

基于 Re:YAG-SiO₂ 光纤的单频光纤激光器研究进展 (特邀)

魏振帅¹, 谢永耀², 邵贤彬², 刘俊都¹, 赵 微², 赵 显¹, 张行愚^{1,2}, 赵智刚^{1,2}, 丛振华^{1,2*}, 刘兆军^{1,2}

(1. 山东大学激光与红外系统教育部重点实验室, 山东 青岛 266237;

2. 山东大学信息科学与工程学院山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 青岛 266237)

摘 要: Re:YAG-SiO₂ 多组分玻璃光纤是以 Re:YAG 作为纤芯材料, 以石英管作为包层材料, 采用熔芯法利用拉丝塔在高温下拉制的特种光纤, 具有掺杂浓度高、增益大、机械强度高、易与石英光纤熔接等优点, 适用于短腔单频光纤激光器。文中介绍了 Re:YAG-SiO₂ 光纤的制备工艺, 结合笔者课题组在该领域的研究工作, 综述了近年来基于 Re:YAG-SiO₂ 光纤的单频激光技术在 1.0 μm, 1.5 μm 及 2.0 μm 波段的研究进展, 并对 Re:YAG-SiO₂ 光纤的制备及基于该类光纤单频激光器所存在的问题进行了归纳分析, 对未来的发展进行了展望。

关键词: 单频激光; 光纤激光器; Re:YAG-SiO₂ 光纤; 钇铝硅酸盐光纤

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220133

Research progress of single-frequency fiber laser based on Re: YAG-SiO₂ fiber (*Invited*)

Wei Zhenshuai¹, Xie Yongyao², Shao Xianbin², Liu Jundu¹, Zhao Wei², Zhao Xian¹, Zhang Xingyu^{1,2},
Zhao Zhigang^{1,2}, Cong Zhenhua^{1,2*}, Liu Zhaojun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Laser & Infrared System (Shandong University), Ministry of Education, Qingdao 266237, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, School of Information Science and Engineering,
Shandong University, Qingdao 266237, China)

Abstract: Re:YAG-SiO₂ multicomponent glass fiber is fabricated by a molten core method, in which a Re:YAG is used as the core material and a quartz tube is used as the cladding material. It has the advantages of high doping concentration, high mechanical strength, and is easy to fuse with quartz fiber. Recently, the single-frequency fiber laser has been studied extensively based on the Re:YAG-SiO₂ fiber. In this paper, the development of the Re:YAG-SiO₂ fiber fabrication and the single-frequency laser technology based on Re:YAG-SiO₂ fiber in 1.0 μm, 1.5 μm and 2.0 μm were reviewed. The difficulties and challenges of Re:YAG-SiO₂ fiber fabrication and single-frequency laser based on this type of fiber were also given.

Key words: single-frequency laser; fiber laser; Re:YAG-SiO₂ fiber; yttrium aluminum silicate fiber

收稿日期:2022-02-28; 修订日期:2022-04-10

基金项目:国家自然科学基金(62075116, 62075117); 山东省自然科学基金(ZR2019 MF039, ZR2020 MF114);

山东大学齐鲁青年学者启动基金

作者简介:魏振帅,男,硕士生,主要从事新型特种光纤制备技术、单频光纤激光器方面的研究。

导师(通讯作者)简介:丛振华,男,教授,博士生导师,博士,主要从事特种光纤制备技术、光纤激光器,全固态拉曼激光器、倍频固体拉曼激光器等方面的研究。

0 引言

单频光纤激光器具有噪声低、线宽窄和相干长度长等优点,在相干光通信、高精度光谱、引力波探测、激光雷达和水听系统等领域有着广泛的应用前景^[1-5]。单频光纤激光器的实现方式,从谐振腔的结构上看,主要分为环形腔和线型腔。其中,环形腔主要是利用行波腔结构,来消除由驻波引起的空间烧孔效应,从而实现单频激光输出。该结构通常具有较长的腔长,导致纵模间隔较小,需要插入额外的光学器件对激光进行调控^[6],才能实现窄线宽的激光输出^[7],这在引入插入损耗的同时,也使激光器结构更加复杂,稳定性易受外界环境影响^[8-10]。线型腔结构主要包括分布式反馈结构(Distributed feedback, DFB)^[11-13]和分布式布拉格反射结构(Distributed Bragg reflector, DBR)^[14-16]两种。DFB 结构是在增益光纤上刻有相移光栅,使反射带宽内形成一个窄带的带通滤波,从而实现单纵模输出^[17-18],但激光运行中增益光纤上的热积累会导致光栅折射率的变化甚至失相,从而使激光性能劣化。而 DBR 结构则是由一段增益光纤和一对光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)组成的法布里-珀罗线形腔(Fabry-Perot resonator, F-P)结构,腔长通常仅有几厘米,能够获得高达数 GHz 的纵模间隔,结合窄带宽光栅,容易实现稳定单频激光输出。直接在无源光纤上写入布拉格光栅作为腔镜,所制作的光纤激光器具有结构紧凑、激光效率高、稳定性高以及不易跳模等优点,在单频光纤激光器中得到了广泛的研究与应用^[19-21]。

为了实现稳定的单纵模输出, DBR 结构单频激光器需要较短的腔长,因而通常需要增益光纤具有较高增益系数,能够在较短的长度下提供足够的增益来实现激光的高效输出。对于传统的石英光纤来说,由于浓度猝灭效应^[22],稀土离子掺杂浓度低,光纤增益小,难以实现高效的单频激光输出。而锗酸盐和磷酸盐等软玻璃光纤具有较高的稀土溶解度,实现了高浓度的稀土离子掺杂,提高了增益系数,但该类光纤软化点较低,机械性能和热稳定性相对较差,与传统石英光纤器件难以实现高强度熔接,一定程度上限制了其发展及应用。

YAG-SiO₂ 特种光纤是一种利用熔芯法制备的新型特种光纤^[23-27],该光纤采用 Re:YAG 晶体(陶瓷或

粉末)作为纤芯材料,采用石英管作为包层材料,使用拉丝塔进行高温控制,如图 1 所示。

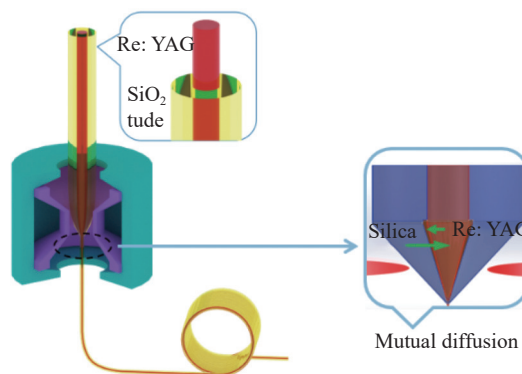


图 1 熔芯法示意图

Fig.1 Schematic diagram of molten core method

2006 年,台湾中山大学的 Y. Huang 等首次尝试利用 Cr:YAG 晶体作为纤芯材料,成功制备了传输损耗为 20 dB/m 的 Cr:YAG-SiO₂ 光纤,并利用 800 nm 激光泵浦,实现了 1.2~1.55 μm 的宽带发射^[28]。2009 年,美国克莱姆森大学的 J. Ballato 等对 YAG-SiO₂ 光纤和 Er:YAG-SiO₂ 光纤制备过程中的纤芯与包层相互扩散影响和机制进行了研究^[29]。2010 年,美国伊利诺伊大学的 P. Dragic 等制备出 Yb:YAG-SiO₂ 光纤,比传统的石英光纤具有更低的受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)^[30]。之后他们还测量出此类光纤具有更低的受激拉曼散射^[31]。2012 年,他们又研究了高掺杂 Yb:YAG-SiO₂ 光纤作为激光增益介质的可行性,发现了该类光纤具有更小的光暗化效应和更高的 SBS 阈值,证明了 YAG-SiO₂ 光纤在高能光纤激光器方向具有巨大的应用潜力^[32]。此外, Re:YAG-SiO₂ 光纤还具有高增益、高热导率、高机械强度等优点^[29,32],且石英包层使其能够与商用石英光纤具有良好的兼容性,可以进行较好的熔接^[33],有利于应用在 DBR 结构的单频光纤激光器中。近年来,国内多家单位如华南理工大学^[25-26,34-35]、中国科学院上海光学精密机械研究所^[36-37]、山东大学^[24]、上海大学^[25]、吉林大学^[38]等,均对 Re:YAG-SiO₂ 光纤开展了广泛的研究。笔者课题组采用二次拉制工艺,对 Nd³⁺、Yb³⁺、Er³⁺、Tm³⁺ 等不同稀土离子掺杂的 YAG-SiO₂ 光纤的制备工艺进行了研究,对光纤性能和参数进行了表征,如图 2 所示,并利用所制备光纤实现了

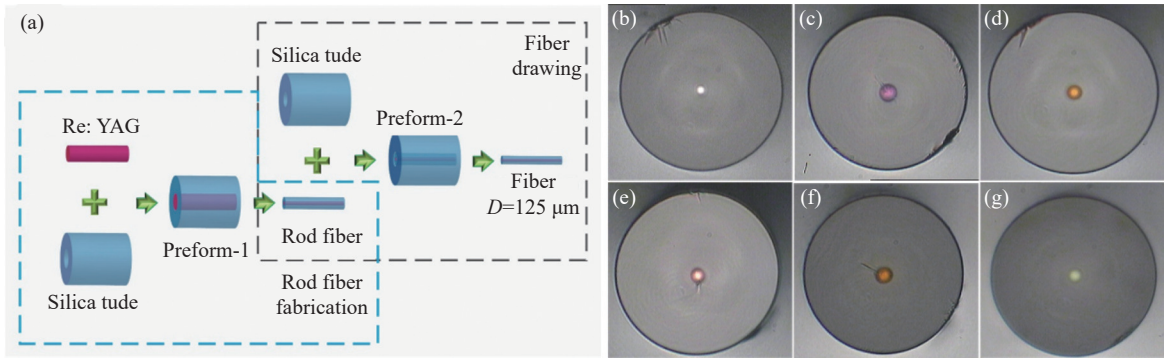


图 2 (a) 二次拉制示意图^[39]; (b)~(g) YAG、Nd:YAG、Yb:YAG、Er:YAG、Er/Yb:YAG、Tm:YAG-SiO₂ 光纤的显微端面图

Fig.2 (a) Schematic diagram of twice drawing^[39]; (b)-(g) Optical micrograph of the cross-section for YAG, Yb:YAG, Nd:YAG, Er:YAG, Er/Yb:YAG, Tm:YAG-SiO₂ fiber

不同波段的单频激光输出。

文中系统介绍了 Re:YAG-SiO₂ 光纤制备的研究进展, 结合笔者课题组的研究, 重点介绍了基于掺杂 Nd³⁺、Yb³⁺、Er³⁺、Er³⁺/Yb³⁺和 Tm³⁺的 YAG-SiO₂ 光纤的 DBR 结构单频激光器的研究进展, 总结了 1.0 μm, 1.5 μm 和 2.0 μm 波段的单频激光输出结果。实验结果表明, Re:YAG-SiO₂ 光纤是一种极具潜力的单频激光介质。

1 1.0 μm 波段 Re:YAG-SiO₂ 光纤单频光纤激光器

1.0 μm 波段的单频光纤激光器主要采用 Nd³⁺或 Yb³⁺掺杂的光纤作为增益光纤。其中 Nd³⁺掺杂光纤产生的 910~945 nm 波段单频激光经过倍频产生的纯净蓝光, 可用于生物医学、水下通讯、荧光光谱分析、光学数据存储等领域^[40-43]; Yb³⁺掺杂光纤产生波长为 960~985 nm 的单频激光可以通过非线性频率变换获取蓝光以及紫外相干光源^[44-45]、高亮度泵浦源^[46]等。Nd³⁺或 Yb³⁺光纤产生 1025~1080 nm 波段的单频光纤激光器可用于相干通信、引力波探测等领域^[1,3]。

1.1 基于 Nd:YAG-SiO₂ 光纤的单频光纤激光器

Nd³⁺离子能级主要有 ⁴F_{3/2}、⁴F_{5/2}、⁴I_{9/2}、⁴I_{11/2} 和 ⁴I_{13/2}, 其跃迁关系如图 3 所示, 粒子从 ⁴F_{3/2} 跃迁至 I_{9/2} 能级可以产生 910~945 nm 波段激光, 粒子从 ⁴F_{3/2} 跃迁至 ⁴I_{11/2} 能级可以产生 1064 nm 左右波段激光。

2018 年, 华南理工大学的 Y. Zhang 等采用掺杂浓度 5.0-at.% Nd:YAG 陶瓷, 制备了 Nd:YAG-SiO₂ 光纤,

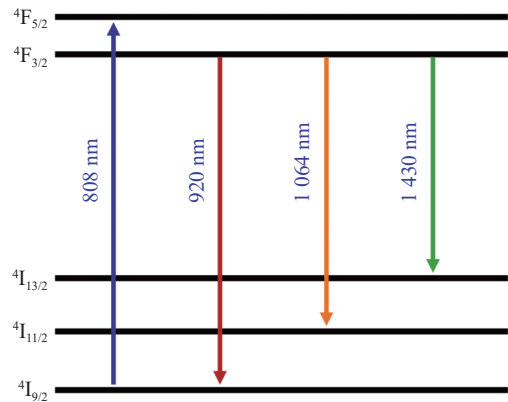


图 3 Nd³⁺离子能级结构图

Fig.3 Energy level structure of Nd³⁺

利用 1.8 cm 长的光纤实现了斜率效率为 6% 的 1064 nm 的单频激光输出^[47], 如图 4 所示。使用 YAG 陶瓷作为芯棒, 可以灵活控制材料组分和稀土粒子的掺杂浓度, 实现高增益光纤的制备。但陶瓷芯棒存在更多的微观的气泡等缺陷, 破坏了纤芯结构, 增加了光纤的传输损耗。相比较而言, 利用 YAG 晶体所制备的光纤具有更好的稳定性和更小的损耗。2021 年, 笔者课题组采用掺杂浓度 2.5-at.% Nd:YAG 晶体作为纤芯材料, 利用熔芯二次拉制的方法制备了 Nd:YAG-SiO₂ 光纤, 在 1064 nm 处增益系数为 1.49 dB/cm, 利用长度为 9 mm 的该光纤与 3 dB 带宽为 0.057 nm 的光栅组成 DBR 短腔, 也成功实现的 1064 nm 单频激光输出, 最大输出功率 2.58 mW, 光信噪比 (Optical Signal Noise Ratio, OSNR) 大于 50 dB^[48]。

除 1064 nm 波段外, Nd³⁺在 900 nm 波段也具有较大发射峰, 但增益远小于 1064 nm, 因此要实现单频

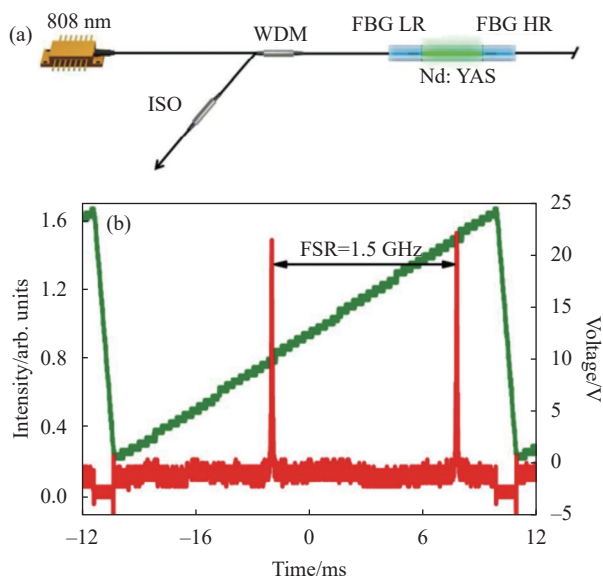


图 4 (a) 单频激光器装置图; (b) F-P 干涉仪测量的纵模特性^[47]

Fig.4 (a) Schematic diagram of single-frequency laser; (b) Longitudinal mode characteristics by F-P interferometer^[47]

输出, 需要使用更高增益的光纤。2019 年, 华南理工大学的 Y. Wang 等采用掺杂浓度 1.0-at.% Nd:YAG 晶体作为纤芯材料, 利用熔芯法制备了 Nd:YAG-SiO₂ 光纤, 在 915 nm 处增益系数为 0.4 dB/cm, 利用长度为 3.5 cm 的光纤作为增益介质, 采用 DBR 短腔结构, 实现了 915 nm 激光输出, 但因为光纤增益不足等原因, 没有实现单频激光输出^[49]。2021 年, 笔者课题组采用掺杂浓度 2.5-at.% Nd:YAG 晶体作为纤芯材料, 利用熔芯二次控制的方法制备了 Nd:YAG-SiO₂ 光纤, 在 915 nm 处增益系数为 1.16 dB/cm, 利用长度为 6 mm 的该光纤及反射带宽为 0.08 nm 的光栅, 首次实现了该类光纤的 915 nm 单频激光输出, 光信噪比大于 50 dB, 但由于光纤增益较小, 所产生的激光功率仅为 0.1 mW^[50], 如图 5 所示。

表 1 总结了近年来基于 Nd:YAG-SiO₂ 光纤单频激光器的研究进展。目前, 利用熔芯法制备 Nd:YAG-SiO₂ 光纤, 可以实现 0.9 μm 和 1.06 μm 单频激光的输

表 1 基于 Nd:YAG-SiO₂ 光纤的单频激光器研究进展

Tab.1 Research progress of single-frequency fiber laser based on Nd:YAG-SiO₂ fiber

Core precursor	Gain/dB·cm ⁻¹	Gain fiber length/cm	Power/mW	Slope efficiency	Refs
Nd:YAG ceramic(5.0-at.%)	1.57@1064 nm	1.8	-	6%	[47]
Nd:YAG crystal(2.5-at.%)	1.49@1064 nm	0.9	2.58	1.26%	[48]
Nd:YAG crystal(2.5-at.%)	1.16@915 nm	0.6	0.1	0.11%	[50]

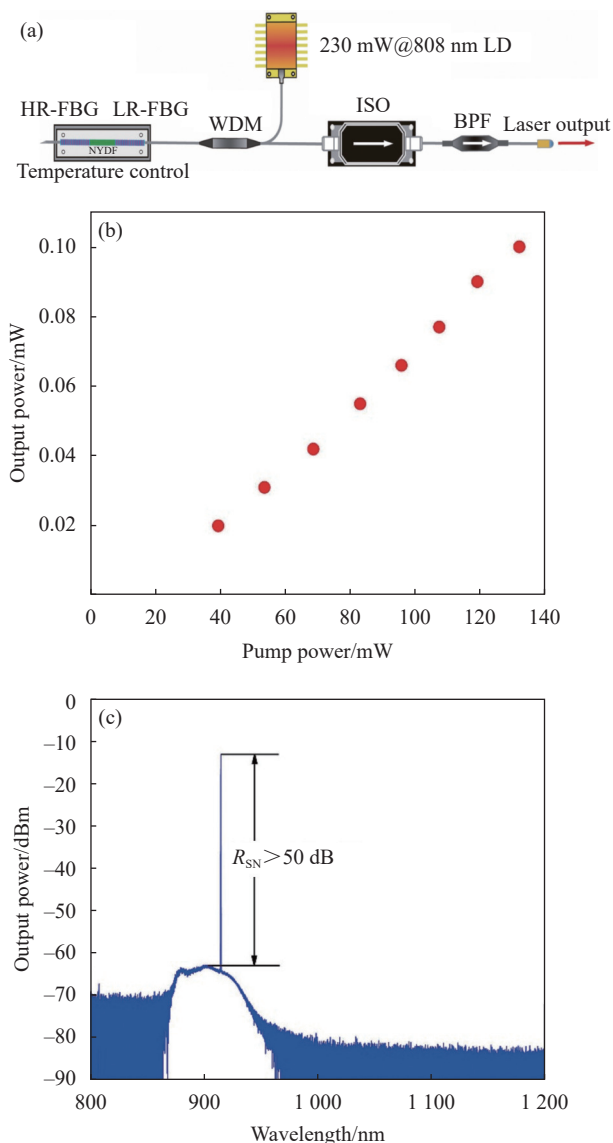


图 5 (a) 单频激光器装置; (b) 输出功率与泵浦功率的关系; (c) 输出光谱^[49]

Fig.5 (a) Schematic diagram of single-frequency laser; (b) Output power with respect to pump power; (c) Output spectrum^[49]

出, 但由于光纤增益小, 损耗大, 输出功率偏小。这主要是由于在光纤制备过程中, 芯棒与包层发生相互扩散, 引起稀土离子的掺杂浓度变低, 导致光纤增益变小。目前, 商用 Nd:YAG 晶体的掺杂浓度一般不超过

2.5-at.%, 而 Nd:YAG 陶瓷或粉末虽可以实现更高浓度的掺杂, 但其内部往往存在气泡与空隙, 影响光纤的稳定性, 增加光纤传输损耗。尚需要进一步改善 Nd:YAG-SiO₂ 光纤的制备工艺, 实现高增益、低损耗光纤的制备。

1.2 基于 Yb:YAG-SiO₂ 光纤的单频光纤激光器

Yb³⁺离子具有能级结构简单、荧光寿命长、量子效率高等优点, 有利于在 1.0 μm 波段实现高功率的激光输出^[51-53]。Yb³⁺离子主要包含两个多重能级, 分别为基态能级²F_{7/2}和激发态能级²F_{5/2}, 其中²F_{7/2}分裂为 a、b、c、d 四个子能级, ²F_{5/2}分裂为 e、f、g 三个子能级, 其跃迁关系如图 6 所示。Yb³⁺离子从²F_{5/2}跃迁至²F_{7/2}可以产生 970~1 140 nm 之间的宽谱发射, 且吸收波段与现有半导体激光器发射波长完美匹配。

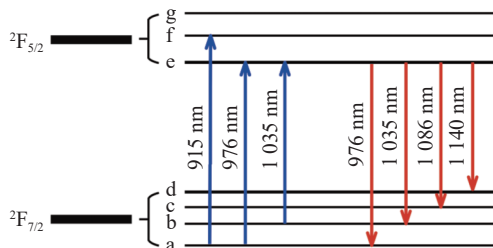


图 6 Yb³⁺离子能级结构图^[54]

Fig.6 Energy level structure of Yb³⁺^[54]

2018 年, 华南理工大学的 Y. Zhang 等利用浓度为 10-at.% Yb:YAG 陶瓷制备了 Yb:YAG-SiO₂ 光纤, 利用 1.7 cm 长的该光纤, 首次实现了该类光纤的 1 064 nm 单频激光输出, 但所制备的 Yb:YAG-SiO₂ 光纤 20 μm 的芯径与商用单模光纤存在较大尺寸失配, 导致腔内插入损耗较大, 斜率效率仅为 3.8%^[55]。2019 年, 笔者课题组用熔芯法制备了纤芯直径 6.3 μm 的 Yb:YAG-SiO₂ 光纤, 从而降低了腔内插入损耗, 所制备的光纤纤芯中 Yb₂O₃ 浓度达到 4.8 wt.%, 光纤增益为 1.7 dB/cm, 传输损耗为 0.005 dB/cm, 并采用长度为 1.4 cm 的该光纤和带宽 0.05 nm 的光栅, 实现了 110 mW 线宽 93 kHz 的 1 064 nm 单频激光输出^[56], 如图 7 所示。此后, 为了减少激光腔内熔接点处的热不稳定性所带来的线宽展宽, 笔者课题组以 1.4 cm 长光纤所实现的 1 064 nm 的单频作为种子, 利用 Yb³⁺掺杂的二氧化硅光纤 (Nufern-SM-YSF-HI-HP) 为增益介质组成的一级主振荡功率放大结构 (Master Oscillator

Power Amplifier, MOPA) 对种子光进行了放大, 实现了激光线宽 4 kHz, 102 mW 的 1 064 nm 单频激光输出, 并对激光器进行了系统集成, 设计了激光二极管 (Laser Diode, LD) 泵浦恒流驱动电路、半导体制冷器 (Thermo Electric Cooler, TEC) 温控电路, 以及 LabView 上位机控制系统^[57]。该样机线宽为 3 kHz, 光信噪比约为 63 dB, 相对强度噪声 (Relative Intensity Noise, RIN) 在超过 3.2 MHz 为 -110 dB/Hz, 48 h 内波长漂移量为 2 pm, 功率输出波动 (Root Mean Square, RMS) 小于 0.1%, 如图 8 所示。

为实现线偏振单频激光输出, 笔者课题组使用 1.2 cm 的 Yb:YAG-SiO₂ 光纤, 采用保偏光栅作为输出

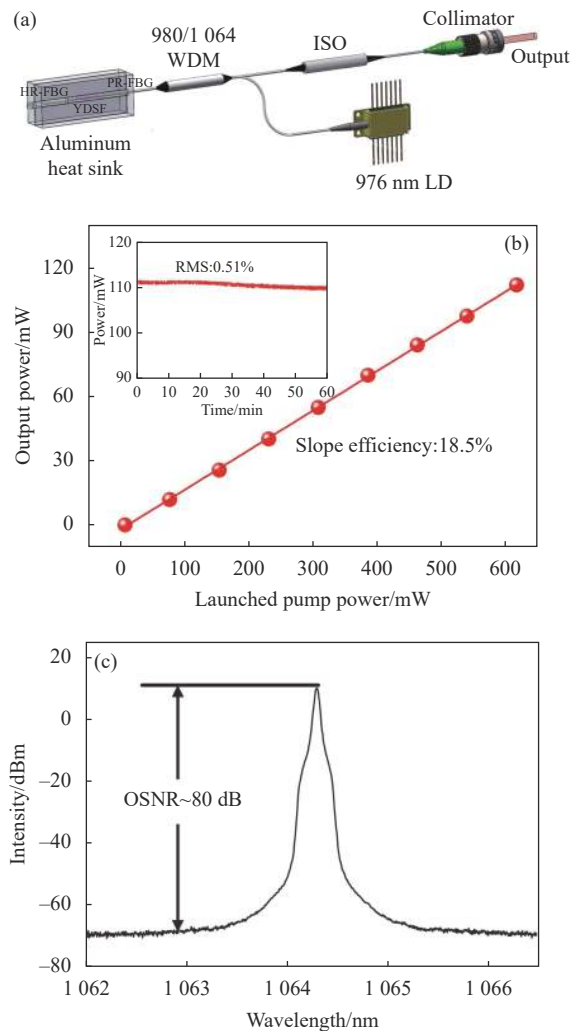


图 7 (a) 单频激光器示意图; (b) 输出功率与泵浦功率的关系; (c) 输出光谱^[56]

Fig.7 (a) Schematic diagram of single-frequency laser; (b) Output power with respect to pump power; (c) Output spectrum^[56]

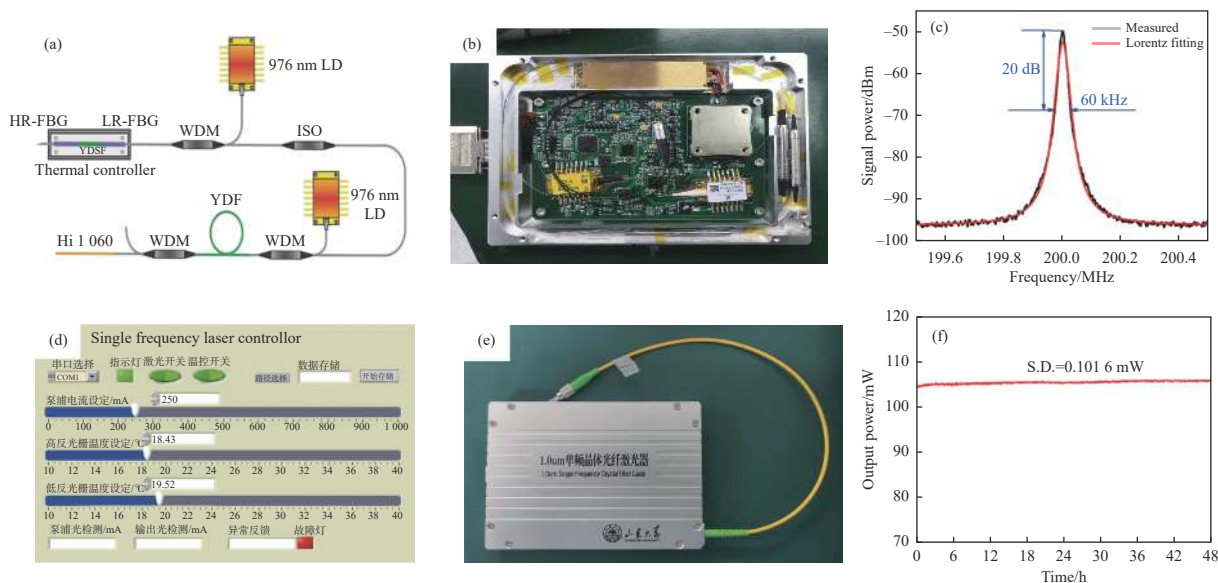


图 8 (a) 实验装置图; (b) 内部结构; (c) 洛伦兹拟合的自外差信号; (d) Labview 操作界面; (e) 样机; (f) 输出功率稳定性^[57]

Fig.8 (a) Schematic diagram of experiment; (b) Internal structure; (c) Self-heterodyne signal with Lorentzian fitted linewidth; (d) Operation interface of Labview; (e) Prototype; (f) Output power stability^[57]

耦合器, 实现了最大输出功率大于 60 mW 的 1066 nm 线偏振单频激光输出, 光信噪比约为 80 dB, 偏振消光比为 27.8 dB, 并在 Yb³⁺掺杂的双包层保偏光纤 (Nufern PLMA-YDF-10/125-M) 中进行了放大, 实现了 14.5 W 的线偏振单频激光输出^[58], 如图 9 所示。随后, 又利用增益开关技术, 实现了重复频率在 10~250 kHz 范围内可调的 1064 nm 单频脉冲激光输出, 脉冲宽度为 79 ns, 线宽小于 50 MHz^[54]。此外, 由于环形腔结构有利于实现更窄的激光线宽, 利用 Yb:YAG-SiO₂ 光纤作为增益介质, 采用 Yb³⁺掺杂二氧化硅光纤 (PM-YDF) 作为可饱和吸收体搭建了环形腔, 实现了 40 mW 的 1070 nm 单频激光输出, 激光线宽小于 4.3 kHz, 并通过控制 FBG 的温度, 实现了从 1069.99~1070.42 nm 的波长调谐^[59]。

此外, Yb³⁺在 0.9 μm 波段也具有较高增益, 可以用于产生该波段激光。2021 年, 笔者课题组采用熔芯法制备出在 976 nm 处增益系数为 12.6 dB/cm 的 Yb:YAG-SiO₂ 光纤, 利用长度为 8 mm 的该光纤制作了 DBR 短腔, 在 915 nm 激光的泵浦下, 首次实现了基于该类型光纤的 976 nm 单频激光输出, 激光最大输出功率为 17.8 mW, 对应斜率效率 12.1 %, 光信噪比大于 45 dB, 激光线宽小于 41 kHz^[60], 如图 10 所示。

采用熔芯法进行光纤拉制过程中, YAG 纤芯在高温下融化, 与软化的石英包层相互扩散, 使两种材

料在纤芯内混合相融, 形成新的多组分玻璃纤芯, 相互扩散程度会对光纤性能产生直接影响。为有效抑制纤芯与包层之间的相互扩散现象, 2020 年, 上海大学的 Y. Wen 等利用 CO₂ 激光器作为加热装置, 用熔芯法制备了 Yb:YAG-SiO₂ 光纤, 该方法拥有更小的加热区域, 有利于抑制纤芯与包层之间的相互扩散现象。他们利用长度为 7 mm 的该光纤制作了 DBR 短腔, 实现了最大输出功率 258 mW 的 1030 nm 单频激光输出, 对应斜率效率 34.9%, 光信噪比约为 79 dB^[61], 如图 11 所示。2021 年, 他们又通过环形腔结构, 利用 Yb:YAG-SiO₂ 光纤作为增益介质, 采用 Bi³⁺/Er³⁺/Yb³⁺ 共掺杂二氧化硅光纤作为可饱和吸收体, 实现了最大输出功率 103.5 mW 的 1030 nm 单频激光输出, 激光线宽小于 7.5 kHz^[62]。

由于 YAG 与 SiO₂ 折射率差较大, 因此所制备光纤的数值孔径 (Numerical Aperture, NA) 较大, 与商用光纤熔接存在较大的模式失配损耗, 为了降低 Re:YAG-SiO₂ 光纤的数值孔径, 2022 年, 北京工业大学的 F. Qi 等采用共沉淀法制备了 Yb:YAG 粉末, 通过控制压力, 将粉末压缩成柱状, 并用压实的 Yb:YAG 陶瓷棒作为纤芯材料, 利用熔芯法制备了 Yb:YAG-SiO₂ 光纤, 所制备的光纤数值孔径为 0.26, 低于同类型的光纤, 他们利用长度为 1.0 cm 的该光纤实现了 1062 nm 单频激光输出^[63]。利用粉末制备的

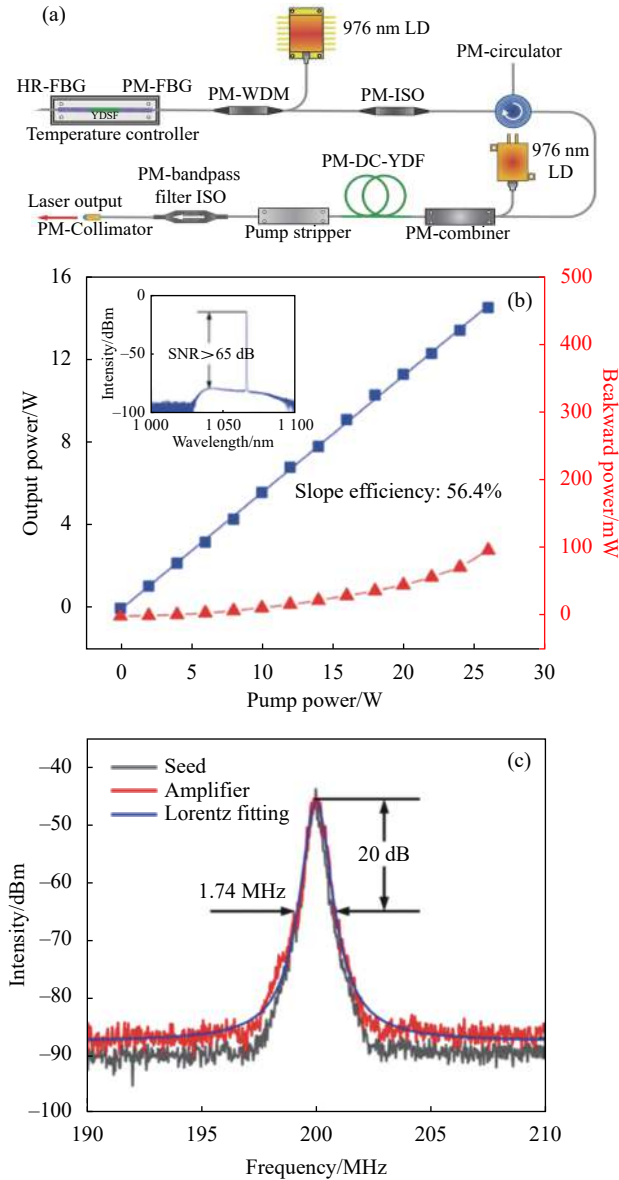


图 9 (a) 放大器示意图; (b) 输出功率和后向光功率与泵浦功率的关系; (c) 放大前后的激光线宽^[58]

Fig.9 (a) Schematic diagram of amplifier device; (b) Output power and backward optical power with respect to pump power; (c) Laser linewidth before and after amplification^[58]

光纤, 由于芯棒容易产生空隙和气泡, 容易使光纤在制备过程中出现畸变或断裂, 也易导致光纤传输损耗变大, 因此需要更加复杂的制备工艺。

Yb³⁺掺杂的 YAG-SiO₂ 光纤是该类光纤中研究最广泛的光纤。目前, 采用不同芯棒材料 (晶体、陶瓷、粉末), 不同加热方式 (石墨炉加热、CO₂ 激光加热) 制备光纤的工艺, 以及基于该光纤的单频激光器均得到广泛的研究。表 2 总结了近年来基于 Yb:YAG-SiO₂

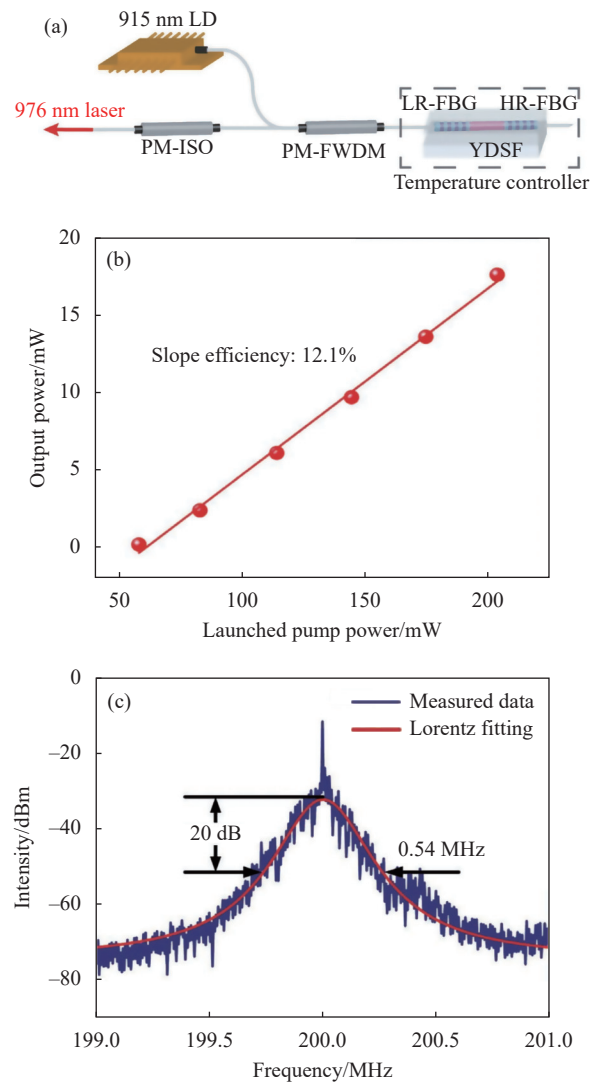


图 10 (a) 单频激光器示意图; (b) 输出功率与泵浦功率的关系; (c) 洛伦兹拟合的自外差信号^[60]

Fig.10 (a) Schematic diagram of single-frequency laser; (b) Output power with respect to pump power; (c) Self-heterodyne signal with Lorentzian fitted linewidth^[60]

光纤的单频激光研究情况, 可以看出, Yb:YAG-SiO₂ 光纤可以实现高浓度的稀土离子掺杂, 获得高于石英光纤的增益, 并成功用于单频光纤激光器, 实现了 0.9 μm 和 1.0 μm 的单频激光输出。但目前所制备的 Yb:YAG-SiO₂ 光纤除纤芯与包层相互扩散的问题外, 由于 YAG 与 SiO₂ 折射率差较大, 还会导致光纤数值孔径较大。在搭建单频激光器时, 与商用光纤熔接存在较大的模式失配损耗, 影响了激光输出性能。需要选择折射率等参数匹配的芯棒和套管材料, 进一步降低光纤的数值孔径。

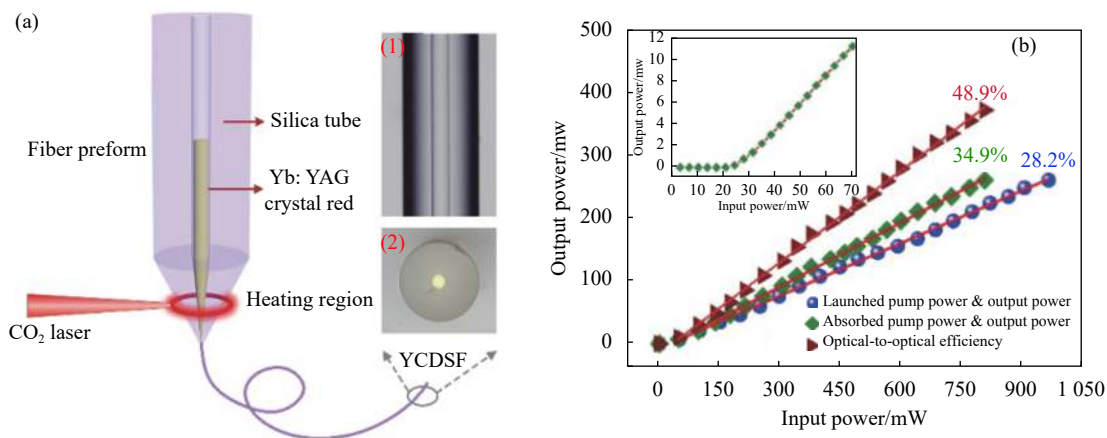


图 11 (a) 基于 CO₂ 激光加热的熔芯法; (b) 输出功率与泵浦功率的关系^[62]

Fig.11 (a) Molten core method based on CO₂ laser-heated; (b) Output power with respect to pump power^[62]

表 2 基于 Yb:YAG-SiO₂ 光纤的单频激光器研究进展

Tab.2 Research progress of single-frequency fiber laser based on Yb:YAG-SiO₂ fiber

Core precursor	Gain fiber			Wavelength/ nm	Output power/ mW	Slope efficiency	OSNR/ dB	RMS	Linewidth/ kHz	Refs
	Doping/ wt. %	Gain/ dB·cm ⁻¹	Transmission loss/ dB·cm ⁻¹							
Yb:YAG ceramic	2.6	3@ 1064 nm	0.03@ 1550 nm	0.47	1064	-	3.8%	-	-	[55]
Yb:YAG Crystal	4.8	1.7@ 1064 nm	0.005@ 1550 nm	0.42	1064	110	18.5%	80	0.51%@ 1 h	93 [56]
Yb:YAG crystal	-	2.7@ 1064 nm	-	-	1064	105.6 MOPA	17.1% Seed	63	0.096%@ 48 h	3 [57]
Yb:YAG crystal	4.2	1.7@ 1064 nm	0.005@ 1550 nm	0.42	1066	Linear polarization	16.6%	80	<2.2%@ 6 h	81 [58]
Yb:YAG crystal	4.8	1.7@ 1064 nm	0.005@ 1550 nm	0.42	1064	136 Pulse peak	-	>60	-	- [54]
Yb:YAG crystal	4.8	1.7@ 1064 nm	0.005@ 1550 nm	0.42	1070	45	10.2%	60	0.36%@ 0.5 h	<4.3 [59]
Yb:YAG crystal	5.25	12.6@ 976 nm	0.06@ 1550 nm	0.50	976	17.8	12.1%	>45	-	<41 [60]
Yb:YAG crystal	5.66	4.4@ 1030 nm	-	0.42	1030	258	34.9%	79	<0.85% @ 13 h	171 [61]
Yb:YAG crystal	6.57	6.0@ 1030 nm	0.006@ 1550 nm	-	1030	103.5	18.3%	>63	0.65%@ 10 h	<7.5 [62]
Yb:YAG powder	4.53	-	0.054@ 1550 nm	0.26	1062	~42	15.3%	60	0.68% @ 1 h	230 [63]

2 1.5 μm 波段 Re:YAG-SiO₂ 光纤单频光纤激光器

1.5 μm 波段的激光具有对人眼安全的优点,且位于通讯和大气传输的窗口,该波段的单频光纤激光器具有广泛的应用潜力,如自由空间通信、高分辨率光谱学、大气遥感等^[2,4],因此得到了越来越多的研究,

而实现 1.5 μm 的激光输出主要基于掺 Er³⁺或 Er³⁺/Yb³⁺共掺的增益光纤。Er³⁺离子能级结构图如图 12 所示,Er³⁺离子的主要吸收过程有三个,分别由基态能级⁴I_{15/2}跃迁至⁴I_{13/2},⁴I_{11/2}和⁴I_{9/2},分别对应于 800 nm, 980 nm, 1480 nm 三个泵浦波长。Er³⁺离子的荧光发射过程发生在⁴I_{13/2}与⁴I_{15/2}之间。对于石英基质来说,由于浓度猝灭效应,很难实现 Er³⁺离子高浓度掺杂,

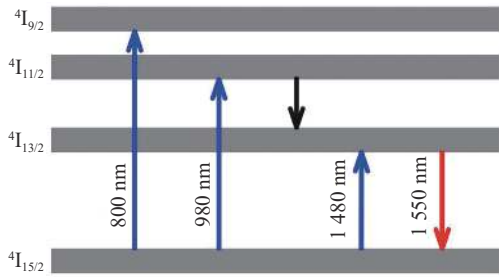


图 12 Er³⁺离子能级结构图^[54]

Fig.12 Energy level structure of Er³⁺^[54]

限制了其激光性能。而 YAG-SiO₂ 光纤由于 Al³⁺与 Y³⁺离子的存在,提高了 Er³⁺离子在 SiO₂ 中的溶解度,从而有望实现更高的增益。

2021 年,笔者课题组采用熔芯法制备了不同掺杂浓度的 Er:YAG-SiO₂ 光纤,研究了其性能,其中以掺杂浓度 5-at.% Er:YAG 为前驱体材料制备的光纤性能最佳,其纤芯 Er₂O₃ 的浓度为 2.96 wt.%,在 1550 nm 处的增益系数为 1.46 dB/cm,在 976 nm 泵浦吸收系数达到~1.56 dB/cm。基于长度为 1.8 cm 的该增益光纤制作了 DBR 短腔,实现了最大输出功率 24.2 mW 的 1550 nm 自调 Q 脉冲单频激光输出,相应斜率效率为 15.1%,在 3 h 内最大功率下的输出波动为 0.23%,单脉冲能量为 32.7 nJ,脉冲持续时间为 78 ns,重复频率为 739 kHz,光信噪比大于 75 dB^[39],如图 13 所示。

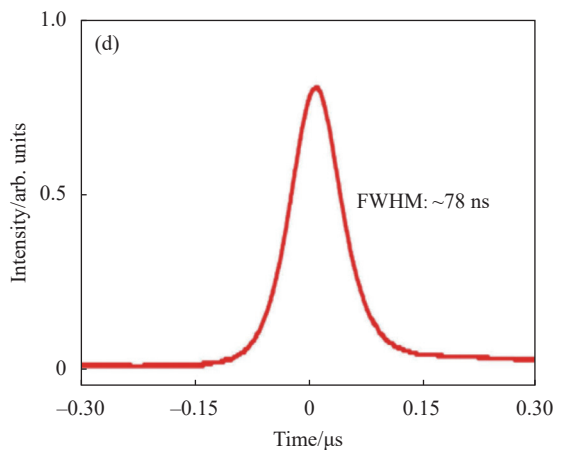
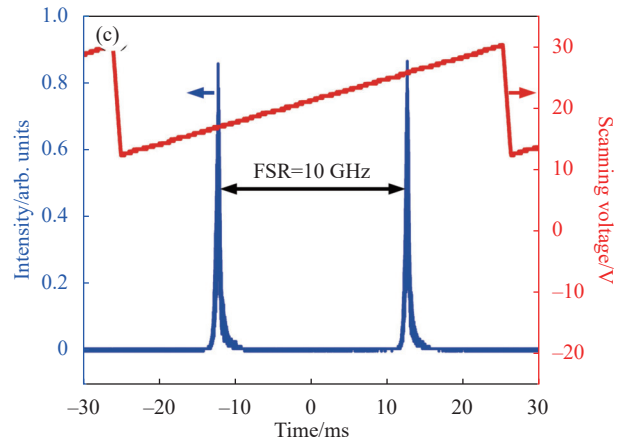
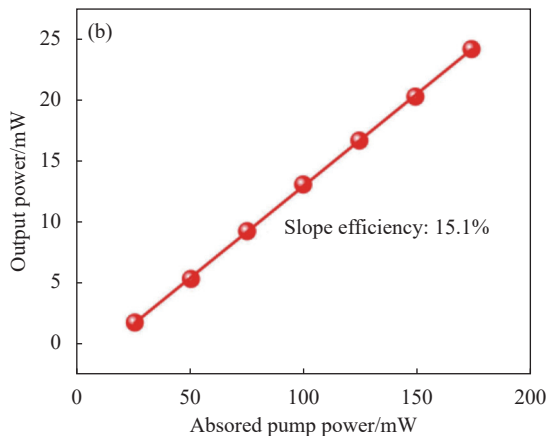
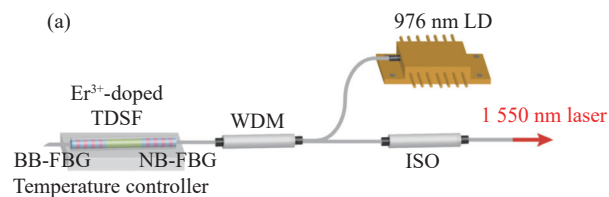


图 13 (a) 单频激光器示意图; (b) 输出功率与泵浦吸收功率的关系; (c) F-P 干涉仪测量的纵模特性; (d) 单脉冲波形^[39]

Fig.13 (a) Schematic diagram of single-frequency laser; (b) Output power with respect to pump absorption power; (c) Longitudinal mode characteristics by F-P interferometer; (d) Typical trace of single pulse^[39]

由于 Er³⁺在 976 nm 泵浦光处的吸收系数较小,而 Yb³⁺在该波段则具有较大的吸收系数,通过 Er³⁺和 Yb³⁺间的能量转移可提高对泵浦光的吸收效率。笔者课题组利用改进的管内共熔法,将 Er:YAG 与 Yb:YAG 晶体加工成半圆形,拼接在一起放入同一石英管组成光纤预制棒,成功制备了掺杂 Er³⁺/Yb³⁺共掺的 YAG-SiO₂ 光纤,其在 1550 nm 处增益为 2.33 dB/cm,高于此前 Er:YAG-SiO₂ 光纤的 1.46 dB/cm,并利用长度 1.9 cm 的该光纤制作了 DBR 短腔,成功实现了 1570 nm 的单频激光输出^[54],如图 14 所示。

表 3 总结了近年来基于 Re:YAG-SiO₂ 光纤的 1.5 μm 波段单频激光器的研究情况,可以得到,利用 Er:YAG-SiO₂ 光纤和 Er/Yb:YAG-SiO₂ 光纤可以实现 1.5 μm

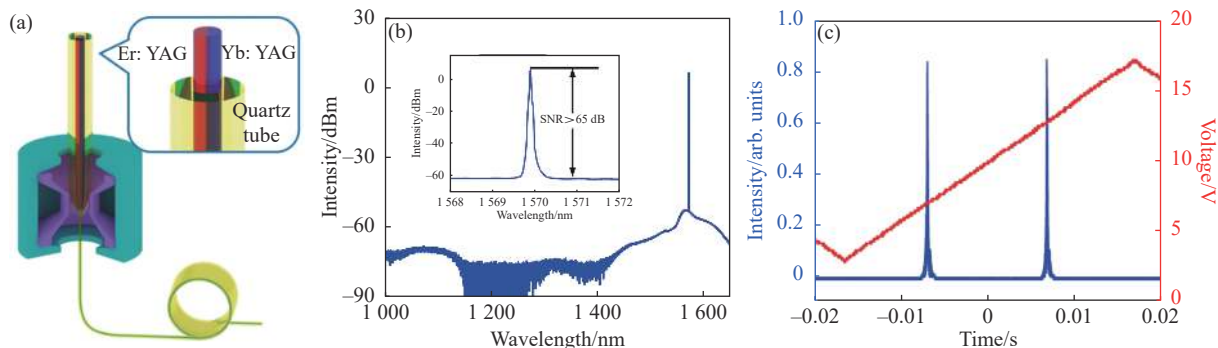


图 14 (a) 管内共熔法示意图; (b) 输出光谱; (c) F-P 干涉仪测量的纵模特性^[54]

Fig.14 (a) Schematic of the co-melt in tube method; (b) Output spectrum; (c) Longitudinal mode characteristics by F-P interferometer^[54]

波段的单频激光输出。其中通过将不同稀土掺杂的 YAG 晶体拼接, 利用管内共熔的方法, 可以制备出多种稀土离子共掺的特种光纤, 具有不同新颖特性, 例如: 利用 Er:YAG 与 Yb:YAG 制备 Er³⁺/Yb³⁺共掺的光纤可以增加对泵浦激光的吸收, 而 Ho³⁺/Cr³⁺/Tm³⁺共

掺的 YAG-SiO₂ 光纤, 则可以有效增加增益光谱的宽度, 有利于实现锁模激光输出。利用管内共熔法实现多种稀土离子共掺, 工艺相对简单, 能够根据需要, 对光纤性能, 如非线性效应、折射率、光谱及脉冲特性等进行灵活调控。

表 3 1.5 μm 波段 Re:YAG-SiO₂ 光纤的单频激光器研究进展

Tab.3 Research progress of single-frequency fiber laser based on Re:YAG-SiO₂ fiber in 1.5 μm band

Core precursor	Doping/wt.%	Gain/dB·cm ⁻¹	Power/mW	Slope efficiency	Refs
Er:YAG ceramic	Er ₂ O ₃ : 2.96	1.46 @ 1550 nm	24.2	15.1%	[39]
Er:YAG crystal + Yb:YAG crystal	Er ₂ O ₃ : 2.51 Yb ₂ O ₃ :2.38	2.33@ 1550 nm	-	-	[54]

3 2.0 μm 波段 Re:YAG-SiO₂ 光纤单频光纤激光器

2.0 μm 波段的激光具有对人眼安全、大气透过率高、且与多种其他化合物 (H₂O、CO₂、CH₄ 等) 的部分吸收谱线重合等优势, 受到了科研人员广泛关注。其中 2.0 μm 单频光纤激光器广泛应用于激光测风雷达、环境监测和激光医疗等领域^[64-66]。Tm³⁺离子掺杂的光纤是实现 2.0 μm 波段光纤激光输出的常用增益介质, 其中 Tm³⁺离子的能级结构如图 15 所示, Tm³⁺离子的吸收过程主要有三个, 分别由基态能级³H₆跃迁至³H₄, ³H₅和³F₄, 分别对应于 793 nm, 1200 nm, 1650 nm 三个泵浦波长。Tm³⁺离子的荧光发射过程发生在³F₄与³H₆能级之间, 可以产生 1700~2100 nm 范围内的荧光。

法制备了 Tm:YAG-SiO₂ 光纤, 并利用 13 cm 长的 Tm:YAG-SiO₂ 光纤作为激光增益介质, 采用 DBR 腔结构, 实现了该类光纤的 1950 nm 激光输出, 对应斜率效率为 12.8%^[23]。2021 年, 笔者课题组基于熔芯法制备了 Tm:YAG-SiO₂ 光纤, 利用长度为 2 cm 的 Tm:

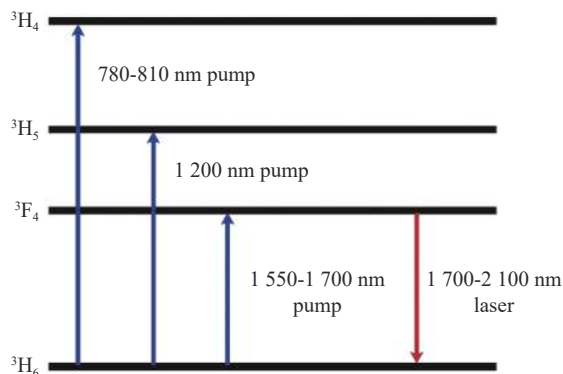


图 15 Tm³⁺离子能级结构图

Fig.15 Energy level structure of Tm³⁺

2018 年, 华南理工大学的 Y. Zhang 等利用熔芯

YAG-SiO₂ 光纤制作了 DBR 短腔, 在 1 580 nm 激光的泵浦下, 实现了该类光纤的 1 940 nm 单频激光输出, 但由于 Tm³⁺ 离子对 1 580 nm 泵浦光吸收效率有限, 且腔内插入损耗较大, 导致最大单频激光输出功率为 1.8 mW, 此外测得相对强度噪声在 210 kHz 频率处, 弛豫振荡峰值为 -75 dB/Hz, 过 3.5 MHz 后, RIN 稳定在 -125 dB/Hz。激光装置及参数如图 16 所示。

Tm:YAG-SiO₂ 光纤制备及在单频激光器的应用, 验证了 Re:YAG-SiO₂ 特种光纤可以应用于 2.0 μm 波段。由于 Tm³⁺ 在 1.6 μm 波段具有比 1.5 μm 更高的吸收, 如能采用 1.6 μm 激光泵浦, 有利于实现更高功率的单频激光输出。此外, 结合管内共熔法, 利用 Tm:YAG 与 Ho:YAG 制备 Tm³⁺/Ho³⁺ 共掺的 YAG-SiO₂ 光纤, 将有可能实现 2.1 μm 波段激光输出。

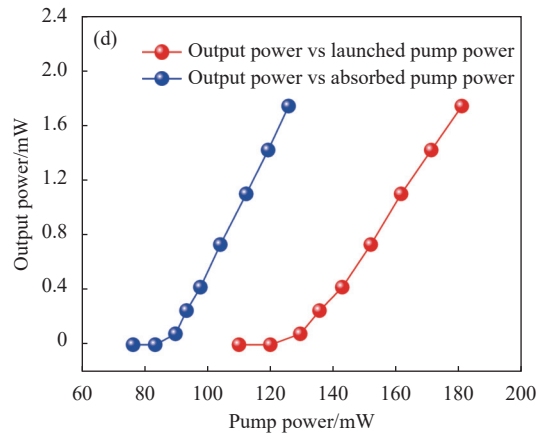
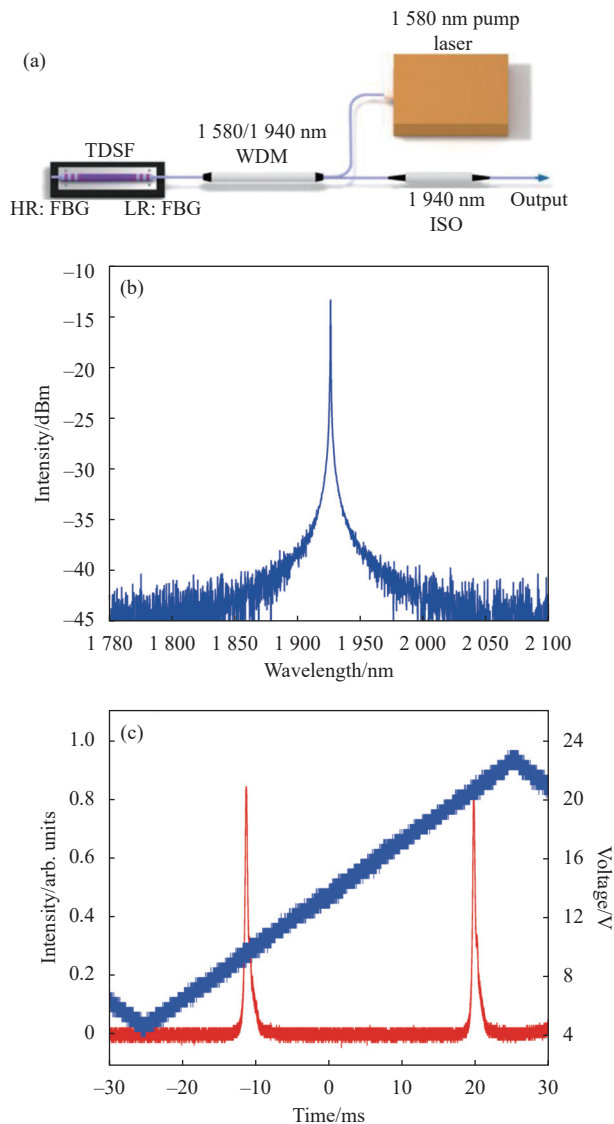


图 16 (a) 单频激光器示意图; (b) 输出光谱; (c) F-P 干涉仪测量的纵模特性; (d) 输出功率与泵浦功率、泵浦吸收功率的关系

Fig.16 (a) Schematic diagram of single-frequency laser; (b) Output spectrum; (c) Longitudinal mode characteristics by F-P interferometer; (d) Output power with respect to pump power and pump absorption power



4 结 论

文中针对基于 Re:YAG-SiO₂ 特种光纤单频光纤激光器的研究进展进行了全面综述, 包括 Re:YAG-SiO₂ 特种光纤的制备, 表征及测试, 不同稀土离子掺杂的 YAG-SiO₂ 光纤在 1.0 μm, 1.5 μm 和 2.0 μm 波段的单频激光及应用等。从目前的研究进展看, 采用熔芯法制备基于 Re:YAG-SiO₂ 的特种光纤, 工艺相对简单, 可以在光纤中灵活实现不同稀土离子掺杂。所制备的钇铝硅酸盐玻璃光纤, 增益虽仍小于磷酸盐光纤, 但高于常规的石英光纤, 且具有较好的机械和热力学性能, 有潜力成为一种通用的基质材料, 应用于单频光纤激光器。

目前, Re:YAG-SiO₂ 光纤的制备及在单频光纤激光器的应用中尚存在一些问题, 主要包括以下几个方面: 首先, YAG 与 SiO₂ 折射率差较大, 因此所制备光纤的数值孔径较大, 与商用光纤熔接存在较大的模式失配损耗, 需选择折射率等参数匹配的芯棒和套管, 或掺入低折射率材料等方法降低数值孔径; 其次, 光纤制备过程中, YAG 与 SiO₂ 的相互挤压、扩散尚难以准确控制, 影响光纤的稳定性, 不同扩散程度也会影响稀土离子掺杂浓度和光纤数值孔径; 第三, 与传统石英光纤相比, Re:YAG-SiO₂ 特种光纤传输损耗较

大,需要在拉制工艺、材料选择上进一步改进;第四,Re:YAG-SiO₂特种光纤的形成机制和光纤制备的理论模型,尚未建立,有待摸索;此外,目前国内外研究者所制备 Re:YAG-SiO₂特种光纤的传输损耗、长距离均匀性等参数与成熟的石英光纤相比仍存在较大差距,限制 Re:YAG-SiO₂特种光纤的应用范围;基于 Re:YAG-SiO₂特种光纤的单频激光技术仍主要集中在小功率的单频激光器上,对于其在大功率的单频激光放大技术的研究较少,需进一步改进光纤制备工艺,探索双包层 Re:YAG-SiO₂特种光纤的制备,拓展其在高功率光纤激光器的应用途径;最后,光纤性能参数对单频激光器噪声的影响也尚未进行系统报道,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Chiodo N, Djerroud K, Acef O, et al. Lasers for coherent optical satellite links with large dynamics [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(30): 7342-7351.
- [2] Chen T, Kong W, Liu H, et al. Frequency-stepped pulse train generation in an amplified frequency-shifted loop for oxygen A-band spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34753-34762.
- [3] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(24): 241103.
- [4] Abari C, Tegtmeier Pedersen A, Dellwik E, et al. Performance evaluation of an all-fiber image-reject homodyne coherent Doppler wind lidar [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(10): 4145-4153.
- [5] Cao C Y. Study on key techniques of high performance fiber-optics hydrophone array based on ultra-remotely optical transmission and cascaded amplifiers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [6] Cheng Y, Kringlebotn J T, Loh W H, et al. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(8): 875-877.
- [7] Park N, Dawson J, Vahala K, et al. All fiber, low threshold, widely tunable single-frequency, erbium-doped fiber ring laser with a tandem fiber Fabry-Perot filter [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59: 2369-2371.
- [8] Chen J W, Zhao Y, Zhu Y N, et al. Narrow line-width ytterbium-doped fiber ring laser based on saturated absorber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(5): 439-441.
- [9] Ma X X, Lu B L, Wang K L, et al. Tunable broadband single-frequency narrow-linewidth fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0114001. (in Chinese)
- [10] Wang X, Yan F P, Han W G. Single longitudinal mode narrow linewidth thulium-doped fiber laser with special subring cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0901001. (in Chinese)
- [11] Kringlebotn J T, Archambault J L, Reekie L, et al. Er³⁺: Yb³⁺-codoped fiber distributed-feedback laser [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(24): 2101-2103.
- [12] Dong L, Loh W H, Caplen J E, et al. Efficient single-frequency fiber lasers with novel photosensitive Er/Yb optical fibers [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(10): 694-696.
- [13] Fan W, Chen B, Li X C, et al. Stress-induced single polarization DFB fiber lasers [J]. *Optics Communications*, 2002, 204(1): 157-161.
- [14] Ball G A, Morey W W. Standing-wave monomode erbium fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, 3(7): 613-615.
- [15] Syzskind J L, Mizrahi V, Digiovanni D J, et al. Short single frequency erbium-doped fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(15): 1385-1387.
- [16] Kringlebotn J T, Morkel P R, Reekie L, et al. Efficient diode-pumped single-frequency erbium: ytterbium fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(10): 1162-1164.
- [17] Cranch G A, Englund M A, Kirkendall C K, et al. Intensity noise characteristics of erbium-doped distributed-feedback fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 39(12): 1579-1587.
- [18] Loranger S, Korpov V, Shinn G W, et al. Single-frequency low-threshold linearly polarized DFB Raman fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3864-3867.
- [19] Spiegelberg C, Geng J, Hu Y, et al. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 57-62.
- [20] Fang Q, Xu Y, Fu S J, et al. Single-frequency distributed Bragg reflector Nd doped silica fiber laser at 930 nm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1829-1832.
- [21] Yang C S, Cen X, Xu S H, et al. Research progress of single-frequency fiber laser(Invited) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0114002. (in Chinese)
- [22] Delevaque T, Georges T, Monerie M, et al. Modeling of pair-induced quenching in erbium-doped silicate fibers [J]. *IEEE*

- Photonics Technology Letters*, 1993, 5(1): 73-75.
- [23] Zhang Y M, Qian G Q, Xiao X S, et al. The preparation of Yttrium Aluminosilicate (YAS) glass fiber with heavy doping of Tm^{3+} from Polycrystalline YAG ceramics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2018, 101(10): 4627-4633.
- [24] Xie Y Y, Liu Z J, Cong Z H, et al. All-fiber-integrated Yb: YAG-derived silica fiber laser generating 6 W output power [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3791-3798.
- [25] Wan Y, Wen J X, Dong Y H, et al. An exceeding 50% slope efficiency DBR fiber laser based on Yb-doped crystal-derived silica fiber with high gain per unit length [J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23771-23783.
- [26] Qian G Q, Wang W L, Tang G W, et al. Tm: YAG ceramic derived multimaterial fiber with high gain per unit length for all-fiber mode-locked fiber laser applications [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1047-1050.
- [27] Tang G W, Qian G Q, Lin W, et al. Broadband 2 μm amplified spontaneous emission of Ho/Cr/Tm: YAG crystal derived all-glass fibers for mode-locked fiber laser applications [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(13): 3290-3293.
- [28] Huang Y C, Lu Y K, Chen J C, et al. Broadband emission from Cr-doped fibers fabricated by drawing tower [J]. *Optics Express*, 2006, 14(19): 8492-8497.
- [29] 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): 53110.
- [30] Dragic P, Law P, Ballato J, et al. Brillouin spectroscopy of YAG-derived optical fibers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10055-10067.
- [31] Ballato J, Dragic P D. Characterisation of Raman gain spectra in Yb: YAG-derived optical fibres [J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(14): 895-896.
- [32] Dragic P D, Ballato J, Hawkins T, et al. Feasibility study of Yb: YAG-derived silicate fibers with large Yb content as gain media [J]. *Optical Materials*, 2012, 34(8): 1294-1298.
- [33] Geng J H, Wang Q, Luo T, et al. Single-frequency narrow-linewidth Tm-doped fiber laser using silicate glass fiber [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(22): 3493-3495.
- [34] Zhang Y M, Qian G Q, Xiao X S, et al. A yttrium aluminosilicate glass fiber with graded refractive index fabricated by melt-in-tube method [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, 101(4): 1616-1622.
- [35] Zhang Y M, Sun Y, Wen J X, et al. Investigation on the formation and regulation of yttrium aluminosilicate fiber driven by spontaneous element migration [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(15): 19182-19188.
- [36] Zheng S P, Li J, Yu C L, et al. Preparation and characterizations of Nd: YAG ceramic derived silica fibers drawn by post-feeding molten core approach [J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24248.
- [37] Zheng S P, Li J, Yu C L, et al. Preparation and characterizations of Yb: YAG-derived silica fibers drawn by on-line feeding molten core approach [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(7): 5837-5841.
- [38] Li C Z, Jia Z X, Cong Z H, et al. Gain characteristics of ytterbium-doped $SiO_2-Al_2O_3-Y_2O_3$ fibers [J]. *Laser Physics*, 2019, 29(5): 55804.
- [39] Xie Yongyao, Cong Zhenhua, Zhao Zhigang, et al. Preparation of Er:YAG crystal-derived all-glass silica fibers for a 1550-nm single-frequency laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(14): 4769-4775.
- [40] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [41] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives(Invited) [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [42] Leconte B, Gilles H, Robin T, et al. 7.5 W blue light generation at 452 nm by internal frequency doubling of a continuous-wave Nd-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10000-10006.
- [43] Bode M, Freitag I, Tünnermann A, et al. Frequency-tunable 500-mW continuous-wave all-solid-state single-frequency source in the blue spectral region [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(16): 1220-1222.
- [44] Zhu X S, Shi W, Zong J, et al. 976 nm single-frequency distributed Bragg reflector fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4167-4169.
- [45] Bouchier A, Lucasleclin G, Georges P, et al. Frequency doubling of an efficient continuous wave single-mode Yb-doped fiber laser at 978 nm in a periodically-poled MgO: LiNbO₃ waveguide [J]. *Optics Express*, 2005, 13(18): 6974-6979.
- [46] Shi W, Fang Q, Zhu X S, et al. Fiber lasers and their applications(Invited) [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [47] Zhang Y M, Qiu J Q. Yttrium aluminosilicate (YAS) fiber with heavily doped of Nd for single frequency laser[C]//Asia Communications and Photonics Conference(ACP), 2018.
- [48] Shao X B. Preparation, characterization and single frequency laser technology of Nd: YAG crystal derived fiber[D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)

- [49] Wang Y F, Zhang Y M, Cao J K, et al. 915 nm all-fiber laser based on novel Nd-doped high alumina and yttria glass @ silica glass hybrid fiber for the pure blue fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(9): 2153-2156.
- [50] Shao X B, Chen X H, Cong Z H, et al. Single-frequency Nd: YAG crystal-derived fiber laser at 915 nm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(22): 2206001. (in Chinese)
- [51] Ma X Y, Study on luminescence and laser characteristics of ytterbium doped fiber[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [52] Zhou G D. Preparation and study of highly Yb³⁺-doped double-clad phosphate fiber[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [53] Huang J. Investigation of single-frequency distributed Bragg reflector fiber laser with highly Yb-doped silica fiber[D]. Xi'an: Northwest University, 2017. (in Chinese)
- [54] Xie Y Y. Studies of single-frequency laser based on YAG crystal-derived silica[D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)
- [55] Zhang Y M, Wang W W, Li J, et al. Multi-component yttrium aluminosilicate (YAS) fiber prepared by melt-in-tube method for stable single-frequency laser [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, 102: 2551-2557.
- [56] Liu Z J, Xie Y Y, Cong Z H, et al. 110 mW single-frequency Yb: YAG crystal-derived silica fiber laser at 1064 nm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4307-4310.
- [57] Jiang M Y. Design and research of single frequency laser based on Yb: YAG crystal derived fiber[D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)
- [58] Xie Y Y, Cong Z H, Zhao Z G, et al. Linearly polarized single-frequency fiber laser based on the Yb: YAG-crystal derived silica fiber [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(32): 9931-9936.
- [59] Gao X B, Cong Z H, Zhao Z J, 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.
- [60] Xie Y Y, Cong Z H, Zhao Z G, et al. A 976 nm single-frequency laser based on the Yb: YAG crystal-derived fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1201010. (in Chinese)
- [61] Wan Y, Wen J X, Jiang C, et al. Over 255 mW single-frequency fiber laser with high slope efficiency and power stability based on an ultrashort Yb-doped crystal-derived silica fiber [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 649-656.
- [62] 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.
- [63] Qi F, Zheng B L, Yang J, et al. Fabrication of yttrium aluminosilicate fibers with high Yb³⁺ doping from Yb: YAG ceramic nanopowders and its application in single-frequency fiber lasers [J]. *Optical Materials Express*, 2022, 12(3): 876-884.
- [64] Ishii S, Mizutani K, Fukuoka H, et al. Coherent 2 μm differential absorption and wind lidar with conductively cooled laser and two-axis scanning device [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(10): 1809-1817.
- [65] Engin D, Chuang T, Storm M. Compact, highly efficient, athermal, 25 W, 2051 nm Tm-fiber based MOPA for CO₂ trace-gas laser space transmitter[C]//Proceedings of SPIE LASE, 2017, 10083: 1008325.
- [66] Zhang Z, Boyland A J, Sahu J K, et al. High-power single-frequency thulium-doped fiber DBR laser at 1943 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(7): 417-419.