems based on highly Tm^{3+}-doped germanate fiber [J]. Optics Letters, 2021, 46(13): 3013–3016.
[18] Kochanowicz M, Zmojda J, Miluski P, et al. Tm^{3+}/Ho^{3+} Co-doped germanate glass and double-clad optical fiber for broadband emission and lasing above 2 μm [J]. Optical Materials Express, 2019, 9(3): 1450–1457.
[19] Kochanowicz M, Zmojda J, Miluski P, et al. Ultra-broadband emission in $Er^{3+}/Tm^{3+}/Ho^{3+}$ triply-doped germanate glass and double-clad optical fiber [J]. Optical Materials Express, 2022, 12(6): 2332–2342.
[20] Kochanowicz M, Sadowska K, Markowski K, et al. Broadband NIR luminescence in double-core germanate optical fiber [C]. Strasbourg: Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications III, 2022.
[21] Huang C Y, Geng J H, Luo T, et al. Rare earth doped optical fibers with multi-section core [J]. iScience, 2019, 22: 423–429.
[22] Barber M J, Shardlow P C, Barua P, et al. Nested-ring doping for highly efficient 1907 nm short-wavelength cladding-pumped thulium fiber lasers [J]. Optics Letters, 2020, 45(19): 5542–5545.
[23] 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.
[24] Tokita S, Hirokane M, Murakami M, et al. Stable 10 W Er: ZBLAN fiber laser operating at 271−288 μm [J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 3943–3945.
[25] Fortin V, Jobin F, Larose M, et al. 10-W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24 μm [J]. Optics Letters, 2019, 44(3): 491–494.
[26] Gao X B, Cong Z H, Zhao Z G, et al. Single-frequency kHz-linewidth 1070 nm laser based on Yb: YAG derived silica fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(14): 895–898.
[27] Wan Y, Wen J X, Jiang C, et al. Over 100 mW stable low-noise single-frequency ring-cavity fiber laser based on a saturable absorber of Bi/Er/Yb Co-doped silica fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(3): 805–812.
[28] Lin Z Q, Wang F, Wang M, et al. Maintaining broadband gain in a Nd^{3+}/Yb^{3+}co-doped silica fiber amplifier via dual-laser pumping [J]. Optics Letters, 2018, 43(14): 3361–3364.
[29] Lin Z Q, Yu C L, Hu L L. Laser properties of Nd^{3+}/Yb^{3+} Co-doped glass fiber around 1 μm [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2021, 38(8): 2443–2450.
[30] Tang G W, Song X Y, Yang D L, et al. Broadband 1.0 μm emission in Nd^{3+}/Yb^{3+} Co-doped phosphate glasses and fibers for photonic applications [J]. Optics Letters, 2023, 48(22): 5879–5882.
[31] Wang F, Wang M, Shao C Y, et al. Highly fluorine and ytterbium doped polarization maintaining large mode area photonic crystal fiber via the Sol-gel process [J]. Optics Express, 2021, 29(25): 41882–41893.
[32] Tian J M, Guo M T, Wang F, et al. High gain E-band amplification based on the low loss Bi/P Co-doped silica fiber [J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(10): 100602.
[33] Chen W W, Wang Y F, Zhang J, et al. Ultra-broadband and thermally stable NIR emission in Bi-doped glasses and fibers enabled by a metal reduction strategy [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2023, 106(7): 4128–4141.
[34] Lin W, Chen X W, Hu X, et al. Manipulating the polarization dynamics in a >10-GHz Er^{3+}/Yb^{3+} fiber Fabry-Pérot laser [J]. Optics Express, 2022, 30(18): 32791–32807.
[35] Cao C, Gu Z M, Qiu Q, et al. Radiation-resistant Er-doped fiber based on Ge-Ce co-doping [J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 7146605.
[36] Tang G W, Song X Y, Huang W H, et al. Broadband near-infrared amplified spontaneous emission of Er^{3+}-doped germanate glass fiber [J]. Optics Letters, 2023, 48(20): 5423–5426.
[37] Sun Y, Wang X, Yang Q B, et al. Er-doped silicate fiber amplifiers in the L-band with flat gain [J]. Optics Letters, 2024, 49(4): 989–992.
[38] Gu Z M, Qiu Q, He L, et al. C-band seven-core erbium doped fiber amplifier [C]. Shanghai: 2021 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), 2021.
[39] Zhang Y F, Zhao Y F, Fang Z W, et al. A novel multicore Er/Yb Co-doped microstructured optical fiber amplifier with peanut-shaped air holes cladding [J]. Nanophotonics, 2024, 13(6): 891–899.
[40] Kuan P W, Li K F, Zhang L, et al. 0.5-GHz repetition rate fundamentally Tm-doped mode-locked fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(14): 1525–1528.
[41] Qian G, Wang W, Tang G, et al. Tm: YAG ceramic derived multi-material fiber with high gain per unit length for 2 μm laser applications [J]. Optics Letters. 2020, 45(5): 1047–1050.
[42] Tang G, Liang Z, Huang W, et al. 4.3 GHz fundamental repetition rate passively mode-locked fiber laser using a silicate-clad heavily Tm^{3+}-doped germanate core multimaterial fiber [J]. Optics Letters. 2022, 47(3): 682–685.
[43] Tang G W, Liang Z H, Huang W H, et al. Broadband high-gain Tm^{3+}/Ho^{3+} Co-doped germanate glass multimaterial fiber for fiber lasers above 2 μm [J]. Optics Express, 2022, 30(18): 32693–32703.
[44] 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.
[45] Xia C M, Liu J T, Zhang W, et al. Optical properties and laser performance of Tm^{3+}-doped photonic crystal fiber with La_2O_3-Al_2O_3-SiO_2 glass [C]. Singapore: 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 2017.
[46] Xu N N, Wang P F, Wang S B, et al. Wavelength extension beyond 3 μm in a Ho^{3+}/Pr^{3+} Co-doped AlF_3-based fiber laser [J]. Optics Letters, 2024, 49(8): 2113–2116.