

激光与光电子学进展

面向高功率窄线宽激光应用的掺镱石英玻璃光纤研究进展

阳求柏^{1,2}, 沈辉³, 张磊¹, 李秋瑞³, 于春雷^{1,4*}, 漆云凤^{3**}, 胡丽丽^{1,4}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

⁴中国科学院大学杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024

摘要 近年来,窄线宽光纤激光器由于在光束合成、引力波探测等领域的重要应用价值而引起国内外研究人员们的广泛关注。然而,受激布里渊散射(SBS)与模式不稳定(TMI)严重限制了窄线宽光纤激光功率的进一步提升。目前,提升窄线宽光纤激光输出功率的方法主要集中于对光纤激光器系统层面的改进和优化。本文从光纤的材料和结构两个方向简要介绍了近年来用于窄线宽光纤激光器和放大器的掺镱石英玻璃光纤领域取得的相关研究成果,并对窄线宽光纤激光技术的未来发展趋势进行了展望。

关键词 光纤材料; 掺镱石英玻璃; 受激布里渊散射; 模式不稳定性

中图分类号 TN253 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1516011

Research Progress on Ytterbium-Doped Silica Glass Fiber for High-Power Narrow-linewidth Fiber Lasers

Yang Qiubai^{1,2}, Shen Hui³, Zhang Lei¹, Li Qiurui³, Yu Chunlei^{1,4*}, Qi Yunfeng^{3**}, Hu Lili^{1,4}

¹Key Laboratory of High Power Laser Materials, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

³Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

⁴Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Science, Hangzhou 310024, Zhejiang, China

Abstract In recent years, narrow-linewidth fiber lasers have attracted extensive attention owing to their application in the fields of beam combination and gravitational wave detection. However, stimulated Brillouin scattering and transverse mode instability seriously limit the power scaling of narrow-linewidth fiber laser. At present, the approaches to improve the power of narrow-linewidth fiber laser mainly focus on the optimization of fiber laser system. In this paper, the research progresses in the ytterbium-doped silica glass fiber for narrow-linewidth fiber laser and amplifier are briefly introduced, and the future development trend of narrow-linewidth fiber laser technology are prospected.

Key words fiber materials; Yb-doped silica glass; stimulated Brillouin scattering; transverse modal instability

1 引言

光纤激光器具有高光束质量、高转换效率、高集成

度以及便于热管理的特点,已成为目前最热门的激光技术之一,应用场景遍布包括光通信、工业加工、国防安全、生物医疗等领域。其中光谱宽度小于或在 0.1 nm

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2022-06-07; 录用日期: 2022-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(61875216)、上海市扬帆计划(20YF1455300)

通信作者: *sdyclcy@163.com; **dreamer_7@siom.ac.cn

量级^[1]的窄线宽光纤激光器更是因为其高相干性、低噪声系数等优势,在光束合成^[2]、非线性频率转换^[3-4]、引力波探测^[5-7]等领域具有广阔的应用前景。

然而,研究表明,窄线宽光纤激光器的输出功率提升主要受限于受激布里渊散射(SBS)和模式不稳定(TMI)效应^[1, 8-12]。当纤芯中激光功率达到受激布里渊散射阈值后,所产生的反向传输的斯托克斯光将对光纤激光系统造成严重损害,因此被视为限制窄线宽光纤激光器输出功率的首要因素^[13-14]。模式不稳定效应的现象是:光纤激光系统的输出光斑从稳定的基模转变为一种基模和高阶模间迅速动态耦合的非稳态模式,因此限制了单模激光的输出功率提升,并增加了包层光剥除器等器件的热负担^[15-16]。当前,研究人员们主要通过增大光纤有效模场面积^[17-18]、提高吸收系数、展宽种子光线宽、弯曲限模、优化泵浦方式等手段来抑制受激布里渊散射和模式不稳定,已将线宽为百 GHz 量级的光纤放大器的单模输出功率提升至 5 kW 以上^[19-21]。虽然增大纤芯直径、提高吸收系数能够提高 SBS 阈值,但会增强光纤热效应、增加纤芯中的高阶模成分,从而降低 TMI 阈值。正是这二者之间存在这样的“矛盾性”,因此获得更高窄线宽光纤激光器输出功率的关键就在于如何平衡 SBS 和 TMI^[22]。

从物理机制来说,受激布里渊散射来自于光纤中光场与声场间的相互作用,而模式不稳定效应来源于激光能量转换过程中废热所致的热光效应,二者均可归结于光与物质的相互作用。因此,从光纤材料自身出发,研究并调控其内部声学及热光性质,是从根本上突破窄线宽光纤激光器功率攀升瓶颈问题的重中之重。基于此,本文将从玻璃光纤材料组分调控和光纤结构设计出发,以抑制 SBS 和 TMI 效应为落脚点,简要介绍近年来用于高功率窄线宽激光放大器的掺镱石英玻璃光纤相关研究进展,并对其未来发展趋势进行展望。

2 纤芯组分调控

增益光纤纤芯玻璃组分对光纤的各方面性质都起着决定作用。稀土掺杂石英光纤通常需要在 SiO₂ 基质中掺入如 Al、P、F、B 等掺杂剂对玻璃进行改性,使其能够更加适应高功率光纤激光应用。这些元素的引入除了会影响纤芯玻璃的光学折射率之外,还会改变玻璃内部声速、声子寿命等声学参数,并且会对其热光性质造成影响。因此,对纤芯玻璃组分进行合理地调控能够有效抑制光纤中的受激布里渊散射效应和模式不稳定效应。

2.1 Al-Si 二元体系玻璃光纤

Al 元素毫无疑问是除了稀土元素本身以外,大模场掺镱石英光纤中最重要的掺杂元素^[23-25]。Al 离子能减少稀土离子团簇,提高稀土离子在石英中的掺杂摩尔分数。光子暗化(PD)效应作为光纤激光系统中主要

产热来源之一,对模式不稳定效应有着重要影响^[26-27]。尽管提高 Yb³⁺ 之间的分散性对光暗化有抑制作用,但抑制效果相当有限,通常还需共掺 Ce 离子来提高光纤的抗光暗化性能^[28-29]。但是额外 Ce³⁺/Ce⁴⁺ 的引入将提高纤芯折射率,因此通常也会同时掺入氟元素^[30-33]或在纤芯周围引入一层折射率“基座”^[34-36],用于调控纤芯的数值孔径。

除此之外,Al₂O₃ 具有提高 SiO₂ 玻璃光学折射率并降低其声学折射率的独特性质^[37]。因此掺 Al 的纤芯的声速将高于纯石英包层,使得声波在该纤芯内为具有较高损耗的泄漏模,从而降低了光场与声场之间的相互作用。研究人员们使用熔芯法制备了高 Al 含量的晶体衍生物光纤^[38-40]。2012 年,Dragic 等^[41]制备了 Al₂O₃ 晶体衍生物光纤,该光纤包层为石英,纤芯为 Al₂O₃ 晶体与石英玻璃包层扩散反应生成的铝硅酸盐玻璃,其中 Al₂O₃ 摩尔分数最高可达 55%,实验测得其布里渊增益系数仅有 $3.1 \times 10^{-13} \text{ mW}^{-1}$,为商用通信光纤的 1/100(图 1)。这一结果表明,高掺 Al 的玻璃光纤在抑制布里渊增益方面效果显著。然而,熔芯法制备的光纤数值孔径和背景损耗通常较高,主要用于机理研究,距离高功率光纤激光实际应用还有很长的路要走。

2.2 Al-P-Si 三元体系玻璃光纤

P 元素也是常用于稀土掺杂石英光纤的一种分散剂,能够极大地提升石英基质中稀土离子的溶解度。尤其当 Al/P 等摩尔比掺杂时,玻璃中将形成与纯 SiO₂ 玻璃具有相同四面体结构的 [AlPO₄] 结合体,能够有效降低掺杂石英玻璃折射率^[42],十分有利于制备高摩尔分数掺镱大模场光纤。众多研究还表明,在石英基质中引入 P 有利于抑制光子暗化效应^[43-45],并且当 P/Al 摩尔比接近 1:1 时,光纤具有最低的暗化附加损耗,如图 2 所示。2018 年,Jauregui 等^[46]的模拟计算结果表明,在所有掺杂比例的 Al、P 共掺的掺镱石英光纤中,Al、P 等掺光纤的模式不稳定阈值最高。同时,由于 P₂O₅ 具有负的热光系数^[47],P 元素的引入能够降低石英玻璃光纤的热光系数,有利于维持高功率运转下的光束质量。总的来说,Al-P-Si 三元体系玻璃具有低数值孔径、低暗化效应、低热光系数的特点,此三者均能在一定程度上提高模式不稳定阈值。

2019 年,Yu 等^[48]还通过制备 Al、P 共掺光纤系统地研究了 [AlPO₄] 结合体的引入对石英光纤的光学以及声学性质影响。他们的研究表明,[AlPO₄] 的引入尽管会轻微降低石英玻璃的声速,但能通过增加其内部声子寿命展宽布里渊增益带宽。此外,[AlPO₄] 还可降低布里渊散射对温度变化的响应程度,以及通过减少电致伸缩常量来降低声场与光场之间的相互作用。

正是因为具有上述特点,目前高功率窄线宽光纤激光器大多基于 Al-P-Si 三元体系玻璃光纤。2016 年,

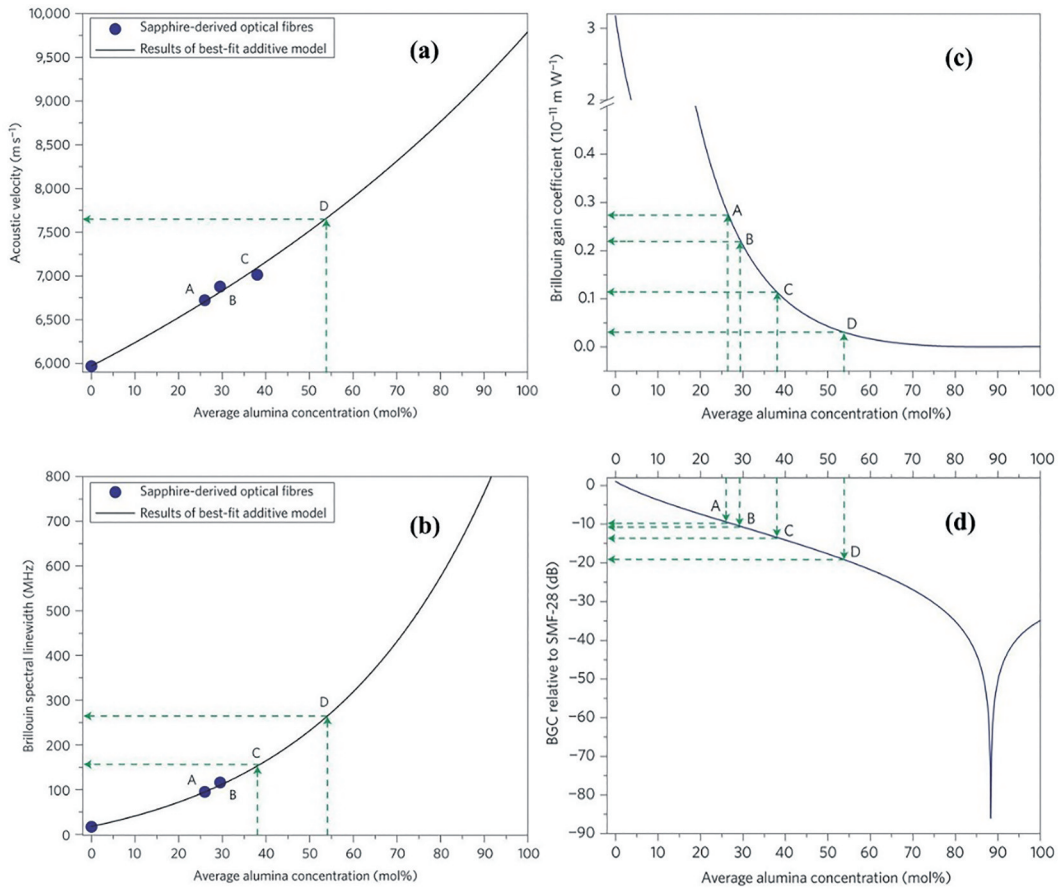


图 1 Al_2O_3 晶体衍生物光纤中 Al_2O_3 含量的影响^[41]。(a) 声速; (b) 布里渊线宽; (c) 绝对布里渊增益系数; (d) 与 SMF-28 光纤的相对布里渊增益系数

Fig. 1 Influence of Al_2O_3 content in Al_2O_3 crystal derivative fiber^[41]. (a) Speed of sound; (b) Brillouin linewidth; (c) absolute Brillouin gain coefficient; (d) relative Brillouin gain coefficient with SMF-28 fiber

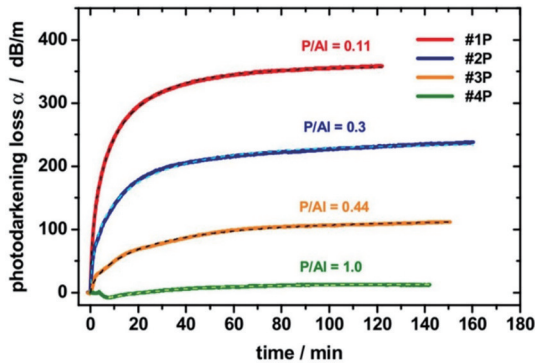


图 2 不同 P/Al 摩尔比掺铒光纤的光暗化附加损耗^[43]

Fig. 2 PD induced losses of Yb-doped fibers with different P/Al molar ratios^[43]

Jena 大学的研究人员们自主研制了 Al-P-Si 三元体系玻璃光纤, 制备过程中特地降低了光纤中 Yb 离子的掺杂摩尔分数, 以降低光纤平均热负载, 提高模式不稳定效应阈值。随后使用纤芯直径为 $24.5 \mu\text{m}$ 、数值孔径约为 0.04 的光纤对相位调制展宽的种子光进行放大, 实现了功率为 3 kW、谱宽为 170 pm 的窄线宽激光输出, 光束质量 $M^2=1.3$, 且并未观察到 SBS 和 TMI 现象, 输出功率仅受限于泵浦光功率^[9]。2017 年, 该课题

组进一步优化光纤参数, 使用芯径 $23/460 \mu\text{m}$ 的光纤获得了 3.5 kW 输出功率, 输出光谱宽度为 180 pm, 功率受限于 SBS 效应^[10]。2019 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所 (SIOM) 的研究团队利用分布多层沉积工艺精确控制 Yb/Al/P 共掺石英玻璃光纤组分, 使纤芯中 P 元素摩尔分数略大于 Al, 促使稀土离子配位于 P, 并共掺 F 元素在降低数值孔径的同时降低热光系数, 并利用自主研制的低热光系数大模场增益光纤实现了线宽 25 GHz、功率 2.2 kW 的单模激光输出^[49]。2021 年, 该研究团队进一步优化增益光纤参数, 将数值孔径降低至 0.051, 并结合种子光谱调控和双向泵浦功率比例等系统优化方案, 最终实现了 4.23 kW 全光纤单模激光输出, 最高输出功率下激光谱线宽度为 0.25 nm, 光束质量因子 $M^2=1.15$ ^[50]。

2.3 Al-P-B-Si 四元玻璃体系光纤

模式不稳定效应与光纤在高功率运转下的热光效应密不可分, 可以通过降低纤芯材料的热光系数来提高模式不稳定阈值^[51-52]。在常见的石英光纤掺杂剂中, SiO_2 、 GeO_2 、 Al_2O_3 具有正热光系数, 而 P_2O_5 、 B_2O_3 则是负热光系数, 因此可以控制纤芯中 P、B 元素的比例以实现低热光效应甚至“零”热光效应光纤^[53]。

Clemson 大学的 John Ballato 教授课题组在研制负热光效应光纤领域做了许多研究。2020 年,他们利用环形腔激光器自由光谱范围的温度特性测量了掺 B_2O_3 石英光纤的热光系数,确定了 B_2O_3 与 SiO_2 热光系数分别为 $-24.4 K^{-1}$ 与 $9.96 \times 10^{-6} K^{-1}$ [54]。2021 年,该课题组报道了 Al_2O_3 - P_2O_5 - B_2O_3 - SiO_2 体系的低布里渊增益系数、低热光系数的掺镱光纤,并实验表征了其热光系数、布里渊增益谱(BGS)以及光暗化附加损耗[55]。他们利用 MCVD 分别制备了掺杂摩尔分数 14.6% 和 6.8% B_2O_3 的掺镱光纤预制棒,其中后者被拉制成尺寸为 $21/400 \mu m$ 的低数值孔径光纤与商用光纤进行对比。通过测试表明,热光系数为 $6.8 \times 10^{-6} K^{-1}$,

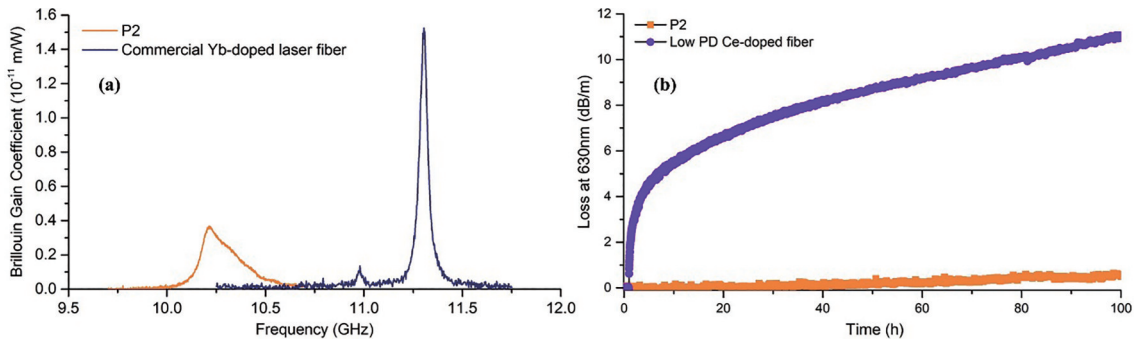


图 3 Al-P-B-Si 四元玻璃体系光纤与商用光纤。(a) 布里渊增益谱; (b) 光暗化附加损耗^[55]
Fig. 3 Al-P-B-Si quaternary glass fiber and commercial fiber. (a) BGS; (b) PD induced loss^[55]

虽然 Al-P-B-Si 四元玻璃体系在石英光纤的热、声性质剪裁方面具有较大优势,有望同时提高 TMI 和 SBS 阈值。然而,理论模型表明光纤的热光系数降低至纯石英的一半,所引入的 B_2O_3 需达到约 13% 摩尔分数,如此高摩尔分数的 B_2O_3 对光纤预制棒制备技术有一定要求,并且容易造成折射率过低以及玻璃分相等问题[55]。

3 光纤结构设计

光纤纤芯的组分调控是从优化材料本征声光、热光性能的角度来提高光纤的受激布里渊散射和模式不稳定阈值,对光纤结构的设计则是从光、声,甚至热场在光纤中的分布方面进行调控,接下来对抑制 SBS 或 TMI 效应的几种特种光纤设计方案进行介绍。

3.1 微结构大模场光纤

为了应对传统大模场包层结构光纤的纤芯直径增加与模式劣化之间的矛盾,国际上提出了多个通过制备微结构光纤来改善大模场光纤的输出光束质量的方案,如光子晶体光纤(PCF)、光子带隙光纤(PBF)、手性耦合纤芯(3C)光纤等。

光子晶体光纤能够通过合理的结构设计实现超大模场的单模运转,在超短脉冲激光放大领域有广泛应用。但是光子晶体光纤的空气孔结构包层难以实现低损耗熔接,同时空气热导率低不利于废热的耗散,这些缺点严重影响其激光系统稳定性,限制了光子晶体光

纤的应用前景。因此光子晶体光纤目前的一个重要发展方向是全固态化,提高系统稳定性[56-57]。近年来,著名光纤生产商 NKT Photonics 也开始将注意力放到了全固态 PCF 之上。2019 年,上述公司报道了一款 $30/250 \mu m$ 的全固态保偏 PCF,结果表明,同款光纤之间的熔接损耗能够控制在 0.2 dB 以内[58],并利用该光纤开展了单频激光放大实验,但功率只有数十瓦量级[图 4(a)]^[59]。

PBF 可以通过结构设计调整带隙波长位置实现对自发辐射放大和受激拉曼散射效应的抑制,因此在有源光纤激光器领域具有特殊优势[60-61]。Clemson 大学的 Dong 教授课题组在全固态光子带隙光纤(AS-PBF)领域做了许多研究工作。2015 年,他们与美国空军研究实验室(AFRL)的研究人员合作利用纤芯直径为 $50 \mu m$ 的全固态光子带隙光纤实现了 400 W 的单频激光输出,功率继续提升主要受限于 TMI 效应[图 4(b)]^[62]。最高功率输出时的反向光谱中 SBS 斯托克斯光比瑞利散射光强度低 20 dB,远未到达 SBS 阈值,并且后续通过理论计算和实验研究也验证得到该光纤布里渊增益系数小于 $7 \times 10^{-12} m/W$ ^[63]。为进一步提高光纤 TMI 阈值,该课题组改进带隙光纤的结构,通过增加谐振结构数以增加高阶模损耗^[64-65]。2022 年,Matniyaz 等^[66]报道了基于优化后的 AS-PBF 的 500 W 单频激光放大输出结构,并利用外差法测量确定最大功率输出时激光线宽为 6.2 kHz。除单频激光放大器

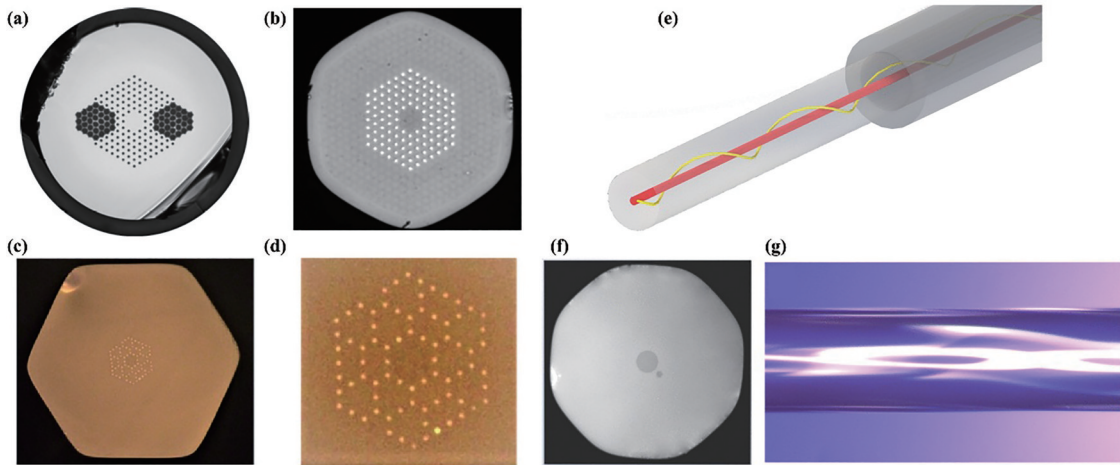


图 4 微结构大模场光纤。(a) AS-PCF 截面图^[59]; (b) AS-PBF 截面图^[62]; (c)(d)改进后的 AS-PBF 及纤芯区域截面图^[67]; (e)~(g)单伴芯的 3C 光纤结构示意图、截面图、侧面显微图^[74]

Fig. 4 Microstructured large mode field fiber. (a) Cross-sectional image of AS-PCF^[59]; (b) cross-sectional image of AS-PBF^[62]; (c) (d) cross-sectional images of improved AS-PBF and core area^[67]; (e)-(g) schematic diagram, cross-sectional image, and side micrograph of 3C fiber with single core^[74]

外,该课题组还使用更小芯径的 AS-PBF 作为 GHz 量级窄线宽激光放大器的增益介质来提高 TMI 阈值,以获得 kW 量级的平均功率输出。2021 年, Pulford 等^[67]报道了基于 25/400 μm 的 AS-PBF 的 1.37 kW、8 GHz 的窄线宽光纤放大输出[图 4(c)和(d)]。

3C 光纤由一个阶跃折射率纤芯和一个或多个螺旋伴芯组成,并通过合理的螺旋结构设计来实现纤芯与伴芯间的高阶模相位匹配机制,能够实现大尺寸纤芯中高纯度基模传输^[68-70]。另一方面,3C 光纤的全固态阶跃光纤式结构相对光子晶体等光纤更容易实现与其他阶跃光纤器件之间的模场匹配。因此,近年来德国汉诺威激光中心(LZH)联合 nLIGHT 公司致力于挖掘 3C 光纤在全光纤化的高功率窄线宽激光系统方面的应用前景。2018 年, nLIGHT 公司利用 21.9/400 μm 、数值孔径 0.059 双包层 3C 光纤对 20 GHz 种子光实现了 2.6 kW 激光放大输出,在实验中未观察到 TMI、SBS 效应,输出功率受限于泵浦合束器的最大承受功率^[71]。2020 年,汉诺威激光中心的 Hochheim 等^[72]利用自制的模场适配器连接泵浦合束器的单模尾纤与掺镱 3C 光纤,实现了基于 3C 光纤的全光纤放大器,并获得了基模功率占比达 98.9%、偏振消光比为 17.6 dB 的 103 W 单频线偏振激光输出。但是在最大功率输出时,模场适配器的温度达到 80 $^{\circ}\text{C}$,因此限制了功率的进一步提升。2022 年,该课题组进一步将模场适配器、包层光剥除器、隔离器、合束器等器件全部集成在一根掺镱 3C 光纤上,并以侧面泵浦的方式将泵浦光耦合到增益光纤包层中^[73],最终将单频激光放大输出功率提升至 336 W[图 4(e)~(g)]^[74]。

上述三类微结构大模场光纤虽然在高阶模抑制方面都有独特的优势,但因光纤结构复杂而具有较大的制备难度,且实现激光器系统的全光纤化还需要与有

源光纤适配的特制无源器件(包括合束器、模场适配器、包层光剥除器等)。这些因素均将成为限制微结构大模场光纤实现大规模实际应用的关键。

3.2 锥形光纤

锥形光纤(TDF)是指在较长的纵向长度上光纤几何尺寸渐变的光纤,通常为一端芯径较小,另一端芯径较大的长锥形结构,近年来也有如“纺锤形”^[75-77]、“马鞍形”^[78-79]等结构的锥形光纤报道,如图 5 所示。锥形光纤同时具有小芯径和大芯径光纤的特点,长锥区结构能够保证在放大激光的传输方向上不断增大纤芯直径以抑制非线性效应,并在大芯径的输出端维持较好的光束质量。

此外,整根光纤上的有效布里渊增益系数为纵向上各个位置处的布里渊增益系数的积分,因此可以通过在光纤纵向上引入不同的布里渊频移量来展宽布里渊增益谱,从而降低布里渊增益系数^[81]。因为斯托克斯光的频移量与光纤材料的声速相关,所以通常会在光纤纵向上施加不同的温度梯度^[82-86]以及应力梯度^[87-90]来提高 SBS 阈值。同时,不同芯径光纤中的声波场频率不同,对应不同的布里渊频移量^[91],因此长锥形光纤相比于传统均匀光纤具有更宽的布里渊增益谱。

正因为长锥形光纤在抑制受激布里渊效应方面具有一定的先天优势,近年来在单频光纤放大器领域中取得了一些代表性进展。2013 年,俄罗斯科学院的 Trikshev 等^[92]利用 18 m 输入、输出端纤芯包层尺寸分别为 7.5/120 μm 和 44/700 μm 的掺镱锥形光纤,并以反向空间泵浦结构将功率 2.4 W 的单频信号放大至 160 W,其中有效信号光功率为 130 W,光束质量 $M^2=1.05/1.2$ 。近年来,国内的国防科技大学(NUDT)在锥形光纤的高功率激光应用开展了许多研究工

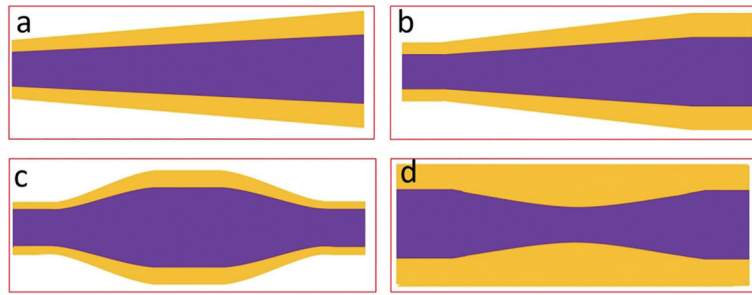


图 5 不同类型锥形光纤示意图。(a)线性型;(b)两端平滑的线性型;(c)纺锤形;(d)马鞍形^[80]

Fig. 5 Schematic diagrams of different types TDF. (a) Linear type; (b) linear type with smooth ends; (c) spindle type; (d) saddle type^[80]

作^[93-95], 目前在该领域处于国际领先。2020年, 国防科技大学的Lai等^[96]利用保偏锥形掺镱光纤搭建了一台全光纤单频光纤放大器, 最终实现了功率 550 W 单频激光输出, 为目前基于全光纤结构的最高单频激光输出功率纪录。在该实验中所使用的锥形增益光纤输入端和输出端纤芯包层尺寸分别为 36.1/249.3 μm 和 57.8/397.3 μm , 较大的纤芯包层比保证了足够的吸收系数, 使光纤使用长度缩减为 1.27 m, 其中锥区长度为 0.74 m。

3.3 多材料体系纤芯声场裁剪光纤

受激布里渊散射效应归根结底是光场与声场的相互作用的结果, 因此可以通过对声波导结构进行特殊设计以降低声场与光场的重叠, 提高 SBS 阈值。比如可以在纤芯外圈设置掺有 Ge、F、P 等元素的具有较低声速的区域作为导声层, 使得大部分声波能量集中在纤芯外圈, 而基模光束能量集中在纤芯中心, 从而实现

声波场与光波场的分离。

2007年, 康宁公司的Li等^[97]提出一种 Al/Ge 掺杂的声场裁剪光纤, 如图 6 (a)所示, 在纤芯中合理地控制两种元素的掺杂摩尔分数梯度, 保证纤芯折射率的一致性。这种结构大大降低了声场与光场之间的重叠率, 使得该光纤相比于传统光纤 SBS 阈值提高了 6 dB。使用这种特殊设计的声场裁剪光纤, 研究人员们获得了 502 W 的单频光激光放大结果^[98]。2014年, 美国空军研究实验室的Robin等^[99]使用声场裁剪光子晶体光纤实现了 811 W 单频光纤激光输出, 该结果为目前已报道的单频光纤激光最高功率输出。该光子晶体光纤的纤芯由 7 个不同掺杂区域构成, 如图 6 (b)所示。 v_1 和 v_2 为 Yb 掺杂区域, 但通过掺杂 Ge、Al 和 F 元素调控使得二者声速不同, v_3 为非掺杂的纯石英区域, 最终形成三种不同的声速区域以展宽布里渊增益谱。

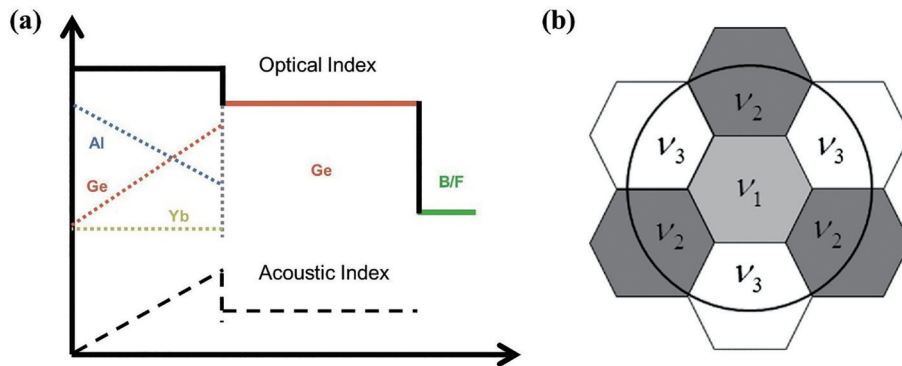


图 6 多材料体系纤芯声场裁剪光纤。(a) Al/Ge 共掺的掺镱光纤设计示意图^[97]; (b) 声场裁剪光子晶体光纤纤芯示意图^[99]

Fig. 6 Multi-material system core acoustic tailoring fiber. (a) Schematic of Al/Ge co-doped Yb-doped fiber^[97]; (b) schematic of acoustic tailoring PCF core^[99]

放大器末端的无源传能光纤也是高功率光纤激光系统中十分重要的组成部分。然而, 在相同的使用长度下, 相比于增益光纤, 传能光纤具有更长的非线性作用距离。因此, 在高功率窄线宽光纤放大器中, 传能光纤或许比增益光纤更需要特殊的声场裁剪设计来抑制其中的 SBS 效应。2021年, 俄罗斯科学院的Tsvetkov等^[100]通过在纤芯中非均匀掺杂 P 和 F 元素, 制备了一款具有特殊多模声场波导结构的无源光纤, 能将 SBS 阈值功率提高 8 dB。这一结果对于研制固态高功率

传能光纤有很好的启示。

3.4 纤芯稀土区域掺杂光纤

降低光纤中高阶模成分占比是提高模式不稳定阈值的一项重要手段^[16], 通常在大模场光纤中可通过弯曲等手段实现基模与高阶模传输损耗差来抑制高阶模^[101-102]。除此之外, 罗切斯特大学的 Marciante 等^[103-104]分别从理论和实验角度证明可通过区域掺杂光纤来降低光纤中高阶模式的增益系数, 并利用基模和高阶模之间的增益竞争来“净化”输出激光模式。

nLight 公司的研究人员们分别在 2010 和 2012 报道了利用直接纳米颗粒沉积 (DND) 法制备的区域掺杂光纤, 其中掺杂区域半径约占整个纤芯半径的 66%^[105-106]。2016 年, 日本藤仓公司的 Mashiko 等^[107] 利用区域掺杂光纤实现了 2 kW 的单模激光输出, 光束质量 M^2 因子为 1.2。随后, 藤仓公司进一步优化光纤设计及激光系统抑制非线性效应, 连续报道了 3 kW^[108]、5 kW^[109]、8 kW^[110] 的振荡器输出结果。2018 年, 新加坡国防科技研究院的 Seah 等利用 Nufem 公司区域掺杂比例为 75% 的 42/250 μm 光纤得到了 4 kW、 $M^2=1.59$ 的激光放大结果。

近年来, 国内一些研究单位也对区域掺杂光纤开展了许多研究工作, 主要包括: 华中科技大学、国防科技大学、中国工程物理研究院等。2018 年, 华中科技大学的 Liao 等^[111] 利用 MCVD 工艺制备了区域掺杂光纤, 其中镱离子区域掺杂比例为 51%, 纤芯中其他区域掺杂锗元素以匹配折射率。2019 年, 华中科技大学的 Zhang 等^[32] 制备了区域掺杂比例为 70% 的掺镱石英光纤, 相比传统光纤, 该区域掺杂光纤模式不稳定阈值功率从 717 W 提高至 1.25 kW。该光纤具体的参数如图 7 所示, 纤芯中心 70% 的区域为 Yb/Al/Ce/F 共掺, 而外围 30% 的区域仅掺杂 Al/F 元素。2021 年, 中

国工程物理研究院 (CAEP) 激光聚变研究中心的 Huang 等^[112] 利用国产区域掺杂光纤实现了 3.5 kW 的窄线宽 (0.32 nm) 激光放大结果, 光束质量 $M^2=1.86$, 最高功率输出时未观察到 TMI 现象。该工作中所使用的光纤区域掺杂比例为 60%, 在 976 nm 波长泵浦条件下模式不稳定阈值相比传统光纤提高了 2.2 倍。同年, 国防科技大学 Wu 等^[113] 报道了基于 30/40/250 μm 区域掺杂光纤的 1018 nm 级联泵浦光纤放大器, 最大输出功率为 6.2 kW。该区域掺杂光纤在 1018 nm 波长泵浦条件下的模式不稳定阈值为 4.74 kW, 相比全掺杂光纤提高了 170%。2022 年, 吴函烁等^[114] 使用白噪声相位调制的单频激光作为种子光源, 经预放后使用级联泵浦的区域掺杂光纤放大级进行主功率放大, 最终获得了最高功率为 5.96 kW、3 dB 线宽为 0.42 nm 的窄线宽激光输出。由于 TMI 阈值约为 5.01 kW, 最高功率输出时的光束质量已经恶化为 $M^2=2.0$ 。

由于区域掺杂光纤的非稀土掺杂区域一般都会引入 Ge、Al、P 等元素来提高折射率, 以在整个纤芯区域保持平坦的折射率剖面。然而, 这些元素的引入会影响材料的声学性质, 进而改变纤芯内的声场分布。2022 年, 中佛罗里达大学 (CREOL) 的 Cooper 等^[115] 从理论上研究了掺 Ge 的区域掺杂光纤中 SBS 性质, 并从实验上实现了基于区域掺杂光纤的 123 W 单频光纤

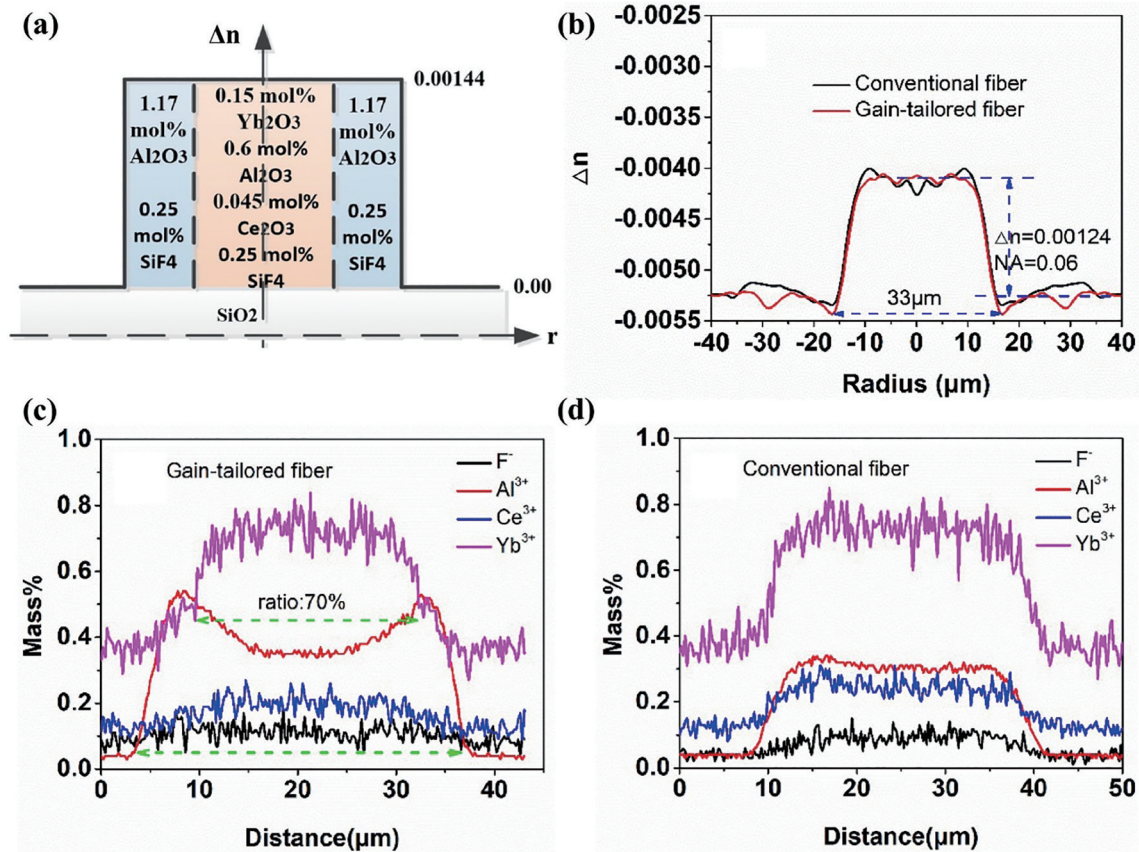


图 7 区域掺杂光纤。(a)设计示意图;(b)区域掺杂光纤和传统光纤折射率分布图;(c)区域掺杂光纤和(d)传统光纤的元素分布图^[32]
Fig. 7 Confined-doped fiber. (a) Designed schematic; (b) refractive index profiles of confined-doped fiber and conventional fiber; elemental distributions of (c) confined-doped fiber and (d) conventional fiber^[32]

激光放大输出, 光束质量因子 $M^2=1.11$ 。理论研究表明, 区域掺杂结构将有效地展宽光纤的布里渊增益带宽, 并提高声波模式的损耗, 从而抑制 SBS 效应。且相比于传统全掺杂光纤, 区域掺杂光纤能通过提高 SBS 阈值而将单频激光输出功率提升 2.4 倍。

尽管区域掺杂光纤在高功率、窄线宽光纤激光领域具有较大潜力, 但是仍需注意的是, 因为区域掺杂后光纤的吸收系数较传统光纤低, 往往需要更长的光纤来提供足够的泵浦吸收率, 这不利于非线性效应的抑制。除此之外, 由于区域掺杂光纤中存在不同掺杂元素组成的分界面, 可能导致应力以及扩散等现象, 对折射率剖面造成影响。因此, 制备区域掺杂光纤需要精心设计光纤的稀土掺杂比例以及掺杂元素和摩尔分数等参数, 并对预制棒的制备工艺也提出了一定的要求。

3.5 金属涂覆光纤

传统双包层光纤通常是在纯石英内包层外涂覆一层低折射率的含氟聚丙烯酸酯作为外包层来维持泵浦光在内包层中的传输。然而, 这些含氟有机涂覆层抗热冲击能力较差(工作温度通常在 80°C 以下), 将影响激光器在高功率下运转的稳定性^[116-117]。另外, 有机涂覆层的热导率也较低, 十分不利于散热。为此, 研究人员们提出以掺氟石英作为外包层并使用金属材料作为涂覆层, 来提高光纤在热量传导方面的效率, 如图 8^[118]所示。取代有机物涂层后, 金属涂覆光纤能够承受更高的工作温度, 因此还可以在其纵向上施加更大温度梯度以提高受激布里渊散射阈值^[119]。

2016 年, Daniel 等^[118]通过理论研究表明, 在同等外部散热条件下, 聚合物涂覆双包层光纤比铝涂覆光纤的纤芯温度更高, 因此热光效应引起的数值孔径增

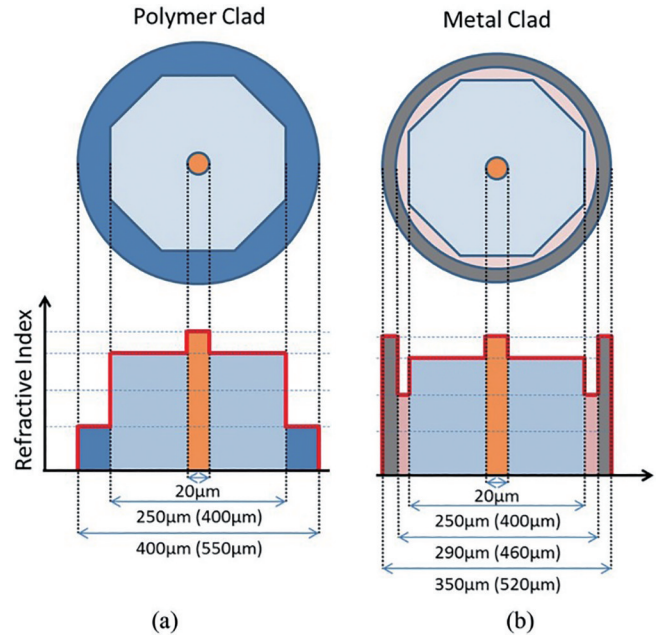


图 8 金属涂覆光纤。(a) 聚合物涂覆; (b) 金属涂覆^[118]

Fig. 8 Metal clad fiber. (a) Polymer clad; (b) metal clad^[118]

加更显著, 将导致弯曲等手段对高阶模的抑制效果降低。他们还实验研究了自然对流散热条件下, 铝涂覆光纤激光器的运转情况, 最高获得了 405 W 的输出功率(泵浦功率限制), 斜率效率为 74%, 此时光纤表面最高温度达 137°C 。同年, Yu 等^[120]报道了基于金涂覆掺镱双包层光纤的窄线宽光纤放大器, 在实验中获得了功率为 3.1 kW、线宽为 12 GHz 的光纤激光放大输出。该特殊光纤能够在高功率运转的条件下更好地保持对高阶模的抑制效果, 提高模式不稳定阈值。表 1 汇总了基于文中所讨论的特种光纤类型的高功率窄线宽光纤激光器代表性研究成果。

表 1 基于特种大模场增益光纤的高功率窄线宽光纤激光器研究汇总表

Table 1 Summary of high-power narrow-linewidth fiber lasers based on special large mode area gain fibers

Fiber type	Year	Institution	Core size / μm	Power / kW	Linewidth / GHz	M^2	Limitation	Ref.
Al/P fiber	2017	Jena	23	3.5	47.5	<1.3	SBS	[10]
	2019	SIOM	25	2.2	25	1.2	Pump	[49]
	2022	SIOM	25	4.23	68	1.15	Pump	[50]
Al/P/B fiber	2022	Clemson	21	1.1	10	—	TMI	[55]
AS-PBF	2022	Clemson	50	0.5	5×10^{-6}	1.5	TMI	[66]
	2021	Clemson	25	1.37	8	1.3	TMI	[67]
3C fiber	2018	LZH	21.9	2.6	30	<1.1	Pump	[71]
	2022	LZH	34	0.336	$<1 \times 10^{-6}$	$\langle \text{TEM}_{00} \rangle > 90\%$	SBS	[74]
Tapered fiber	2020	NUDT	36.1 to 57.8	0.55	20×10^{-6}	1.47	TMI	[96]
Acoustic-tailored fiber	2007	Corning	39	0.502	3×10^{-6}	1.06	SBS	[98]
	2014	AFRL	38	0.811	$<5 \times 10^{-6}$	1.2	TMI	[99]
Confined-doped fiber	2021	CAEP	18/30	3.57	85	1.86	Pump	[112]
	2022	NUDT	30/40	5.96	110	2.0	TMI	[114]
	2022	CREOL	12.5/25	0.123	$<10 \times 10^{-6}$	1.1	SBS	[115]

4 结束语

受激布里渊散射和模式不稳定效应的抑制仍将是未来高功率窄线宽光纤激光器的研究重点,利用玻璃光纤材料和结构来对光纤本征性质进行调控有望在窄线宽光纤激光领域实现突破。本文介绍了近年来用于高功率窄线宽光纤放大器的掺镱石英光纤在玻璃材料组分和光纤结构设计两个方面的研究进展。材料组分方面,主要是通过引入 Al、P、B、F、Ce 等掺杂剂对光纤的折射率、声速、声子寿命、热光系数等参数进行调控。光纤结构方面:光子晶体、光子带隙、3C 光纤以及区域掺杂光纤均是通过增大模场面积以及抑制高阶模分别提高 SBS 和 TMI 效应的阈值;声场裁剪光纤是通过降低声场和光场之间的重叠来降低布里渊增益系数;金属涂覆光纤能提高光纤热导率以及与外界热交换效率,从而弱化热光效应。

纵观窄线宽光纤激光器的发展,实现高功率激光输出对光纤材料性能以及相位调制、温度、应力梯度等技术均有很高要求,例如目前单频光纤激光器最高输出功率的结果中就同时采用了光子晶体光纤、声场裁剪、区域掺杂、温度梯度等多种手段。并且不同技术之间也能相辅相成,例如金属涂覆光纤上能够施加更高温度梯度获得更宽的布里渊增益谱。因此,未来突破窄线宽光纤功率瓶颈的关键必然在于如何更好地结合材料科学与激光技术。

参 考 文 献

- [1] 来文昌, 马鹏飞, 肖虎, 等. 高功率窄线宽光纤激光技术[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121001.
Lai W C, Ma P F, Xiao H, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 121001.
- [2] 周朴, 栗荣涛, 马闯星, 等. 激光相干合成的研究进展: 2011—2020[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401003.
Zhou P, Su R T, Ma Y X, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401003.
- [3] Kumar S C, Samanta G K, Ebrahim-Zadeh M. High-power, single-frequency, continuous-wave second-harmonic-generation of ytterbium fiber laser in PPKTP and MgO: sPPLT[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13711-13726.
- [4] Su M Q, You Y, Quan Z, et al. 321 W high-efficiency continuous-wave green laser produced by single-pass frequency doubling of narrow-linewidth fiber laser[J]. Applied Optics, 2021, 60(13): 3836-3841.
- [5] Wei L W, Cleva F, Man C N. Coherently combined master oscillator fiber power amplifiers for Advanced Virgo[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5817-5820.
- [6] Steinke M, Tünnermann H, Kuhn V, et al. Single-frequency fiber amplifiers for next-generation gravitational wave detectors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 3100613.

- [7] Wellmann F, Steinke M, Meylahn F, et al. High power, single-frequency, monolithic fiber amplifier for the next generation of gravitational wave detectors[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 28523-28533.
- [8] Ma P F, Tao R M, Su R T, et al. 1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 4187-4195.
- [9] Beier F, Hupel C, Nold J, et al. Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbium-doped low NA fiber amplifier[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6011-6020.
- [10] Beier F, Hupel C, Kuhn S, et al. Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14892-14899.
- [11] 郑也, 李磐, 朱占达, 等. 高功率窄线宽光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 080002.
Zheng Y, Li P, Zhu Z D, et al. Progress in high-power narrow-linewidth fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080002.
- [12] 楚秋慧, 郭超, 颜冬林, 等. 高功率窄线宽光纤激光器的研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121004.
Chu Q H, Guo C, Yan D L, et al. Recent progress of high power narrow linewidth fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 121004.
- [13] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [14] 冉阳, 王小林, 栗荣涛, 等. 窄线宽光纤放大器中受激布里渊散射抑制研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 040003.
Ran Y, Wang X L, Su R T, et al. Research progress of stimulated Brillouin scattering suppression in narrow linewidth fiber amplifiers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 040003.
- [15] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.
- [16] 王建军, 刘珂, 李敏, 等. 光纤激光模式不稳定研究十年回顾与展望[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121003.
Wang J J, Liu Y, Li M, et al. Ten-year review and prospect on mode instability research of fiber lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 121003.
- [17] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, et al. Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power[J]. Optics Letters, 2005, 30(5): 459-461.
- [18] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, et al. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 546-551.
- [19] Huang Z M, Shu Q, Tao R M, et al. >5 kW record high power narrow linewidth laser from traditional step-index monolithic fiber amplifier[J]. IEEE Photonics

- Technology Letters, 2021, 33(21): 1181-1184.
- [20] Ma P F, Xiao H, Liu W, et al. All-fiberized and narrow-linewidth 5 kW power-level fiber amplifier based on a bidirectional pumping configuration[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9(3): 87-93.
- [21] 马鹏飞, 宋家鑫, 王广建, 等. 高功率窄线宽光纤激光突破 6 kW 级近单模输出[J]. 中国激光, 2022, 49(9): 0916002.
Ma P F, Song J X, Wang G J, et al. 6 kW power-level high power narrow-linewidth fiber laser with near diffraction-limited beam quality [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(9): 0916002.
- [22] Ward B G. Maximizing power output from continuous-wave single-frequency fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 542-545.
- [23] Webb A S, Boyland A J, Standish R J, et al. MCVD *in situ* solution doping process for the fabrication of complex design large core rare-earth doped fibers[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2010, 356(18/19): 848-851.
- [24] Tammela S, Söderlund M, Koponen J, et al. The potential of direct nanoparticle deposition for the next generation of optical fibers[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6116: 94-102.
- [25] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [26] Otto H J, Modsching N, Jauregui C, et al. Impact of photodarkening on the mode instability threshold[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15265-15277.
- [27] Jauregui C, Otto H J, Stutzki F, et al. Simplified modelling the mode instability threshold of high power fiber amplifiers in the presence of photodarkening[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20203-20218.
- [28] Engholm M, Jelger P, Laurell F, et al. Improved photodarkening resistivity in ytterbium-doped fiber lasers by cerium codoping[J]. Optics Letters, 2009, 34(8): 1285-1287.
- [29] Jelger P, Engholm M, Norin L, et al. Degradation-resistant lasing at 980 nm in a Yb/Ce/Al-doped silica fiber[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(2): 338-342.
- [30] Schuster K, Grimm S, Kalide A, et al. Evolution of fluorine doping following the REPUSIL process for the adjustment of optical properties of silica materials[J]. Optical Materials Express, 2015, 5(4): 887-897.
- [31] Zheng J K, Zhao W, Zhao B Y, et al. 4.62 kW excellent beam quality laser output with a low-loss Yb/Ce codoped fiber fabricated by chelate gas phase deposition technique[J]. Optical Materials Express, 2017, 7(4): 1259-1266.
- [32] Zhang F F, Wang Y B, Lin X F, et al. Gain-tailored Yb/Ce codoped aluminosilicate fiber for laser stability improvement at high output power[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20824-20836.
- [33] She S F, Liu B, Chang C, et al. Yb/Ce codoped aluminosilicate fiber with high laser stability for multi-kW level laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(24): 6924-6931.
- [34] Yoo S, Webb A S, Boyland A J, et al. Linearly polarized ytterbium-doped fiber laser in a pedestal design with aluminosilicate inner cladding[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(6): 453-457.
- [35] Liu R, Yan D P, Fan Z J, et al. Fabrication and 1046 nm laser behaviors of Yb-doped phosphosilicate binary fiber with a pedestal structure[J]. Optical Materials Express, 2020, 10(2): 464-471.
- [36] Möller F, Distler V, Walbaum T, et al. Influence of pedestal diameter on mode instabilities in Yb/Ce/Al-doped fibers[J]. Optics Express, 2020, 28(22): 33456-33474.
- [37] Jen C K, Neron C, Shang A, et al. Acoustic characterization of silica glasses[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1993, 76(3): 712-716.
- [38] Ballato J, Hawkins T, Foy P, et al. On the fabrication of all-glass optical fibers from crystals[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(5): 053110.
- [39] Dragic P, Law P C, Ballato J, et al. Brillouin spectroscopy of YAG-derived optical fibers[J]. Optics Express, 2010, 18(10): 10055-10067.
- [40] Dragic P D, Liu Y S, Ballato J, et al. YAG-derived fiber for high-power narrow-linewidth fiber lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8237: 248-256.
- [41] Dragic P, Hawkins T, Foy P, et al. Sapphire-derived all-glass optical fibres[J]. Nature Photonics, 2012, 6(9): 627-633.
- [42] DiGiovanni D J, MacChesney J B, Kometani T Y. Structure and properties of silica containing aluminum and phosphorus near the AlPO_4 join[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1989, 113(1): 58-64.
- [43] Jetschke S, Unger S, Schwuchow A, et al. Efficient Yb laser fibers with low photodarkening by optimization of the core composition[J]. Optics Express, 2008, 16(20): 15540-15545.
- [44] Deschamps T, Ollier N, Vezin H, et al. Clusters dissolution of Yb^{3+} in codoped $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ glass fiber and its relevance to photodarkening[J]. The Journal of Chemical Physics, 2012, 136(1): 014503.
- [45] Likhachev M E, Aleshkina S S, Shubin A V, et al. Large-mode-area highly Yb-doped photodarkening-free $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ -based fiber[C]//2011 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO EUROPE/EQEC), May 22-26, 2011, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2011.
- [46] Jauregui C, Stutzki F, Tünnermann A, et al. Thermal analysis of Yb-doped high-power fiber amplifiers with Al:P co-doped cores[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 7614-7624.
- [47] Dragic P, Cavillon M, Ballato J. On the thermo-optic coefficient of P_2O_5 in SiO_2 [J]. Optical Materials Express, 2017, 7(10): 3654-3661.
- [48] Yu N J, Hawkins T W, Bui T V, et al. AlPO_4 in silica

- glass optical fibers: deduction of additional material properties[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 7103913.
- [49] 李学文, 于春雷, 胡丽丽, 等. 国产 25/400 μm 掺镱双包层光纤实现 2.2 kW 窄线宽单模激光输出[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0636001.
Li X W, Yu C L, Hu L L, et al. 2.2 kW narrow-linewidth single-mode laser output using homemade 25/400 μm Yb-doped double cladding fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0636001.
- [50] 沈辉, 张磊, 李秋瑞, 等. 基于自研 25 μm /400 μm 有源光纤实现 0.25 nm, 4.23 kW 全光纤单模激光[J]. *中国激光*, 2022, 49(11): 1116001.
Shen H, Zhang L, Li Q R, et al. 0.25 nm, 4.23 kW all-fiber single-mode fiber laser based on home-made 25 μm /400 μm active fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(11): 1116001.
- [51] Dong L. Stimulated thermal Rayleigh scattering in optical fibers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2642-2656.
- [52] Zervas M N. Transverse mode instability, thermal lensing and power scaling in Yb³⁺-doped high-power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 19019-19041.
- [53] Dragic P D, Cavillon M, Ballato A, et al. A unified materials approach to mitigating optical nonlinearities in optical fiber. II. B. The optical fiber, material additivity and the nonlinear coefficients[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2018, 9(3): 307-318.
- [54] Pan G, Yu N, Meehan B, et al. Thermo-optic coefficient of B₂O₃ and GeO₂ co-doped silica fibers[J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(7): 1509-1521.
- [55] Hawkins T W, Dragic P D, Yu N, et al. Kilowatt power scaling of an intrinsically low Brillouin and thermo-optic Yb-doped silica fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(12): F38-F49.
- [56] Wang A, George A K, Knight J C. Three-level neodymium fiber laser incorporating photonic bandgap fiber[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1388-1390.
- [57] Kong F T, Saitoh K, McClane D, et al. Mode area scaling with all-solid photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26363-26372.
- [58] Christensen S L, Papior S R, Johansen M M, et al. Photonic crystal fiber technology for monolithic single-mode large-mode-area all-solid amplifier[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10897: 255-261.
- [59] Hauge J M, Papior S R, Pedersen J E, et al. Narrow-linewidth all-solid large-mode-area photonic crystal fiber amplifier[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10897: 368-372.
- [60] Matniyaz T, Li W S, Kalichevsky-Dong M, et al. Highly efficient cladding-pumped single-mode three-level Yb all-solid photonic bandgap fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 807-810.
- [61] Shirakawa A, Suzuki Y, Arisa S, et al. High-peak power pulse amplification by SRS-suppressed photonic bandgap fiber[C]//2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEOPR), June 30-July 4, 2013, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2013: TuA2_1.
- [62] Pulford B, Ehrenreich T, Holten R, et al. 400-W near diffraction-limited single-frequency all-solid photonic bandgap fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2297-2300.
- [63] Mart C, Ward B, Pulford B, et al. Brillouin gain spectroscopy on LMA Yb-doped photonic bandgap fiber [C]//Frontiers in Optics 2016, October 17-21, 2016, Rochester, New York. Washington, D.C.: OSA, 2016: FW5B.4.
- [64] Gu G C, Kong F T, Hawkins T W, et al. Extending mode areas of single-mode all-solid photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 9147-9156.
- [65] Dong L, Kong F T, Gu G C, et al. Large-mode-area all-solid photonic bandgap fibers for the mitigation of optical nonlinearities[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 316-322.
- [66] Matniyaz T, Bingham S P, Kalichevsky-Dong M T, et al. High-power single-frequency single-mode all-solid photonic bandgap fiber laser with kHz linewidth[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 377-380.
- [67] Pulford B, Holten R, Matniyaz T, et al. kW-level monolithic single-mode narrow-linewidth all-solid photonic bandgap fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(18): 4458-4461.
- [68] Galvanauskas A, Swan M C, Liu C H. Effectively-single-mode large core passive and active fibers with chirally-coupled-core structures[C]//2008 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science, May 4-9, 2008, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [69] Ma X Q, Liu C H, Chang G Q, et al. Angular-momentum coupled optical waves in chirally-coupled-core fibers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26515-26528.
- [70] Ma X Q, Zhu C, Hu I N, et al. Single-mode chirally-coupled-core fibers with larger than 50 μm diameter cores [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9206-9219.
- [71] Kanskar M, Zhang J, Koponen J, et al. Narrowband transverse-modal-instability (TMI)-free Yb-doped fiber amplifiers for directed energy applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10512: 65-73.
- [72] Hochheim S, Steinke M, Wessels P, et al. Single-frequency chirally-coupled-core all-fiber amplifier with 100 W in a linearly-polarized TEM₀₀-mode[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 939-942.
- [73] Hochheim S, Brockmüller E, Wessels P, et al. Highly-Integrated signal and pump combiner in chirally-coupled-core fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(22): 7246-7250.
- [74] Hochheim S, Brockmüller E, Wessels P, et al. Single-frequency 336 W spliceless all-fiber amplifier based on a chirally-coupled-core fiber for the next generation of gravitational wave detectors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(7): 2136-2143.
- [75] Zeng L F, Xi X M, Ye Y, et al. Near-single-mode 3 kW monolithic fiber oscillator based on a longitudinally spindle-shaped Yb-doped fiber[J]. *Optics Letters*, 2020,

- 45(20): 5792-5795.
- [76] Zeng L F, Xi X M, Ye Y, et al. A 1.8 kW fiber laser oscillator employing a section of spindle-shaped core ytterbium-doped fiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(9): 095104.
- [77] Zeng L F, Pan Z Y, Xi X M, et al. 5 kW monolithic fiber amplifier employing homemade spindle-shaped ytterbium-doped fiber[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(6): 1393-1396.
- [78] Aleshkina S S, Lipatov D S, Levchenko A E, et al. Monolithic diffraction-limited 976-nm laser based on saddle-shaped photo darkening-free Yb-doped fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10512: 292-299.
- [79] Zeng L F, Xi X M, Ye Y, et al. A novel fiber laser oscillator employing saddle-shaped core ytterbium-doped fiber[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(11): 185.
- [80] Zuo J X, Lin X C. High-power laser systems[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(5): 2270025.
- [81] Shiraki K, Ohashi M, Tateda M. SBS threshold of a fiber with a Brillouin frequency shift distribution[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(1): 50-57.
- [82] Hansryd J, Dross F, Westlund M, et al. Increase of the SBS threshold in a short highly nonlinear fiber by applying a temperature distribution[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(11): 1691-1697.
- [83] Hildebrandt M, Büsche S, Wessels P, et al. Brillouin scattering spectra in high-power single-frequency ytterbium doped fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 15970-15979.
- [84] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, et al. All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300-W output power[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(20): 1864-1867.
- [85] Lou Z K, Han K, Wang X L, et al. Increasing the SBS threshold by applying a flexible temperature modulation technique with temperature measurement of the fiber core [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13323-13335.
- [86] Wellmann F, Steinke M, Wessels P, et al. Performance study of a high-power single-frequency fiber amplifier architecture for gravitational wave detectors[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(26): 7945-7950.
- [87] Yoshizawa N, Imai T. Stimulated Brillouin scattering suppression by means of applying strain distribution to fiber with cabling[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(10): 1518-1522.
- [88] Zhang L, Cui S Z, Liu C, et al. 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5456-5462.
- [89] Boggio J M C, Marconi J D, Fragnito H L. Experimental and numerical investigation of the SBS-threshold increase in an optical fiber by applying strain distributions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(11): 3808-3814.
- [90] Huang L, Wu H S, Li R X, et al. 414 W near-diffraction-limited all-fiberized single-frequency polarization-maintained fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 1-4.
- [91] Shiraki K, Ohashi M, Tateda M. Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fibre by changing the core radius[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(8): 668-669.
- [92] Trikshev A I, Kurkov A S, Tsvetkov V B, et al. A 160 W single-frequency laser based on an active tapered double-clad fiber amplifier[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(6): 065101.
- [93] Huang L, Ma P F, Su R T, et al. Comprehensive investigation on the power scaling of a tapered Yb-doped fiber-based monolithic linearly polarized high-peak-power near-transform-limited nanosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 761-782.
- [94] Ye Y, Lin X F, Xi X M, et al. Novel constant-cladding tapered-core ytterbium-doped fiber for high-power fiber laser oscillator[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9(2): 142-148.
- [95] Ye Y, Lin X F, Yang B L, et al. Tapered Yb-doped fiber enabled a 4 kW near-single-mode monolithic fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(9): 2162-2165.
- [96] Lai W C, Ma P F, Liu W, et al. 550 W single frequency fiber amplifiers emitting at 1030 nm based on a tapered Yb-doped fiber[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20908-20919.
- [97] Li M J, Chen X, Wang J, et al. Al/Ge co-doped large mode area fiber with high SBS threshold[J]. *Optics Express*, 2007, 15(13): 8290-8299.
- [98] Gray S, Liu A P, Walton D T, et al. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17044-17050.
- [99] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.
- [100] Tsvetkov S V, Khudyakov M M, Lobanov A S, et al. SBS gain suppression in a passive single-mode optical fiber by the multi-mode acoustic waveguide design[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(2): 592-599.
- [101] Koplów J P, Kliner D A, Goldberg L. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(7): 442-444.
- [102] Huang L J, Kong L C, Leng J Y, et al. Impact of high-order-mode loss on high-power fiber amplifiers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(6): 1030-1037.
- [103] Marcianti J R. Gain filtering for single-spatial-mode operation of large-mode-area fiber amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 30-36.
- [104] Marcianti J R, Roides R G, Shkunov V V, et al. Near-diffraction-limited operation of step-index large-mode-area fiber lasers via gain filtering[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1828-1830.
- [105] Kokki T, Koponen J, Laurila M, et al. Fiber amplifier utilizing an Yb-doped large-mode-area fiber with confined doping and tailored refractive index profile[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580: 305-313.
- [106] Ye C G, Koponen J, Kokki T, et al. Confined-doped

- ytterbium fibers for beam quality improvement: fabrication and performance[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8237: 520-526.
- [107] Mashiko Y, Nguyen H K, Kashiwagi M, et al. 2 kW single-mode fiber laser with 20-m long delivery fiber and high SRS suppression[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9728: 29-34.
- [108] Ikoma S, Nguyen H K, Kashiwagi M, et al. 3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10083: 175-180.
- [109] Shima K, Ikoma S, Uchiyama K, et al. 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 45-50.
- [110] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, et al. 8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 273-278.
- [111] Liao L, Zhang F F, He X L, et al. Confined-doped fiber for effective mode control fabricated by MCVD process [J]. Applied Optics, 2018, 57(12): 3244-3249.
- [112] Huang Z M, Shu Q, Luo Y, et al. 3.5 kW narrow-linewidth monolithic fiber amplifier at 1064 nm by employing a confined doping fiber[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2021, 38(10): 2945-2952.
- [113] Wu H S, Li R X, Xiao H, et al. High-power tandem-pumped fiber amplifier with beam quality maintenance enabled by the confined-doped fiber[J]. Optics Express, 2021, 29(20): 31337-31347.
- [114] 吴函烁, 宋家鑫, 马鹏飞, 等. 高光束质量 6 kW 级窄线宽光纤激光[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 20210859.
- Wu H S, Song J X, Ma P F, et al. High beam quality 6 kW narrow linewidth fiber laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(3): 20210859.
- [115] Cooper M A, Gausmann S, Antonio-Lopez J E, et al. Confined doping LMA fibers for high power single frequency lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 11981: 23-29.
- [116] Kalyoncu S K, Mete B, Yeniyay A. Diode-pumped triple-clad fiber MOPA with an output power scaling up to 4.67 kW [J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 1870-1873.
- [117] 张磊, 楼风光, 王孟, 等. 同带泵浦的万瓦级三包层掺镱光纤[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1315001.
- Zhang L, Lou F G, Wang M, et al. Yb-doped triple-clad fiber for nearly 10 kW level tandem-pumped output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1315001.
- [118] Daniel J M O, Simakov N, Hemming A, et al. Metal clad active fibres for power scaling and thermal management at kW power levels[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18592-18606.
- [119] Daniel J M O, Simakov N, Hemming A, et al. Improved SBS suppression in high power fibre lasers using metal coated active fibre[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2017.
- [120] Yu C X, Shatrovov O, Fan T Y, et al. Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5202-5205.