

# 光学学报

## 915 nm 单频 Nd:YAG 晶体衍生光纤激光器

邵贤彬<sup>1,2</sup>, 陈晓寒<sup>1,2</sup>, 丛振华<sup>1,2</sup>, 赵智刚<sup>1,2</sup>, 张行愚<sup>1,2</sup>, 赵显<sup>3</sup>, 谢永耀<sup>1,2</sup>,  
赵微<sup>1,2</sup>, 刘俊都<sup>2,3</sup>, 刘兆军<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> 山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237;

<sup>2</sup> 山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 青岛 266237;

<sup>3</sup> 山东大学光学高等研究中心, 山东 青岛 266237

**摘要** 报道了一种基于 Nd:YAG 晶体衍生光纤(NYDF)的 915 nm 单频光纤激光器。使用掺杂原子数分数为 2.5% 的 Nd:YAG 晶体作为纤芯材料,高纯度石英管作为包层材料,利用熔芯法制备 Nd:YAG 晶体衍生光纤,其传输损耗为 8 dB/m,在 915 nm 处其增益系数为 1.16 dB/cm。基于 Nd:YAG 晶体衍生光纤,实现了一个稳定的 915 nm 单频光纤激光器,信噪比大于 50 dB。实验结果表明 Nd:YAG 晶体衍生光纤有潜力应用于 890~920 nm 单频激光器。

**关键词** 光纤光学; YAG 晶体衍生光纤; 单频光纤激光; 熔芯法; 915 nm 激光

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2206001

### Single-Frequency Nd:YAG Crystal-Derived Fiber Laser at 915 nm

Shao Xianbin<sup>1,2</sup>, Chen Xiaohan<sup>1,2</sup>, Cong Zhenhua<sup>1,2</sup>, Zhao Zhigang<sup>1,2</sup>,  
Zhang Xingyu<sup>1,2</sup>, Zhao Xian<sup>3</sup>, Xie Yongyao<sup>1,2</sup>, Zhao Wei<sup>1,2</sup>, Liu Jundu<sup>2,3</sup>, Liu Zhaojun<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;

<sup>2</sup> Shandong Provincial Key Laboratory for Laser Technologies and Applications,  
Qingdao, Shandong 266237, China;

<sup>3</sup> Center for Optics Research and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China

**Abstract** We reported a single-frequency fiber laser at 915 nm based on the neodymium-doped yttrium aluminum garnet (Nd:YAG) crystal-derived fiber (NYDF). Using Nd:YAG crystal with doped atomic number fraction of 2.5% as the core material and a high-purity silica tube as the cladding material, we fabricated the NYDF by the molten-core method. Its transmission loss was 8 dB/m and its gain coefficient at 915 nm was 1.16 dB/cm. A stable single-frequency fiber laser at 915 nm based on the NYDF was developed, with a signal-to-noise ratio of above 50 dB. The experimental results show that the NYDF is a promising candidate material for single-frequency lasers at 890 nm–920 nm waveband.

**Key words** fiber optics; yttrium aluminum garnet (YAG) crystal-derived fiber; single-frequency fiber laser; molten-core method; 915 nm laser

**OCIS codes** 060.3510; 140.3480; 140.3570; 060.2280

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-05-20; 录用日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(62075117, 62075116)、教育部联合基金(6141A02022430)、山东省重点研发计划(2019JMRH0111)、山东省自然科学基金(ZR2019MF039)、山东大学卓越团队基金、山东大学杰出中青年基金、山东大学齐鲁青年启动基金

通信作者: \*zhaojunliu@sdu.edu.cn

## 1 引言

900 nm 波段激光在生物光谱分析、激光检测和生物医学等领域具有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。例如:多种蛋白质在 910~920 nm 范围之内具有双光子吸收带<sup>[4-5]</sup>,因此该波段激光可用于医学蛋白成像。900 nm 波段激光通过倍频产生的蓝光激光输出在水下成像及通信、激光显示和高密度光学数据储存等领域具有重要的应用<sup>[6-9]</sup>。900 nm 波段的单频激光,因具有低噪声、高相干性等特点,可以有效减小探测噪声,提高测量精度,引起了人们的广泛关注。为了实现 900 nm 波段单频激光输出, Nd<sup>3+</sup> 掺杂的激光晶体或光纤是一类比较成熟的、常用于获得该波段激光输出的增益介质, Nd<sup>3+</sup> 能级主要有<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>、<sup>4</sup>F<sub>5/2</sub>、<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>、<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 和<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 等,其中,基于<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 能级之间的辐射跃迁可以实现 900 nm 波段的激光输出<sup>[10-11]</sup>。2016 年,天津大学史伟课题组等<sup>[12]</sup>通过 25 mm 长的商用掺铈石英光纤实现了 1.9 mW、930 nm 的单频激光输出。然而,为进一步拓展 900 nm 波段单频激光在生物医疗成像、纯蓝光(450 nm)激光等领域的应用,需产生更短波长(<920 nm)的激光。2019 年,华南理工大学王亚飞等<sup>[13]</sup>采用中心波长为 915 nm 的光栅,使用一段 25 mm 长的商用掺铈石英光纤实现了 915 nm 保偏激光输出,但由于商用掺铈石英光纤在 915 nm 波段存在增益较低、光栅栅区长度较长和光栅带宽较大等问题,他们没有实现该波长的单频输出。于是人们将目光投向了增益更高的磷酸盐光纤,与石英光纤相比,磷酸盐光纤的高溶解度,使其具有更高的稀土离子掺杂浓度,故即使在较短光纤长度下也能提供高增益,这有利于获得单频激光输出。2020 年,美国亚利桑那大学 Fu 等<sup>[14]</sup>利用自己拉制的 25 mm 长掺铈磷酸盐光纤实现了 13.5 mW 的 915 nm 单频激光输出。但是,磷酸盐光纤因材质本征特性等,与石英光纤进行熔接时难度较大,这就要求激光腔的温度控制更为精密。

近年来,出现了一种新型的基于熔芯法制备的晶体衍生特种光纤,该光纤因其具有高稀土离子掺杂浓度、高损伤阈值、易制备等特性引起了人们关注。其将 YAG 晶体作为纤芯材料,与石英玻璃管组成预制棒,采用石墨炉光纤拉丝塔拉制<sup>[15-19]</sup>,所制备的光纤具有非线性效应低、热导率高以及机械性

能强等优点<sup>[20-21]</sup>,并且纤芯中高掺杂浓度的 Y、Al 元素有效抑制了稀土离子的浓度猝灭<sup>[22]</sup>,使其比传统石英光纤具有更高的稀土掺杂浓度和激光增益,有利于实现单频激光输出<sup>[23]</sup>。相比于磷酸盐光纤、锗酸盐光纤等软玻璃光纤,石英材料的外包层使其与商用石英光纤器件也具有更好的兼容性<sup>[24]</sup>。2019 年 Wang 等<sup>[25]</sup>通过熔芯法,采用 Nd 原子数分数为 1.0% 的 Nd:YAG 作为纤芯材料,制备了 Nd:YAG 晶体衍生光纤(NYDF),在 915 nm 处的增益系数为 0.4 dB/cm,其利用短腔结构实现了 915 nm 激光输出,但由于拉制光纤增益较小、损耗大、数值孔径与商业光纤相差较大等原因,最终没能实现单频输出。

本文使用掺杂浓度(原子数分数,下同)为 2.5% 的 Nd:YAG 晶体作为纤芯材料,采用高纯度石英管作为包层材料,利用光纤拉丝塔,采用二次拉制的方法,获得了更高增益系数的 YAG 晶体衍生光纤,纤芯处 SiO<sub>2</sub>、Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的质量分数分别约为 70.0%、1.0%。传输损耗为 8 dB/m,在 915 nm 处增益系数为 1.16 dB/cm。使用 6 mm 长的 Nd:YAG 晶体衍生光纤作为增益光纤,采用分布式布拉格反射(DBR)结构,在常温下成功获得了 915 nm 单频激光输出,输出功率为 0.1 mW,激光信噪比大于 50 dB。

## 2 Nd:YAG 晶体衍生光纤的制备及表征

光纤预制棒由商用 Nd:YAG 晶体和高纯度石英玻璃管组成。石英玻璃管内外径分别为 2.8 mm 和 10 mm,一端被密封成锥形。所用 Nd:YAG 晶体的掺杂浓度为 2.5%,直径为 2.6 mm。清洗后将 Nd:YAG 晶体插入石英玻璃管中,组成预制棒。采用二次拉制的方法,使用石墨加热炉光纤拉丝塔进行光纤制备,第一次拉制温度控制在约 2000 °C,与 YAG 晶体的熔点(约 1950 °C)相匹配,送棒速度约为 4.5 mm/min,拉制速度约为 0.156 m/min,一次拉制后获得了直径为 1.8 mm 的棒状光纤。然后将一次拉制的棒状光纤插入一个石英玻璃管(外径 10 mm,内径 2 mm)内,构成第二次拉制预制棒,在二次拉制过程中,拉丝塔温度控制在 1970 °C。送棒速度约为 0.85 mm/min,拉制速度约为 5.35 m/min,张力为 10 g。通过二次制备,最终获得 Nd:YAG 晶体衍生光纤。

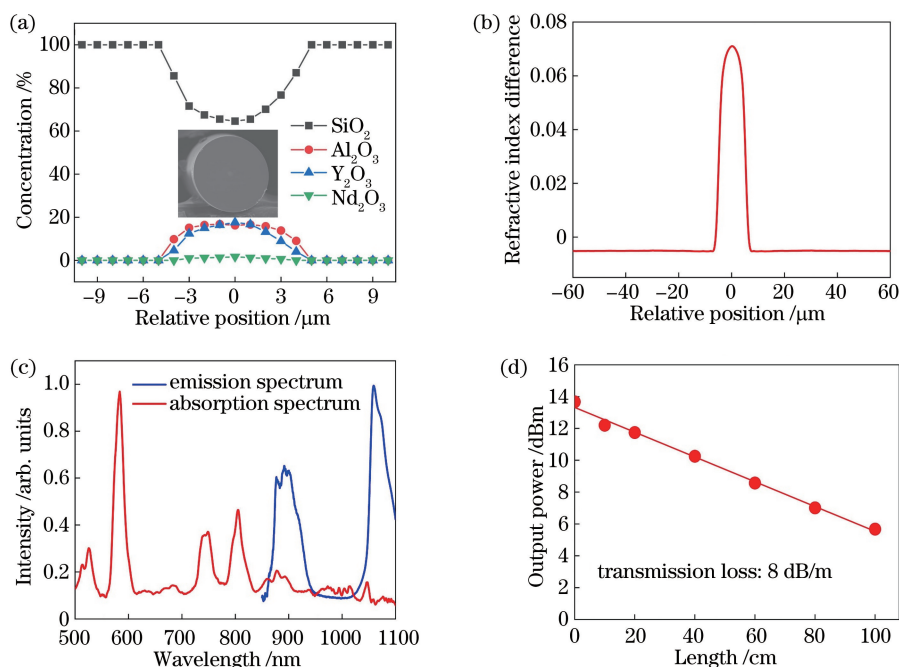


图 1 Nd:YAG 晶体衍生光纤的性能表征。(a) 组成成分浓度分布图, 插图为光纤横截面扫描电子显微镜(SEM)扫描图;

(b) 光纤折射率分布图; (c) 光纤的吸收光谱和发射光谱; (d) 光纤在 1550 nm 处的传输损耗

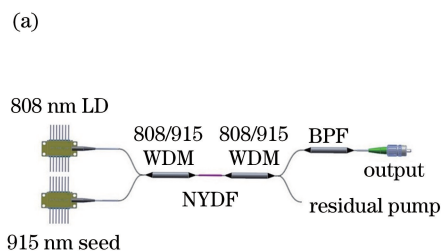
Fig. 1 Characterization of Nd:YAG crystal-derived fiber. (a) SEM scanning image(inset) and composition concentration distribution diagram; (b) optical fiber refractive index distribution diagram; (c) optical fiber absorption spectrum and emission spectrum; (d) tested optical fiber transmission at 1550 nm by the cut-back method loss

利用高分辨率扫描电子显微镜(JSM-7610F)对光纤横截面进行了表征,如图 1(a)插图所示,纤芯为圆形,纤芯与包层界线清晰,包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ,芯径为 10  $\mu\text{m}$ ,纤芯与包层的同心度较好。通过能谱仪(Thermo Scientific UltraDry EDS)对纤芯与包层组分进行分析,纤芯处  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Nd}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$  的质量分数分别约为 70.0%、1.0%、15.8%、13.2%。这是由于纤芯与包层之间发生相互扩散,导致一部分  $\text{SiO}_2$  进入纤芯,稀释了  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  的含量,使得纤芯处稀土离子的掺杂浓度下降。通过折射率测量仪(SHR-1802)对光纤横截面折射率分布进行了测量,结果如图 1(b)所示,其纤芯折射率与包层折射率分别为 1.521、1.450,纤芯包层折射率差为 0.071,折射率分布与元素分布基本一致,边缘呈渐变型分布,通过计算得到数值孔径约为 0.46。这是由于 Nd:YAG 晶体折射率为 1.82,光纤在高温控制过程中,Nd:YAG 纤芯与石英包层相互扩散,使得纤芯处的折射率降低,呈渐变型分布,而纤芯中心处的折射率最大。Nd:YAG 晶体与石英包层的过大折射率差导致最终制备的光纤数值孔径较大。因此,当晶体衍生光纤与商用石英光纤熔接时,熔接损耗因数值孔径不匹配而增大,进而对激光器的输出性

能产生不利影响。利用光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6370D)对吸收与发射谱线进行测量,结果如图 1(c)所示,光纤在 890~920 nm 和 1055~1100 nm 波段处具有较强的发射峰,分别对应  $\text{Nd}^{3+}$  中  $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$  能级和  $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$  能级的跃迁,因此 Nd:YAG 晶体衍生光纤具有作为 890~920 nm 激光器增益介质的潜力。采用回切法进行传输损耗的测量,选用 1550 nm 激光作为测试光源,实验结果如图 1(d)所示,在 1550 nm 处的传输损耗为 8 dB/m。1550 nm 处的传输损耗是由于材料中存在杂质,纤芯与包层之间有微小气泡,以及二次制备过程中拉丝速度较慢,有细小纳米晶粒析出等原因所致,可通过调整预制棒内气压、加快拉制速度来减小传输损耗<sup>[25]</sup>。

采用小信号放大装置对掺杂浓度为 2.5% 的 Nd:YAG 晶体衍生光纤和 CorActive 的 Nd-103 光纤在 915 nm 处的增益系数进行了测试,光纤长度均为 20 mm,如图 2 所示。采用单模光纤耦合输出的 915 nm 半导体激光器(LD)及 808 nm LD 分别作为放大器的种子激光和泵浦光,通过波分复用器(WDM)将它们同时注入一段长度为 20 mm 的待测光纤中进行放大,放大后的信号光经过一个

WDM 滤除残余泵浦光,而后再经过一个带通滤波器(BPF)进行输出,以避免  $1\ \mu\text{m}$  处自发辐射光对最后输出功率的干扰。信号光强为  $-15\ \text{dBm}$  时的测试结果如图 2(b)所示;泵浦功率为  $128\ \text{mW}$  时,



CorActive 公司的 Nd-103 光纤增益系数为  $0.44\ \text{dB/cm}@915\ \text{nm}$ ;泵浦功率为  $132\ \text{mW}$  时, Nd:YAG 晶体衍生光纤的增益系数为  $1.16\ \text{dB/cm}@915\ \text{nm}$ 。

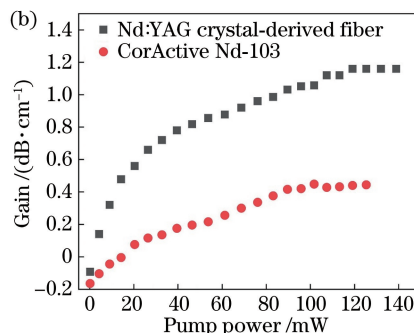


图 2 采用小信号放大装置测试 Nd:YAG 晶体衍生光纤和 CorActive 的 Nd-103 光纤在  $915\ \text{nm}$  处的增益系数。

(a)增益测试光路;(b)增益系数随泵浦功率增加的变化

Fig. 2 Gain coefficients of Nd:YAG crystal-derived fiber and CorActive ND-103 fiber at  $915\ \text{nm}$  were measured by small signal amplification device. (a) Gain test optical path; (b) gain coefficient change with the pump power

### 3 $915\ \text{nm}$ 超短腔 DBR 单频光纤激光

对基于 Nd:YAG 晶体衍生光纤的单频激光器的输出特性进行研究,实验装置如图 3 所示。实验采用 DBR 结构,将 NYDF 与一对波长匹配的  $915\ \text{nm}$  的光纤布拉格光栅(FBG)直接熔接组成激光腔,二者匹配的中心波长为  $915.3\ \text{nm}$ ,保偏 FBG (PM-FBG)采用部分反射率为  $95\%$  的窄带光栅,其反射带宽为  $0.08\ \text{nm}$  ( $28.6\ \text{GHz}$ )。高反射率 FBG

(HR-FBG)具有  $99\%$  的高反射率,高反射率光栅的反射带宽为  $0.3\ \text{nm}$ 。激光腔由  $808\ \text{nm}$  LD 通过  $808\ \text{nm}/915\ \text{nm}$  波分复用器(WDM)进行反向泵浦。WDM 信号端熔接一个带滤波器的光隔离器(ISO),以防止反射光进入谐振腔,同时滤除  $1000\sim 1100\ \text{nm}$  波段的荧光,增强信号光信噪比(SNR)。为了保证单频激光输出的稳定性,将整个腔体直接放置在铜散热器中,温度控制精度为  $0.01\ ^\circ\text{C}$ 。最终通过温度控制,实现了单频激光输出。

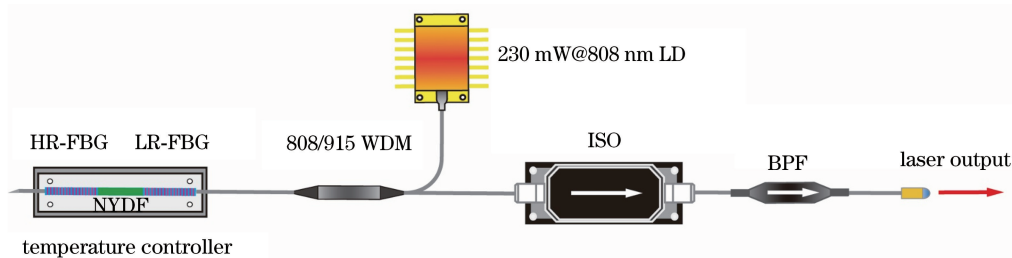


图 3 单频 DBR 激光器装置图

Fig. 3 Single-frequency DBR laser setup

为了获得单纵模输出,利用高精度波长计(HighFinesse WS7)对不同长度增益光纤的激光纵模特性进行了研究。其中图 4(a)~(c)中,上下两图的横坐标表示探测点离干涉图样中心点的相对距离  $d$ ,纵坐标表示相对光强度。图 4(d)上图的横坐标表示测试时间,单位为  $\text{min}$ ,纵坐标表示测试激光的中心波长,单位为  $\text{nm}$ ;图 4(d)下图的横坐标表示测试时间,单位为  $\text{min}$ ,纵坐标表示线宽值,单位为  $\text{pm}$ 。增益光纤长度为  $10\ \text{mm}$  时,结果如图 4(a)所示,从中可以观察到 3 组干涉条纹,其原因是较长的

增益光纤,其纵模间隔较小。进一步减小增益光纤长度到  $8\ \text{mm}$  时,结果如图 4(b)所示,从中可以观察到干涉条纹减少为两组,这是因为减小增益光纤的长度,使得腔内纵模数减少。由此表明减小增益光纤长度可以有效减少激光腔内的纵模数量,但其激光输出仍然不是单纵模。直到减小增益光纤长度到  $6\ \text{mm}$  时,通过精确的温度控制,该系统激光输出处于单纵模运转状态,结果如图 4(c)所示。增益光纤为  $6\ \text{mm}$  时,对激光器的波长漂移和线宽稳定性进行了测试,如图 4(d)结果所示,其线宽小于  $0.5\ \text{pm}$ ,对

应小于 179.2 MHz。在 0.5 h 内,其波长漂移为  $\pm 0.1$  pm,线宽稳定度小于 0.5 pm。

为 6 mm 的增益光纤,并在此基础上进一步研究 915 nm 单频激光器的激光输出特性。

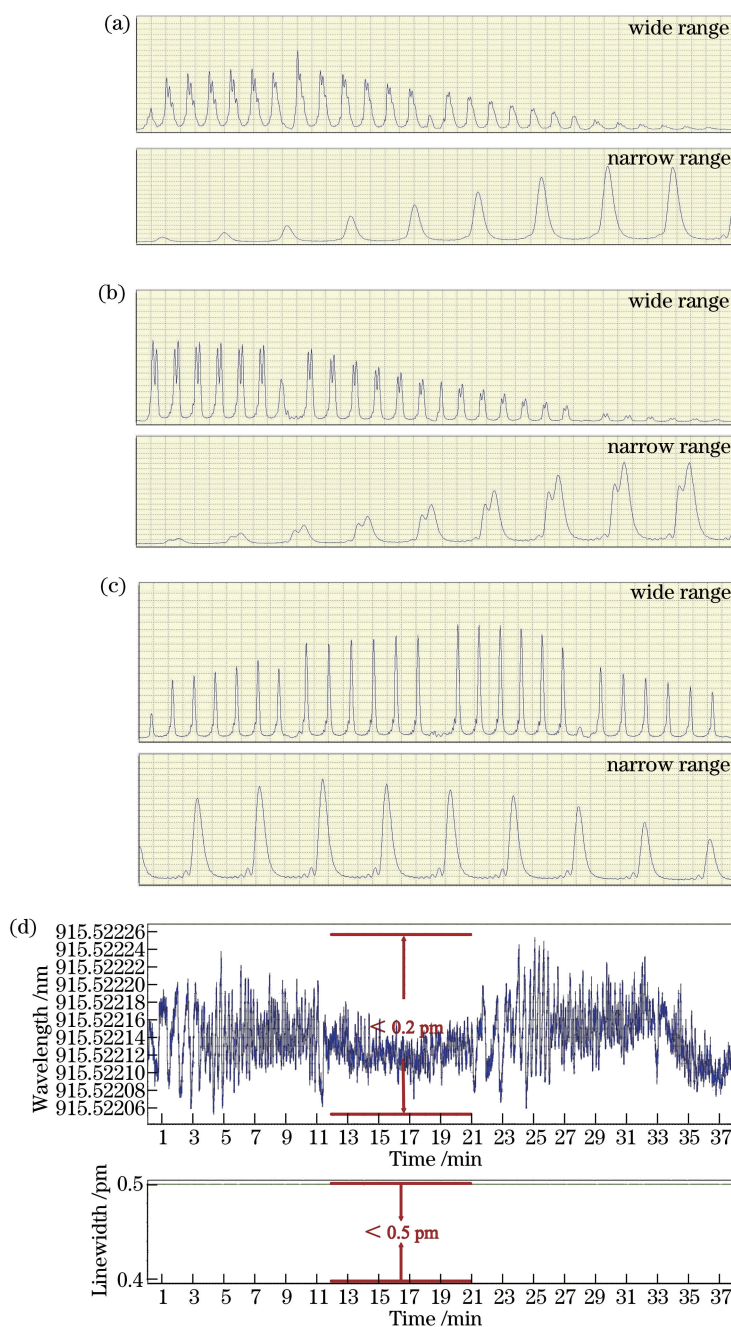


图 4 不同长度增益光纤的激光纵模特性研究。(a)增益光纤为 10 mm 时,波长计测试结果图;(b)增益光纤为 8 mm 时,波长计测试结果图;(c)增益光纤为 6 mm 时,波长计测试结果图

Fig. 4 Laser longitudinal mode characteristic of optical fibers with different gain lengths. (a) Test results of the wavemeter when the gain fiber is 10 mm; (b) test results of the wavemeter when the gain fiber is 8 mm; (c) test results of the wavemeter when the gain fiber is 6 mm; (d) stability test results of the wavemeter when the gain fiber is 6 mm

利用光电功率计(PD300-IR)对 915 nm 超短腔 DBR 单频光纤激光器的输出功率进行测试,如图 5(c)所示,其阈值泵浦功率为 39.5 mW,泵浦功率为 132 mW 时,最大输出功率为 0.1 mW,斜率效

率为 0.11%。2016 年,天津大学史伟团队利用 Nufern 公司掺  $\text{Nd}^{3+}$  光纤(长为 25 mm)实现了 930 nm 单频激光输出,输出功率为 1.9 mW,其斜率效率约为 2.23%。2021 年,亚利桑那大学傅世杰

等利用掺  $\text{Nd}^{3+}$  磷酸盐光纤(长为 25 mm)实现了 915 nm 单频激光输出,输出功率为 13.5 mW,其斜率效率约为 3.9%。上述工作中使用的窄带光栅的带宽仅为 0.03 nm,若要获得较大的功率单频激光输出,可以使用较长的增益光纤。激光光谱采用光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6370D)进行测量,测量结果如图 5(a)和图 5(b)所示,在最大输出功率

下,其中心波长为 915.37 nm,信噪比大于 50 dB。并且其发射光谱在 890~920 nm 的强度大体相同,通过改变光栅中心波长,可以获得 890~920 nm 单频激光输出,这表明 Nd:YAG 晶体衍生光纤具有实现 890~920 nm 单频光纤激光输出的巨大潜力,为近红外波段短波单频光纤激光器提供了一种极具潜力的稀土掺杂光纤。

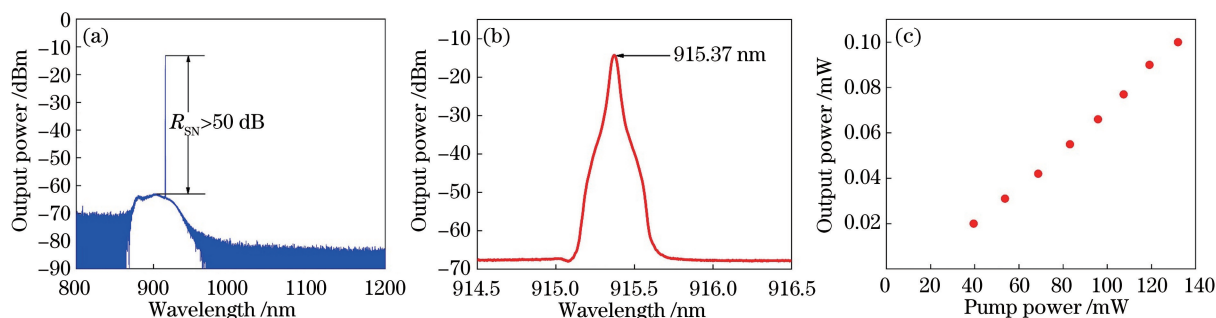


图 5 915 nm 超短腔 DBR 单频光纤激光器的输出功率特性研究。(a) 800~1200 nm 输出光谱图; (b) 914.5~916.5 nm 输出光谱图; (c) 泵浦功率与输出功率关系图

Fig. 5 Output power characteristics of 915 nm ultra-short cavity DBR single-frequency fiber laser. (a) 800–1200 nm output spectra; (b) 914.5–916.5 nm output spectra; (c) diagram of pump power and output power

本研究提出的 915 nm 单频光纤激光器的输出功率为 0.1 mW,其中 915 nm 单频激光器的输出激光功率较小,斜率效率较低,这主要是由于增益光纤长度较短以及光纤数值孔径过大使得熔接损耗增大所致。为增加激光器的输出功率,下一步采用带宽更小的光栅来增加增益光纤的长度。同时,光纤制备方面,将从折射率、软化温度、热膨胀系数等因素考虑,采用折射率更高的玻璃作为包层,来减小包层和纤芯的折射率差,从而降低光纤的数值孔径。

## 4 结 论

采用熔芯法制备了一种高增益 Nd:YAG 晶体衍生光纤,其光纤直径为 125  $\mu\text{m}$ ,纤芯直径为 10  $\mu\text{m}$ ,纤芯内  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Nd}_2\text{O}_3$  的质量分数分别约为 70.0%、1.0%,并对其各项激光参数进行了测量,在 1550 nm 处传输损耗为 8 dB/m,在 915 nm 处增益系数为 1.16 dB/cm。以 6 mm 长的 Nd:YAG 晶体衍生光纤作为增益光纤,采用 DBR 结构,实现了 0.1 mW 的 915 nm 单频激光输出。实验结果表明 Nd:YAG 晶体衍生光纤可以实现 890~920 nm 波段单频激光输出,是一种有潜力的近红外单频光纤激光器增益介质。

## 参 考 文 献

- [1] Lou Z K, Yang B L, Han K, et al. Real-time *in situ* distributed fiber core temperature measurement in hundred-watt fiber laser oscillator pumped by 915/976 nm LD sources [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 9006.
- [2] Choung H W, Lee S H, Ham A R, et al. Effectiveness of low-level laser therapy with a 915 nm wavelength diode laser on the healing of intraoral mucosal wound: an animal study and a double-blind randomized clinical trial [J]. Medicina, 2019, 55(8): E405.
- [3] Dagnelund D, Huang Y Q, Tu C W, et al. Dual-wavelength excited photoluminescence spectroscopy of deep-level hole traps in Ga(In)NP [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(1): 015701.
- [4] Drobizhev M, Makarov N S, Hughes T, et al. Resonance enhancement of two-photon absorption in fluorescent proteins [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2007, 111(50): 14051-14054.
- [5] Drobizhev M, Makarov N S, Tillo S E, et al. Two-photon absorption properties of fluorescent proteins [J]. Nature Methods, 2011, 8(5): 393-399.
- [6] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 868-874.
- [7] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Shen M, Sun R Y, Jin D C, et al. Design of 930 nm passive mode-locking Nd-doped all-fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0601006. 沈默, 孙若愚, 金东臣, 等. 930 nm 被动锁模掺钕全光纤激光器的研制 [J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0601006.
- [11] Cook A L, Hendricks H D. Diode-laser-pumped tunable 896-939.5-nm neodymium-doped fiber laser with 43-mW output power [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(15): 3276-3281.
- [12] 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.
- [13] Wang Y F, Li X Y, Wu J M, et al. Three-level all-fiber laser at 915 nm based on polarization-maintaining Nd<sup>3+</sup>-doped silica fiber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(1): 011401.
- [14] Fu S J, Zhu X S, Zong J, et al. Single-frequency Nd<sup>3+</sup>-doped phosphate fiber laser at 915 nm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39 (6): 1808-1813.
- [15] Yoo S, Webb A S, Standish R J, et al. Q-switched neodymium-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>-based silica fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2181-2183.
- [16] 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.
- [17] Wan Y, Wen J X, Dong Y H, et al. Exceeding 50% slope efficiency DBR fiber laser based on a Yb-doped crystal-derived silica fiber with high gain per unit length [J]. *Optics Express*, 2020, 28 (16): 23771-23783.
- [18] Qian G Q, Wang W L, Tang G W, et al. Tm:YAG ceramic derived multimaterial fiber with high gain per unit length for 2 μm laser applications [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1047-1050.
- [19] 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.
- [20] Dragic P, Law P C, Ballato J, et al. Brillouin spectroscopy of YAG-derived optical fibers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10055-10067.
- [21] 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.
- [22] Arai K, Namikawa H, Kumata K, et al. Aluminum or phosphorus co-doping effects on the fluorescence and structural properties of neodymium-doped silica glass [J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 59(10): 3430-3436.
- [23] Dragic P D, Cavillon M, Ballato J. Materials for optical fiber lasers: a review [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(4): 041301.
- [24] Li C Z, Jia Z X, Cong Z H, et al. Gain characteristics of ytterbium-doped SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fibers [J]. *Laser Physics*, 2019, 29(5): 055804.
- [25] 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.