

0.9~1.0 μm 近红外连续光纤激光器的研究进展

党文佳 李哲 卢娜 李玉婷 张蕾 田晓

Research progress of 0.9 ~ 1.0 μm near-infrared continuous-wave fiber lasers

DANG Wen-jia, LI Zhe, LU Na, LI Yu-ting, ZHANG Lei, TIAN Xiao

引用本文:

党文佳, 李哲, 卢娜, 李玉婷, 张蕾, 田晓. 0.9~1.0 μm 近红外连续光纤激光器的研究进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 264-274.

doi: 10.37188/CO.2020-0193

DANG Wen-jia, LI Zhe, LU Na, LI Yu-ting, ZHANG Lei, TIAN Xiao. Research progress of 0.9 ~ 1.0 μm near-infrared continuous-wave fiber lasers[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 264-274. doi: 10.37188/CO.2020-0193

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0193>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

固体激光器与光纤激光器对光子晶体光纤棒耦合的分析与对比

Analysis and comparison of solid-state lasers and fiber lasers on the coupling of rod-type photonic crystal fiber

中国光学. 2018, 11(6): 958 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0958>

结构紧凑的双波长连续波掺铒光纤激光器

Compact dual-wavelength continuous-wave Er-doped fiber laser

中国光学. 2019, 12(4): 810 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0810>

20~1 250 Hz光纤激光加速度传感系统设计

20~1 250 Hz fiber laser acceleration sensing system

中国光学. 2017, 10(4): 469 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0469>

远红外固体激光器研究进展

Research progress of far-infrared solid-state lasers

中国光学. 2018, 11(6): 889 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0889>

不同角度包层光剥离的理论与实验研究

Stripping of cladding light at different angles: theoretical and experimental studies

中国光学. 2019, 12(5): 1124 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1124>

近红外光热转换纳米晶研究进展

Research progress of near-infrared photothermal conversion nanocrystals

中国光学. 2017, 10(5): 541 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0541>

文章编号 2095-1531(2021)02-0264-11

0.9~1.0 μm 近红外连续光纤激光器的研究进展

党文佳^{1*}, 李哲^{2,3}, 卢娜¹, 李玉婷¹, 张蕾¹, 田晓¹

(1. 西安航空学院理学院, 陕西西安 710077;

2. 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术
国家重点实验室, 陕西西安 710119;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 波长为 0.9~1.0 μm 的近红外连续光纤激光器在高功率蓝光和紫外激光产生、高功率单模泵浦源、生物医学以及激光雷达等领域具有重要的应用前景, 成为近年来一个研究热点。目前, 0.9~1.0 μm 光纤激光器的增益机制主要有稀土离子增益和非线性效应增益, 本文详细梳理了基于这两类增益机制的 0.9~1.0 μm 连续光纤激光器的研究进展, 并深入分析了各类激光器存在的技术瓶颈及解决途径, 最后对 0.9~1.0 μm 光纤激光器的发展趋势和应用前景进行了展望。

关键词: 光纤激光器; 0.9~1.0 μm 近红外激光; 稀土离子增益; 非线性效应增益

中图分类号: O436

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2020-0193

Research progress of 0.9 ~ 1.0 μm near-infrared continuous-wave fiber lasers

DANG Wen-jia^{1*}, LI Zhe^{2,3}, LU Na¹, LI Yu-ting¹, ZHANG Lei¹, TIAN Xiao¹

(1. School of Science, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China;

2. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and
Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: wenjia_dang@126.com

Abstract: Near-infrared continuous-wave fiber lasers with wavelengths of 0.9~1.0 μm have important application prospects in the fields of high-power blue and ultraviolet laser generation, high-power single-mode pump sources, biomedicine and lidars. They have thus become a heavily researched topic in recent years. At

收稿日期: 2020-10-27; 修订日期: 2020-12-09

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (No. 2019JQ-914); 陕西省创新能力支撑计划项目 (No. 2019KRM093); 陕西省教育厅专项科研计划项目 (No. 17JK0394, No. 19JK0429); 陕西省科技厅重点研发计划项目 (No. 2018ZDXM-GY-051)

Supported by the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (No. 2019JQ-914); Innovation Capability Support Program of Shaanxi (No. 2019KRM093); Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (No. 17JK0394, No. 19JK0429); Key Research and Development Program Fund of Shaanxi Science and Technology Department (No. 2018ZDXM-GY-051)

present, their gain mechanisms mainly include a rare earth ion gain or a nonlinear effect gain. In this paper, the research progress of 0.9~1.0 μm fiber lasers based on these two kinds of gain mechanisms are reviewed in detail, and the technical bottlenecks and solutions of these lasers are analyzed. Furthermore, the potential directions for the future of their research are proposed.

Key words: fiber laser; near-infrared laser with a wavelength of 0.9~1.0 μm ; rare earth ion gain; nonlinear effect gain

1 引言

光纤激光器因在输出功率、光束质量、电光效率以及稳定性等方面具有独特优势, 逐渐成为工业制造、生物医疗以及军事国防等应用领域的主流激光光源^[1-2]。光纤激光器一般采用稀土离子掺杂光纤作为增益介质, 其工作波长由稀土离子能级结构决定, 且只能局限在特定波段。通常, 光纤激光器容易获得波长 $>1 \mu\text{m}$ 的高功率激光输出, 例如掺镱光纤激光器在 1070 nm 波长已实现 20 kW 的单纤输出功率^[3], 掺铒光纤激光器在 1601 nm 波长处已实现 656 W 的激光输出^[4], 掺铥光纤激光器在 2050 nm 波长处已获得 1 kW 的激光输出^[5]。虽然上述每一类光纤激光器的输出功率已达数百瓦甚至千瓦量级, 而在 0.9~1.0 μm 波长范围内实现高功率短波红外激光输出却存在较大难度, 输出功率仍在百瓦水平。

光纤激光器的增益机制主要分为两种类型: 一是由稀土离子中电子能级跃迁所释放的能量来提供增益, 如掺镱光纤激光器、掺铒光纤激光器; 另一类是由受激拉曼散射效应 (Stimulated Raman Scattering, SRS)、受激布里渊散射效应等来提供非线性效应增益, 如拉曼光纤激光器、随机光纤激光器。以上两类增益机制的光纤激光器都具有获得 $<1 \mu\text{m}$ 波长激光的能力。另外, 光纤激光器将光束约束在近似一维结构的光纤波导中, 可以实现更高亮度与光束质量的激光输出, 并且在高亮度泵浦源、非线性频率转换等应用领域的表现已优于半导体激光器 (Laser Diode, LD)。

目前, 波长为 0.9~1.0 μm 的高亮度光纤激光技术已逐渐成为光纤激光器领域的一个重要研究方向, 并在高功率蓝光和紫外激光产生、高功率单模泵浦源、生物医学以及激光雷达等领域具有

重要的应用需求。因此, 本文对基于这两类增益机制的波长为 0.9~1.0 μm 的近红外连续光纤激光器的研究进展进行了详细梳理, 对各类型光纤激光器的特点进行了总结, 并对目前存在的技术瓶颈及解决途径进行了深入分析, 最后对短波红外光纤激光器的发展趋势和应用前景进行了展望。

2 基于稀土离子增益的 0.9~1.0 μm 近红外光纤激光器

2.1 掺钕 (Nd) 光纤激光器

钕离子是最早用于激光器的三价稀土离子, 其在磷酸盐玻璃中的最强发射峰位于 900 nm、1053 nm 和 1330 nm, 在硅玻璃中的最强发射峰位于 950 nm、1065 nm 和 1320 nm, 因此具有 900~950 nm 的近红外发射波长^[6-8]。早在 1986 年, 英国 Southampton 大学的 I. P. Alcock 等人就报道了采用掺钕光纤实现 3.4 mW 的 0.9 μm 连续激光输出的实验结果^[9]。但由于单模增益光纤的模场面积小, 较高的功率密度容易造成纤芯损伤, 故单模光纤激光器输出功率一般为 mW 量级。

随着增益光纤制造工艺水平的提升, 大芯径双包层掺钕光纤激光器的输出功率逐渐提升至数十瓦量级, 但大纤芯直径光纤中易形成多模运转, 从而造成输出激光的光束质量下降。2004 年, 南安普顿大学的 D. B. S. Sohl 等人研制出 908~938 nm 内的波长可调的掺钕双包层光纤激光器, 最大输出功率为 2.4 W@926 nm^[10]。2013 年, M. Laroche 等人报道了纤芯/内包层直径分别为 (20/80) μm 的掺钕光纤, 实现了 1060 nm 和 910 nm 的双波长激光输出, 其中 910 nm 激光的输出功率为 20 W^[11]。2015 年, B. Leconte 等人采用纤芯/包层直径为 (20/60) μm 、纤芯/包层数值孔径为 0.07/

0.45 的掺钕光纤, 实现了 22 W 的 915 nm 连续激光输出^[12]。

研究人员发现通过对增益光纤的波导结构进行优化设计能够获得更大的模场面积和单模传输特性, 从而可以实现更高功率、高光束质量的 0.9~1.0 μm 近红外光纤激光输出。2016 年, P. H. Pax 等人基于优化的光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF), 并利用 808 nm 和 880 nm 的 LD 进行混合泵浦, 获得了 26.7 W 的 925 nm 连续激光输出, 其中斜率效率为 35%, 如图 1 所示^[13]。2020 年, Alexandre Barnini 等人基于自主研制的低数

值孔径大模场掺钕光纤, 获得了功率为 17 W、光束质量为 $M^2=1.1$ 的 921 nm 光纤激光^[14]。另外, 2011 年, X. Délen 等人采用 Nd:YAG 单晶光纤作为增益介质, 在 86 W 泵浦功率时获得 34 W 的 946 nm 的激光输出^[15]。该实验中单晶光纤的直径为 1 mm, 较大的直径使其模式控制能力弱于普通双包层光纤和光子晶体光纤, 导致其光束质量劣化, $M^2<5$ 。但是单晶光纤的散热能力和输出光束质量又优于一般晶体材料, 故其仍可作为一种实现高功率 0.9~1.0 μm 近红外光纤激光输出的优良增益介质。

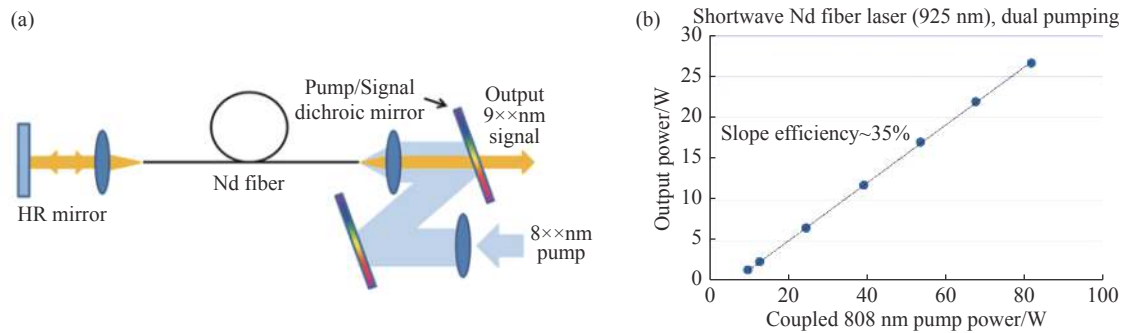


图 1 (a) 掺钕光纤激光器系统原理图; (b) 双波长泵浦掺钕光纤激光器的输出功率^[13]

Fig. 1 (a) Schematic diagram Nd-doped fiber laser; (b) output power of dual wavelength pumped Nd fiber laser^[13]

总的来说, Nd^{3+} 掺杂光纤要获得 900~950 nm 的高功率激光, 主要挑战来自于 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{9/2}$ 跃迁的 3 能级性质及其与 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{11/2}$ (1050~1150 nm) 和 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{13/2}$ (1330 nm) 2 个 4 能级跃迁的竞争; 另一个是 Nd^{3+} 在硅中的溶解度较低, 低浓度 Nd^{3+} 不利于获得理想的光谱参数。

2.2 掺镱 (Yb) 光纤激光器

相比于掺钕光纤激光器, 掺镱光纤激光器具有 Yb^{3+} 离子能级结构简单、上能级寿命长、量子亏损小、无激发态吸收及无上转换损耗等优点, 并且其发射光谱范围为 950~1200 nm, 因而成为实现高功率短波红外激光输出的最重要激光器类型。波长小于 1 μm 的掺镱光纤激光器的工作波长一般在 976 nm 附近。此类激光器要工作于 3 能级状态, 粒子数反转比率要大于 50%, 从而导致泵浦阈值高、放大自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 强、放大效率低等问题, 使其功率提升面临巨大挑战^[16-18]。

关于 0.9~1 μm 近红外掺镱光纤激光器的研究最早开始于 20 世纪 90 年代。1990 年, 英国南安普顿大学 D. C. Hanna 等人采用单模单包层光纤作为增益介质、染料激光器作为泵浦源, 实现了 9.3 mW 的 974 nm 激光输出^[19]。2000 年, L. A. Zenteno 等用 946 nm 的 Nd:YAG 激光器正向泵浦单包层单模光纤, 获得 0.655 W 的 979.8 nm 激光输出^[20]。2009 年, 北京工业大学的 S. Zou 等人采用单模单包层光纤获得 1.32 W 的 980 nm 激光输出^[21]。2011 年, M. Laroche 等人利用主振荡功率放大 (Master Oscillator Power Amplified, MOPA) 方案实现了 2.1 W 的 980 nm 全光纤激光器^[22]。基于单包层增益光纤的激光器需要泵浦光直接耦合进纤芯, 对泵浦源的亮度、泵浦光耦合效率等要求较高, 其输出功率只能维持在 W 量级。

随着对 0.9~1 μm 近红外光纤激光器理论更进一步地完善, 科研人员发现双包层增益光纤的纤芯/包层比值 (芯包比) 是决定 976 nm 掺镱光纤

激光器效率的一个重要因素, 并且对激光光谱、功率等输出特性具有重要的影响^[23]。因此, 随着大芯包比增益光纤的运用, 0.9~1 μm 近红外掺镱光纤激光器的输出功率有了大幅提升。2015 年, 中国工程物理研究院的王岩山等人对增益光纤参数与输出特性之间的关系进行了理论研究, 结果表明增大增益光纤芯包比能够有效抑制 ASE。同时, 他们采用中心波长为 981.7 nm 光纤光栅、915 nm 泵浦源、纤芯/内包层直径为 (20/130) μm 双包层光纤和纤芯/内包层直径为 (60/130) μm 双包层光纤搭建了全光纤结构的激光器, 获得了 16.7 W 的 981.7 nm 的激光输出^[24]。

2016 年, 国防科技大学的许晓军课题组分别采用 980 nm 单模 LD 和 975 nm 单模 LD 作为种

子源, 并分别采用纤芯/内包层直径为 (20/130) μm 和 (60/130) μm 的双包层光纤搭建了光纤放大器, 研究了激光放大过程中的放大效率、ASE 等问题, 在波长为 980 nm 处实现了 6.8 W 的激光输出^[25]。2019 年, 该课题组采用激光二极管提供种子光, 并以纤芯/内包层直径为 (60/130) μm 、纤芯/内包层数值孔径为 0.1/0.46 的双包层掺镱光纤搭建了双向泵浦结构的放大器, 在 976 nm 波段实现了 100 W 的激光输出, 如图 2 所示。虽然该激光器为多模输出, 但其亮度比同等功率的多模 LD 提升了 6 倍^[26]。这是国际上首次基于双包层光纤实现百瓦量级 976 nm 激光输出, 但大纤芯直径造成了其光束质量的劣化。

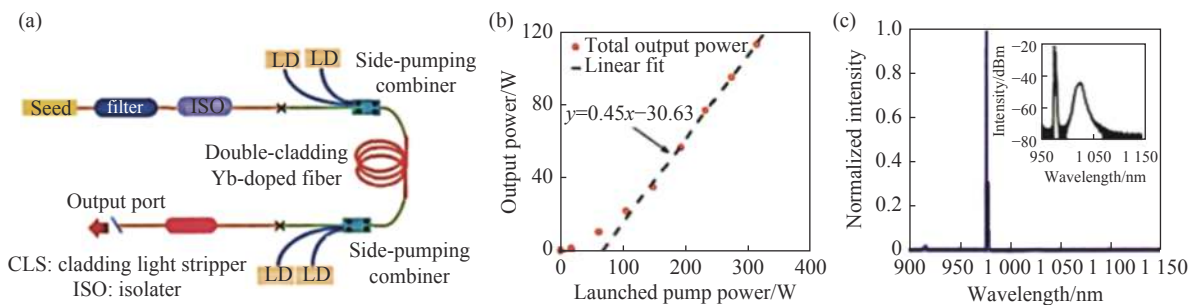


图 2 (a) 实验结构示意图; (b) 输出功率与注入抽运光功率的关系; (c) 最高输出功率时的光谱图^[26]

Fig. 2 (a) Diagram of the experimental setup; (b) output power versus pump power; (c) spectrum at the highest output power^[26]

为了在掺镱增益光纤中实现高功率的 976 nm 波段激光输出, 并同时抑制 4 能级起振和 3 能级重吸收, 研究人员除了使用大芯包比的双包层增益光纤和高亮度泵浦源外, 还采用了空气外包层光纤、光子晶体光纤、锥形光纤以及棒状光纤等多种波导结构的光纤类型, 都实现了较高功率的 0.9~1 μm 近红外光纤激光输出^[27]。

2003 年, 英国南安普顿大学的 R. Selvas 等人采用长度为 1.2 m 的空气外包层 (Jacketed Air-Clad, JAC) 掺镱光纤作为增益介质, 其中纤芯/内包层直径为 (9/20) μm , 纤芯/内包层数值孔径为 0.1/0.7, 获得最大输出功率为 1.4 W 的 977 nm 单模激光。相比于传统的双包层掺镱光纤, 该光纤增大了内包层的数值孔径, 大大提高了泵浦耦合效率^[28]。同年, 他们将增益光纤的纤芯/内包层直径优化为 (10/28) μm 、纤芯/内包层数值孔径优化

为 0.1/0.5。同时, 将光纤长度缩短至 0.4 m 以减少 3 能级重吸收, 在谐振腔内插入双色镜来抑制 4 能级振荡, 最终将 977 nm 光纤激光的输出功率提升至 3.5 W^[29]。

由于大芯径棒状掺镱 PCF 在提高模场面积和数值孔径的同时能够保证较高的光束质量, 国内外多家单位先后采用该类光纤作为增益介质对 0.9~1 μm 近红外光纤激光器进行了理论和实验研究, 并获得了高达百瓦级的激光功率。2008 年, 德国耶拿大学的 F. Röser 等人采用 1.2 m 长的 (80/200) μm 大芯径棒状掺镱 PCF 搭建了双程空间结构光纤激光器, 实现了 94 W 的 980 nm 连续激光输出, 其中斜效率约为 63%、光束质量 $M^2=2.2$ ^[30]。2008 年, 法国波尔多大学的 Johan Boulet 等人讨论了泵浦强度、泵浦吸收饱和以及 3 能级和 4 能级激光系统之间的增益竞争等参

数对光纤激光系统的影响。同时,以纤芯/内包层直径为(80/200) μm 的大芯径棒状掺镱 PCF 作为增益介质搭建了空间结构光纤激光器,并在谐振腔内插入波长选择元件来抑制 1030 nm 波段的寄生振荡,在 230 W 泵浦功率时获得功率为 94 W、斜效率为 48% 的 977 nm 激光输出^[31]。2013 年,他们基于长度为 1.16 m、纤芯直径为 80 μm 、数值孔径为 0.02 的大芯径棒状掺镱 PCF 以及声光可调谐滤波器,实现了波长调谐范围为 976~1120 nm 的激光输出,光束质量为 $M^2=1.3\pm 0.1$,其中最小输出功率为 10 W@990 nm,并在 976 nm 获得 25 W 的激光输出^[32]。

国内也有研究单位基于 PCF 实现了 0.9~1 μm 近红外光纤激光输出。2011 年,北京工业大学的李平雪等人分别采用纤芯/包层直径为(40/170) μm 和(40/200) μm 的光子晶体光纤分别获得了 1.24 W 和 1.1 W 的 980 nm 光纤激光^[33]。2013 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的何兵等人基于纤芯直径为 85 μm 、长度仅为 0.36 m 的棒状 PCF 作为增益介质搭建了空间结构的光纤激光器,通过调节谐振腔结构分别在 3 能级和 4 能级状态实现了 978 nm 和 1030 nm 的激光输出,输出功率分别为 7 W 和 13.6 W^[34]。

但是,这些外光纤激光系统均是采用空间结构,系统稳定性差。因此,基于全光纤结构实现高功率的 0.9~1 μm 近红外激光输出是未来发展趋势。同时,如何提高光纤激光器的光束质量也是需要解决的关键问题。

增益光纤的纤芯和包层直径沿光纤轴向逐渐变化,具有新型波导结构的增益光纤不仅能够提高泵浦光的耦合效率,同时还保证了较高的光束质量,为实现单模 0.9~1 μm 近红外光纤激光输出提供了可行的技术途径。2014 年,莱布尼茨光子技术研究所的 M. Leich 等人基于粉末烧结技术制作了具有阶跃折射率的掺镱光纤预制棒,经过拉丝塔拉制出大纤芯直径、高数值孔径光纤。其中,增益光纤一端纤芯直径为 126 μm ,通过拉锥技术将另一端纤芯直径从 126 μm 拉制到 10 μm ,并与一个含有 FBG 的单模光纤熔接。最终,一段长度为 0.95 m 的锥形光纤获得了 10 W 的 976 nm 单模激光输出^[35]。2018 年,俄罗斯科学院光纤研

究中心的 S. S. Aleshkina 等人研制出纤芯直径沿光纤轴向两端大、中间小的鞍型掺镱光纤。光纤两端的纤芯/包层直径约为(20/80) μm ,中间部分的纤芯/包层直径为(12/49) μm ,中间较小的纤芯直径只允许较少的激光模式传输,从而可以达到优化光束质量的目的。他们基于该光纤搭建了全光纤激光系统,获得了 10.6 W 的 976 nm 单模光纤激光输出^[36]。

全固态光子带隙光纤(Photonic Bandgap Fiber, PBF)是一种基于带隙效应导光且能够实现单模激光输出的大模场光纤,其包层一般由基质材料和周期性嵌入的高折射率棒组成^[37]。PBF 具有大模场面积、低损耗、低非线性、可控色散特性、可控折射率分布、低弯曲损耗等特性,并且其纤芯波导仅支持有限波长带宽的激光传输,能够有效抑制 976 nm 激光器中的长波长激光起振。2018 年,美国的克莱姆森大学 Liang Dong 课题组研制了纤芯/内包层直径为(25/125) μm 的双包层全固态 PBF,实现了 27.8 W 的 976 nm 激光输出,转换效率为 36.3%^[38]。2019 年,他们设计了基于多包层谐振来抑制高阶模的新型全固态 PBF,其纤芯为对角长 24 μm 、对边长 21 μm 的六边形,包层为对角长 131 μm 、对边长 124 μm 的六边形。采用该全固态 PBF 搭建了全光纤激光器,实现了 151 W 的 978 nm 单模激光输出,其中光束质量为 $M_x^2=1.25$ 、 $M_y^2=1.24$,斜率效率为 63%,如图 3(彩图见期刊电子版)所示^[39]。该实验结果是目前该波段光纤激光器输出功率的最高记录。

法国波尔多大学的研究人员们基于大芯径棒状掺镱 PCF 实现了 94 W 的空间结构光纤激光器,他们还致力于全光纤结构的单模光纤激光器的研究。2019 年,法国波尔多大学的 Nicolas Valero 等人基于自主研发的大模场八边形双包层掺镱光纤搭建了全光纤结构的光纤激光器,实现了 29.3 W 的 976 nm 单模线偏振激光输出,光束质量为 $M^2=1.2$ ^[40]。2020 年,他们优化了光纤参数,研制出纤芯/包层直径为(35/125) μm 的大模场八边形双包层掺镱光纤。该包层结构能够增大基模和高阶模之间的弯曲损耗差值。基于该光纤他们最终获得了 39 W 的 976 nm 光纤激光输出,如图 4(彩图见期刊电子版)所示^[41]。

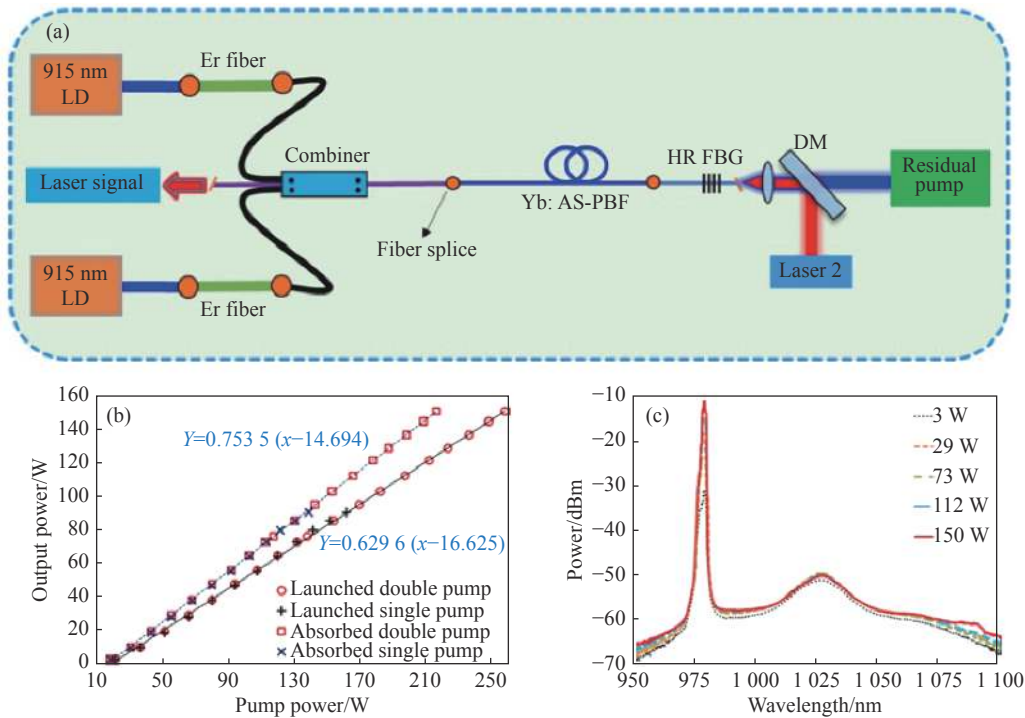


图 3 (a) 光纤激光器示意图; (b) 测量的输出功率与泵浦功率的关系; (c) 不同功率下的输出光谱^[39]

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the monolithic fiber laser; (b) measured output versus pump power; (c) measured output spectra for the double-pumped laser under various output powers^[39]

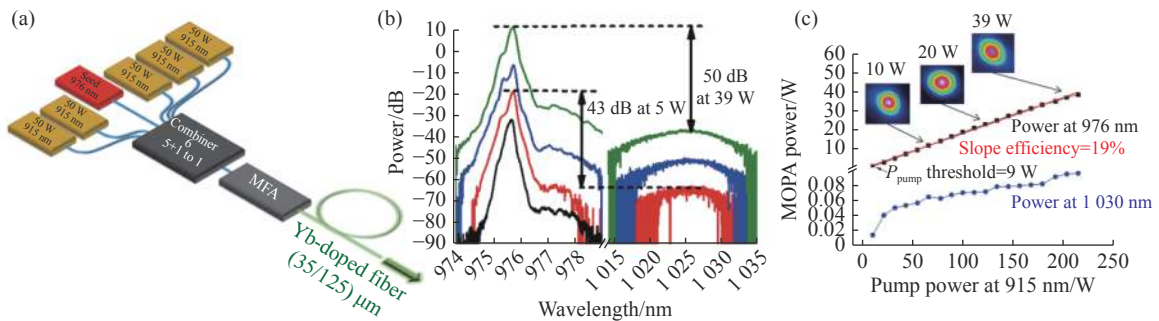


图 4 (a) 光纤激光器系统结构; (b) 976 nm 激光在不同功率下的输出光谱; (c) 976 nm 激光输出功率^[41]

Fig. 4 (a) Configuration of the monolithic fiber laser; (b) output spectra for 976 nm laser at different average output powers; (c) output power for the 976 nm signal^[41]

从莱布尼茨光子技术研究所的拉锥光纤、俄罗斯科学院光纤研究中心的鞍型光纤、美国克莱姆森大学的全固态光子带隙光纤到法国波尔多大学的凹陷内包层光纤, 都是对光纤的波导结构进行设计以达到提升输出功率和光束质量的目的。其中光子带隙光纤最有实现高功率输出的潜力, 但由于光纤结构复杂、光纤拉制工艺难度较大, 国内目前还没有相关的研究报道。

另外, 工作波长位于 976 nm 波段的单频掺镱

光纤激光器具有线宽窄、信噪比高、波长稳定等特点, 特别是在光纤传感、激光雷达以及非线性频率转换等方面具有重要应用, 因而 976 nm 波段的单频掺镱光纤激光器也成为光纤激光光源领域的一个研究热点^[42]。但是, 由于 976 nm 单频光纤激光器的光谱线宽较窄, 其输出功率目前仅为十瓦量级。目前, 976 nm 单频线偏振光纤激光器的主要研究单位为美国 NP Photonic 公司和美国亚利桑那大学, 表 1 对其研究进展进行了汇总。

表 1 976 nm 单频光纤激光器研究进展

Tab. 1 Research progress of the 976 nm single frequency fiber laser

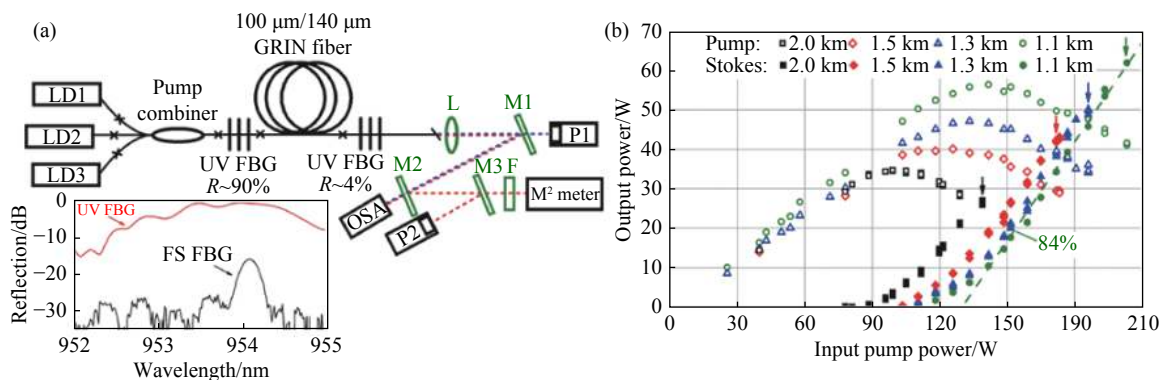
年份	研究单位	波长/nm	功率/W	参考文献
2012	NP Photonics	976	0.1	43
2013		976	0.35	44
2016	University of Arizona	976	4	45
2017		976	3.41	46
2018		976	10.1	47

3 基于非线性效应增益的 0.9~1 μm 近红外光纤激光器

传统光纤激光器依赖于增益介质在粒子数反转后的受激辐射,其工作波长由掺杂离子的能带结构决定。而基于非线性效应增益的光纤激光器则是利用了光纤材料本身存在的受激拉曼散射这一非线性效应,其工作波长由泵浦光波长和拉曼频移两者共同决定^[48]。因此,由 SRS 提供非线性效应增益的拉曼光纤激光器和随机光纤激光器具有灵活的输出波长和较宽的增益带宽,直接采用 LD 对其泵浦,能够获得 0.9~1 μm 近红外波段的激光输出。由于光纤材料的拉曼增益主要决定于泵浦光强度、拉曼增益系数(材料本身的性质)以及光纤长度,故上述两种光纤激光器均采用较长的被动光纤作为增益介质,从而具有增益高、噪声低、热分布均匀以及无光暗化效应等优点。目前,主要是俄罗斯科学院的 S. A. Babin 课题组在从事这方面的研究,他们在 0.9~1 μm 近红外光纤

激光理论和实验方面均取得了一定的研究进展。

通常,0.9~1 μm 近红外拉曼光纤激光器由光纤光栅和多模渐变折射率(Gradient-index, GRIN)光纤构成谐振腔,并直接采用多模 LD 对 GRIN 光纤进行泵浦以实现拉曼光输出和亮度提升。2013 年,俄罗斯科学院的 S. A. Babin 课题组采用 938 nm 的多模 LD,对长度为 4.5 km、纤芯/包层直径为(62.5/125) μm 的 GRIN 光纤进行泵浦,获得了 3 W 的 980 nm 激光输出^[49]。2016 年,他们把泵浦源波长更换为 915 nm,并将 GRIN 光纤的长度缩短至 2.5 km,获得了 4 W 的 954 nm 的光纤激光输出^[50]。2017 年,该课题组通过进一步优化文献^[50]中的系统参数,将 954 nm 激光的输出功率分别提升至 10 W^[51]和 50 W^[52]。2018 年,他们采用长度为 1.1 km、纤芯/包层直径为(100/140) μm 的大芯径 GRIN 光纤来提高二阶拉曼光的激发阈值,获得了功率为 62 W、光束质量 $M^2 < 3$ 的 954 nm 激光输出,如图 5 所示^[53]。2019,该课题组又采用 938 nm 泵浦源、976 nm 光纤光栅以及 1 km 长的纤芯/包层直径为(100/140) μm 的 GRIN 光纤搭建了拉曼光纤激光器,实现了 49.1 W 的 976 nm 激光输出,其中光束质量 $M^2 \leq 2$,斜率效率为 70%^[54]。需要特别指出的是,上述所有研究均直接采用多模 LD 对 km 量级长度的大芯径 GRIN 光纤进行抽运,由于 GRIN 光纤中的 SRS 具有光束净化效应,即使光纤芯径比较大仍可以获得近单模的激光输出。

图 5 (a) LD 直接泵浦的全光纤拉曼激光器结构; (b) 不同渐变折射率光纤长度下的拉曼光纤激光输出功率^[53]Fig. 5 (a) All-fiber configurations of Raman fiber lasers with direct LD pumping; (b) output power of the Raman fiber laser at different GRIN fiber lengths versus input pump power^[53]

与拉曼光纤激光器不同,随机光纤激光器不存在点式反馈元件以及传统意义上的谐振腔,它

由光纤中折射率不均匀性引起的瑞利散射来提供随机反馈^[55],从而在光源相干性^[56]、光谱特性^[57]

以及统计特性^[58]等方面展现出了独特的物理属性。近年来,国防科技大学的周朴课题组在高功率/高效率随机光纤激光方面获得了 kW 级激光输出^[59],上海光学精密机械研究所的冯衍在光谱操控方面实现 1~1.9 μm 的可调谐随机光纤激光输出^[60],电子科技大学的饶云江课题组探索了随机光纤激光器在光纤传感与通信等领域的应用^[61],加拿大渥太华大学的 X. Y. Bao 等人在窄线宽方面获得了线宽为 1 kHz 的布里渊随机光纤激光^[62]。

虽然关于随机光纤激光器的研究已有了长足的发展,但是上述研究成果中的随机激光波长均大于 1 μm ,而从事 0.9~1 μm 随机光纤激光研究工作的团队较少,研究人员主要来自俄罗斯科学院的 S. A. Babin 课题组。2013 年, S. A. Babin 等

人采用低光束质量的 938 nm LD 以及纤芯/包层直径为 (62.5/125) μm 的 GRIN 光纤搭建了随机光纤激光器,获得了 0.5 mW 的 980 nm 随机激光输出,光束质量相比 LD 有显著提高^[63]。2018 年,他们采用 1.1 km 长的纤芯/包层直径为 (100/140) μm 的 GRIN 光纤和 915 nm 的多模 LD 搭建了随机光纤激光器,获得了 27 W 的 996 nm 二阶随机激光输出。其中,由于多模光纤存在拉曼光束净化效应,相比于光束质量 $M^2=30$ 的 LD,二阶随机激光的光束质量得以极大地提高, M^2 达 1.6,如图 6 所示^[64]。这种基于渐变折射率光纤的随机光纤激光器受限于泵浦源亮度,其输出功率还未达到 10^2 W 量级。

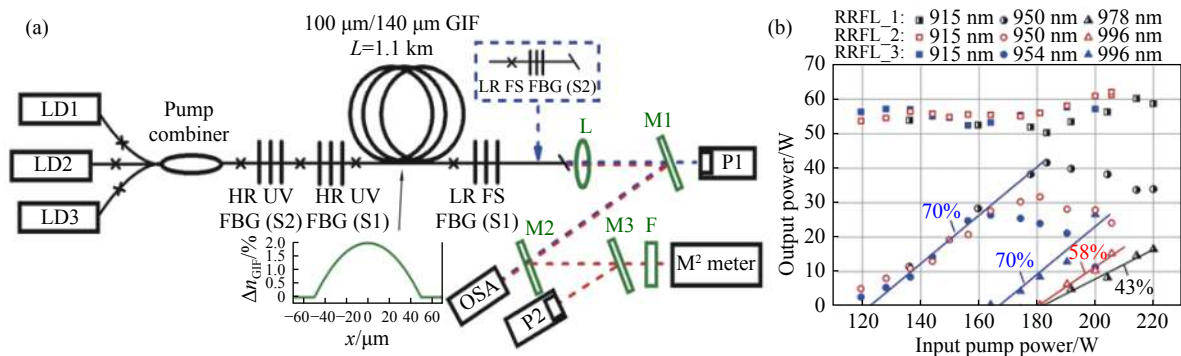


图 6 (a) LD 直接泵浦的级联全光纤随机激光器; (b) 二阶随机光纤激光输出功率与输入泵浦功率的关系^[64]

Fig. 6 (a) All-fiber configuration of the cascaded random fiber laser with direct LD pumping; (b) measured output power at 2nd-order random lasing wavelengths versus the input pump power^[64]

4 结 论

目前,基于新型增益机制、不同光纤材料和新型波导结构的各类 0.9~1 μm 近红外光纤激光器还在进一步发展,但整体功率水平仍远低于 1~2 μm 光纤激光器。其中,0.9~1 μm 近红外掺镱光纤激光器的输出功率最高(151 W@978 nm),激光器中存在的 3 能级重吸收和 4 能级起振是制约其功率提升的主要因素,目前的主流思路是通过采用高增益、波长截止的新型波导结构增益光纤来解决该问题。随着功率的进一步提升,可以预见,光子暗化效应、模式不稳定、非线性效应等将会成为该波段掺镱光纤激光器新阶段的限制因素。

而掺镱光纤中 Nd^{3+} 掺杂浓度较低、发射截面

较小,导致 0.9~1 μm 掺镱光纤激光器的输出功率主要受限于光纤材料。另外,放大过程中的 4 能级竞争,808 nm 和 880 nm 泵浦源较低的输出功率等因素也限制了其功率提升。解决途径主要是通过改进光纤材料性能来提升激光器功率,因此,设计和研制大模场面积、无截止单模特性、高数值孔径的光子晶体光纤成为掺镱光纤激光器的研究重点之一。

而 0.9~1 μm 近红外拉曼光纤激光器、随机光纤激光器受限于光纤器件性能、泵浦源亮度以及激光放大过程中产生的高阶激光等因素,其输出功率仍未突破百瓦量级。因此,如何通过设计光纤激光系统结构、均衡非线性效应增益与系统损耗来提升激光器效率和功率,将是下一步研究的重点方向。

鉴于 0.9~1 μm 近红外光纤激光器在高功率蓝光和紫外激光产生、高功率单模泵浦源、生物医学以及激光雷达等领域的重要应用需求, 各类

激光器都将会随着光纤激光理论和光纤材料的进步而快速发展, 并在发展过程中催生出各具特色的研究方向。

参考文献:

- [1] JAUREGUI C, LIMPET J, TUNNERMANN A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [2] ZERVAS M N. High power ytterbium-doped fiber lasers—fundamentals and applications[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2014, 28(12): 1442009.
- [3] 党文佳, 李哲, 李玉婷, 等. 高功率连续波掺镱光纤激光器研究进展[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 676-694.
DANG W J, LI ZH, LI Y T, *et al.*. Recent advances in high-power continuous-wave ytterbium-doped fiber lasers[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 676-694. (in Chinese)
- [4] LIN H Q, FENG Y J, FENG Y T, *et al.*. 656 W Er-doped, Yb-free large-core fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(13): 3080-3083.
- [5] EHRENREICH T, LEVEILLE R, MAJID I, *et al.*. 1-kW, all-glass Tm: fiber laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580: 758016.
- [6] 施旗, 程红, 吕景文, 等. 掺钕磷酸盐激光玻璃的光谱特性[J]. *发光学报*, 2005, 26(3): 359-364.
SHI Q, CHENG H, LÜ J W, *et al.*. Spectroscopic properties of Nd³⁺-doped phosphate laser glasses[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2005, 26(3): 359-364. (in Chinese)
- [7] 吴春婷, 常奥磊, 温雅, 等. 单掺Nd³⁺双波长全固态激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2020, 41(4): 414-428.
WU CH T, CHANG A L, WEN Y, *et al.*. Research progress of Nd³⁺-doped dual-wavelength all-solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(4): 414-428. (in Chinese)
- [8] TER-MIKIRTYCHEV V. *Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers*[M]. Cham: Springer, 2014.
- [9] ALCOCK I P, FERGUSON A I, HANNA D C, *et al.*. Continuous-wave oscillation of a monomode neodymium-doped fibre laser at 0.9 μm on the ⁴F_{3/2}→⁴I_{9/2} transition[J]. *Optics Communications*, 1986, 58(6): 405-408.
- [10] SOH D B S, YOO S W, NILSSON J, *et al.*. Cladding pumped Nd-doped fiber laser tunable from 908 to 938 nm[C]. *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics, IEEE*, 2004.
- [11] LAROCHE M, CADIER B, GILLES H, *et al.*. 20 W continuous-wave cladding-pumped Nd-doped fiber laser at 910 nm[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3065-3067.
- [12] LECONTE B, CADIER B, GILLES H, *et al.*. Extended tunability of Nd-doped fiber lasers operating at 872~936 nm[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 4098-4101.
- [13] PAX P H, KHITROV V V, DRACHENBERG D R, *et al.*. Scalable waveguide design for three-level operation in neodymium doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 28633-28647.
- [14] BARNINI A, LE CORRE K, KERVELLA L, *et al.*. Low numerical aperture large-mode-area neodymium-doped fibers fabricated by SPCVD and ASD for laser operation near 920 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11276: 112760L.
- [15] DÉLEN X, MARTIAL I, DIDIERJEAN J, *et al.*. 34 W continuous wave Nd : YAG single crystal fiber laser emitting at 946 nm[J]. *Applied Physics B*, 2011, 104(1): 1.
- [16] 住村和彦, 西浦匡则. 图解光纤激光器入门[M]. 宋鑫, 译. 北京: 机械工业出版社, 2013: 74-84.
KAZUHIKO, SUMIMURA. *Graphical Introduction to Fiber Lasers*[M]. SONG X, trans. Beijing: China Machine Press, 2013: 74-84. (in Chinese)
- [17] 李海清, 廖雷, 刘超平, 等. 短波长输出的掺镱光纤及其激光器研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(6): 5-9.
LI H Q, LIAO L, LIU CH P, *et al.*. Study on Yb-doped fiber of short-wavelength and its lasers[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2017, 45(6): 5-9. (in Chinese)
- [18] 张雪霞, 葛廷武, 丁星, 等. 分布式抽运连续光纤激光器研究[J]. *发光学报*, 2016, 37(9): 1071-1075.
ZHANG X X, GE T W, DING X, *et al.*. Study of continuous fiber laser with distributed pump structure[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(9): 1071-1075. (in Chinese)
- [19] HANNA D C, PERCIVAL R M, PERRY I R, *et al.*. An ytterbium-doped monomode fibre laser: broadly tunable operation from 1.010 μm to 1.162 μm and three-level operation at 974 nm[J]. *Journal of Modern Optics*, 1990, 37(4): 517-525.
- [20] ZENTENO L A, MINELLY J D, DEJNEKA M, *et al.*. 0.65 W single-mode Yb-fiber laser at 980 nm pumped by 1.1 W Nd : YAG[C]. *Proceedings of Advanced Solid State Lasers 2000, Optical Society of America*, 2000: MD7.

- [21] ZOU S, LI P, WANG L, *et al.*. 980 nm Yb-doped single-mode fiber laser and its frequency-doubling with BIBO[J]. *Applied Physics B*, 2009, 95(4): 685-690.
- [22] BARTOLACCI C, LAROCHE M, GILLES H, *et al.*. All-fiber Yb-doped CW and pulsed laser sources operating near 980 nm[C]. *Proceedings of Advanced Solid-State Photonics 2011*, Optical Society of America, 2011: ATuB9.
- [23] 王争, 闫明鉴, 尹路, 等. 不同角度包层光剥离的理论及实验研究[J]. *中国光学*, 2019, 12(5): 1124-1130.
WANG ZH, YAN M J, YIN L, *et al.*. Stripping of cladding light at different angles: theoretical and experimental studies[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1124-1130. (in Chinese)
- [24] WANG Y SH, KE W W, MA Y, *et al.*. The design and experiment research of high brightness all-fiberized ytterbium doped laser operating near 980 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9671: 96710U.
- [25] YU Y, AN Y Y, CAO J Q, *et al.*. Experimental study on all-fiberized continuous-wave Yb-doped fiber amplifier operating near 980 nm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(4): 398-401.
- [26] 杜赫庭, 刘爱民, 曹润秋, 等. 自主研发的976 nm波段全光纤激光器实现了100 W量级功率输出[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31(10): 72.
DU H T, LIU A M, CAO J Q, *et al.*. The self-developed 976 nm all-fiber laser achieves 100 W output power[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31(10): 72. (in Chinese)
- [27] 李平雪, 张月. 980 nm掺镱光纤激光器综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 36-47.
LI P X, ZHANG Y. Review of 980 nm Yb-doped fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 36-47. (in Chinese)
- [28] SELVAS R, SAHU J K, FU L B, *et al.*. High-power, low-noise, Yb-doped, cladding-pumped, three-level fiber sources at 980 nm[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(13): 1093-1095.
- [29] YLÄ-JARKKO K H, SELVAS R, SOH D B S, *et al.*. A 3.5 W 977 nm cladding-pumped jacketed air-clad ytterbium-doped fiber laser[C]. *Proceedings of Advanced Solid-State Photonics 2003*, Optical Society of America, 2003: 103.
- [30] RÖSER F, JAUREGUI C, LIMPET J, *et al.*. 94 W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 17310-17318.
- [31] BOULLET J, ZAOUTER Y, DESMARCHELIER R, *et al.*. High power ytterbium-doped rod-type three-level photonic crystal fiber laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 17891-17902.
- [32] ROYON R, LHERMITE J, SARGER L, *et al.*. High power, continuous-wave ytterbium-doped fiber laser tunable from 976 to 1120 nm[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13818-13823.
- [33] LI P X, ZHANG X X, LIU ZH, *et al.*. Large-mode-area double-cladding photonic crystal fiber laser in the watt range at 980 nm[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(8): 084206.
- [34] HE J, WANG Z W, WU W D, *et al.*. Short-length large-mode-area photonic crystal fiber laser operating at 978 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8796: 87961V.
- [35] LEICH M, JÄGER M, GRIMM S, *et al.*. Tapered large-core 976 nm Yb-doped fiber laser with 10 W output power[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(4): 045102.
- [36] ALESHKINA S S, LEVCHENKO A E, MEDVEDKOV O I, *et al.*. Photodarkening-free Yb-doped saddle-shaped fiber for high power single-mode 976-nm laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(1): 127-130.
- [37] GU G CH, KONG F T, HAWKINS T, *et al.*. Ytterbium-doped large-mode-area all-solid photonic bandgap fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13962-13968.
- [38] MATNIYAZ T, KALICHEVSKY-DONG M T, HAWKINS T W, *et al.*. Single-mode Yb-doped Double-clad All-solid Photonic Bandgap Fiber Laser Generating 27.8 W at 976 nm[C]. *Proceedings of Advanced Solid State Lasers 2018*, Optical Society of America, 2018: AM6A.28.
- [39] LI W S, MATNIYAZ T, GAFSI S, *et al.*. 151 W monolithic diffraction-limited Yb-doped photonic bandgap fiber laser at ~978 nm[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 24972-24977.
- [40] VALERO N, FERAL C, LHERMITE J, *et al.*. 29 W diffraction limited monolithic ytterbium doped fiber laser system operating at 976 nm in the continuous wave regime[C]. *Proceedings of 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, IEEE*, 2019: 1-1.
- [41] VALERO N, FERAL C, LHERMITE J, *et al.*. 39 W narrow spectral linewidth monolithic ytterbium-doped fiber MOPA system operating at 976 nm[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1495-1498.
- [42] 黄振鹏. 978 nm 单频光纤激光器及其倍频研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
HUANG ZH P. Research on the single-frequency fiber laser at 978 nm and its frequency doubling[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [43] ZHU X SH, SHI W, ZONG J, *et al.*. 976 nm single-frequency distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *Optics Letters*,

- 2012, 37(20): 4167-4169.
- [44] ZHU X SH, ZHU G W, SHI W, *et al.*. 976 nm single-polarization single-frequency ytterbium-doped phosphate fiber amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(14): 1365-1368.
- [45] WU J W, ZHU X SH, TEMYANKO V, *et al.*. Power scaling of single-frequency fiber amplifiers at 976 nm[C]. *Proceedings of Science and Innovations 2016, Optical Society of America*, 2016: SM1Q.5.
- [46] WU J W, ZHU X SH, TEMYANKO V, *et al.*. Yb³⁺-doped double-clad phosphate fiber for 976 nm single-frequency laser amplifiers[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(4): 1310-1316.
- [47] WU J, ZHU X, WEI H, *et al.*. Power scalable 10 W 976 nm single-frequency linearly polarized laser source[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 951-954.
- [48] 冯衍, 姜华卫, 张磊. 高功率拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201005.
FENG Y, JIANG H W, ZHANG L. Advances in high power Raman fiber laser technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201005. (in Chinese)
- [49] KABLUKOV S I, DONTSOVA E I, ZLOBINA E A, *et al.*. An LD-pumped Raman fiber laser operating below 1 μm [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(8): 085103.
- [50] ZLOBINA E A, KABLUKOV S I, SKVORTSOV M I, *et al.*. 954 nm Raman fiber laser with multimode laser diode pumping[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(3): 035102.
- [51] ZLOBINA E A, KABLUKOV S I, WOLF A A, *et al.*. Nearly single-mode Raman lasing at 954 nm in a graded-index fiber directly pumped by a multimode laser diode[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 9-12.
- [52] ZLOBINA E A, KABLUKOV S I, WOLF A A, *et al.*. Generating high-quality beam in a multimode LD-pumped all-fiber Raman laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12581-12587.
- [53] EVMENOVA E A, KABLUKOV S I, NEMOV I N, *et al.*. High-efficiency LD-pumped all-fiber Raman laser based on a 100 μm core graded-index fiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(9): 095101.
- [54] KUZNETSOV A G, KABLUKOV S I, WOLF A A, *et al.*. 976 nm all-fiber Raman laser with high beam quality at multimode laser diode pumping[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(10): 105102.
- [55] TURITSYN S K, BABIN S A, EI-TAHER A E, *et al.*. Random distributed feedback fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 231-235.
- [56] FOTIADI A A. An incoherent fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 204-205.
- [57] SUGAVANAM S, SOROKINA M, CHURKIN D V. Spectral correlations in a random distributed feedback fibre laser[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15514.
- [58] OGORODNIKOV L L, VERGELES S S. Intensity statistics in a long random fiber Raman laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 651-654.
- [59] ZHANG H W, HUANG L, SONG J X, *et al.*. Quasi-kilowatt random fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2613-2616.
- [60] ZHANG L, JIANG H W, YANG X Z, *et al.*. Nearly-octave wavelength tuning of a continuous wave fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42611.
- [61] 饶云江. 光纤随机激光器及其应用研究进展[J]. *光子学报*, 2019, 48(11): 1148002.
RAO Y J. Research advances of random fiber lasers and its applications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 1148002. (in Chinese)
- [62] ZHANG L, WANG CH, LI ZH Y, *et al.*. High-efficiency Brillouin random fiber laser using all-polarization maintaining ring cavity[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11306-11314.
- [63] BABIN S A, DONTSOVA E I, KABLUKOV S I. Random fiber laser directly pumped by a high-power laser diode[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3301-3303.
- [64] EVMENOVA E A, KUZNETSOV A G, NEMOV I N, *et al.*. 2nd-order random lasing in a multimode diode-pumped graded-index fiber[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 17495.

作者简介:



党文佳(1983—),女,陕西西安人,博士,讲师,2015年于西安电子科技大学获得工学博士学位,主要从事光外差探测、光纤激光器及光电子技术等方面的研究。E-mail: wenjia_dang@126.com