

基于稀土掺杂石英光纤的单频光纤激光器

史伟^{1,2}, 付士杰¹, 房强^{3,4}, 盛泉¹, 张海伟¹, 白晓磊¹, 史冠男¹, 李锦辉^{3,4}, 姚建铨¹

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

2. 天津市现代激光与光学技术研究院, 天津 300384; 3. 山东海富光子科技股份有限公司, 山东威海 264209; 4. 天津欧泰激光科技有限公司, 天津 300384)

摘要: 系统研究了利用稀土掺杂的石英光纤作为激光增益介质来实现分布布拉格反射式单频光纤激光器。实验中, 分别将掺有 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 、 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 和 Tm^{3+} 的商用石英光纤, 熔接到激光谐振腔中, 实现了基于石英玻璃光纤的光纤激光系统在多波段的单纵模运转。对各光纤激光器的单频特性进行了研究, 其中, 激光器线宽可达几十千赫(特别是对于 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器, 其线宽窄于 7 kHz), 激光系统的强度噪声接近于散粒噪声极限, 实验中获得了激光波长由 930 nm 到 2 μm 的单频光纤激光器。实验结果证明: 商用的稀土掺杂石英光纤能够作为有效的增益介质来实现短腔型单频光纤激光器。同时, 通过进一步的系统集成, 基于稀土掺杂石英光纤的单频光纤激光器将得到更加广泛的应用。

关键词: 光纤激光器; 单频; 石英光纤

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1003001

Single-frequency fiber laser based on rare-earth-doped silica fiber

Shi Wei^{1,2}, Fu Shijie¹, Fang Qiang^{3,4}, Sheng Quan¹, Zhang Haiwei¹, Bai Xiaolei¹, Shi Guannan¹,
Li Jinhui^{3,4}, Yao Jianquan¹

(1. College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Institute of Modern Laser & Optics Technology, Tianjin 300384, China;

3. HFB Photonics Co. Ltd., Weihai 264209, China;

4. Tianjin Optera Laser Technology Co. Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: Single-frequency distributed Bragg reflector (DBR) fiber lasers were systematically investigated with rare-earth-doped silica fibers. The commercial Nd^{3+} , Yb^{3+} , $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ and Tm^{3+} -doped silica fibers were applied in this demonstration to achieve the monolithic all-silica glass fiber lasers operating on single longitudinal mode. In the experiment, single-frequency operation was characterized, linewidth of tens of kilohertz was obtained (especially for the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber laser, the linewidth was narrow to 7 kHz) and the measured relative intensity noise approached the shot noise limit. The result confirms that commercial rare-earth-doped silica fiber can be an efficient gain medium to achieve single-frequency fiber laser with the wavelength range from 930 nm to 2 μm , which can be further commercialized for a wide range of applications.

Key words: fiber laser; single frequency; silica fiber

收稿日期: 2016-02-11; 修订日期: 2016-03-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB3399802); 国家自然科学基金(61275102, 61335013);

教育部博士点基金(20130032110051); 国家高技术研究发展计划(2014AA041901)

作者简介: 史伟(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光纤激光技术和太赫兹光子学方面的研究。Email: shiwei@tju.edu.cn

0 引言

单频光纤激光器,因其低噪声、窄线宽以及由此具有的长相干长度等特点,在相干光通信、激光雷达、高分辨光谱分析和引力波探测等领域具有广泛的应用前景,近年来已成为激光技术领域的研究热点^[1-4]。从激光器的腔型结构上看,单频光纤激光器的实现方式分为环形腔和线形腔两种。环形腔激光器一般采用较长的激光腔长,虽然一方面能够利用长增益光纤提高输出功率,且腔长的增加有利于获得较窄的激光线宽,但随之也导致谐振腔的纵模间距减小,需要通过向腔内插入窄带滤波器或采用复合腔的方式来减少腔内起振的纵模数量。这将引入额外的损耗,增加激光系统的复杂程度,同时这类环形激光器往往伴有跳模现象的产生。相比于环形腔,线形腔激光器的实现较为简单,其中,基于布拉格光栅的 DBR 型单频光纤激光器,凭借较高的激光效率、紧凑的结构设计以及稳定的单纵模运转特性,得到了更加广泛的研究与应用。

DBR 型单频光纤激光器的结构如图 1 所示,激光谐振腔由一对光纤光栅中间熔接一段 1~2 cm 长的稀土掺杂光纤构成。通过输入端的波分复用器(WDM)将泵浦光耦合到腔内,在输出端通过另一波分复用器滤除剩余的泵浦光,得到信号激光输出。这种短腔结构能够保证激光器具有较大的纵模间距,

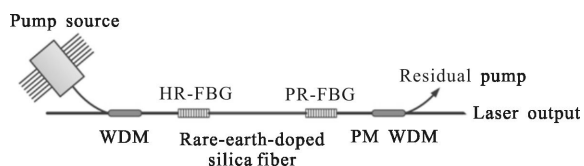


图 1 DBR 型单频光纤激光器的结构图

Fig.1 Schematic of the single-frequency DBR fiber laser

从而在光纤光栅的窄带滤波作用下,实现激光器的单纵模运转。但由于早期稀土掺杂石英光纤制造技术的限制,稀土掺杂浓度有限,采用这种短腔结构的光纤激光器输出功率普遍较低^[5-6]。但随着高掺杂软玻璃光纤的制作技术的突破和发展,有源光纤的增益系数得到很大的提高,各种基于多组分玻璃光纤的高功率单频光纤激光器相继被报道。2003 年, NP Photonics 公司的 Ch. Spiegelberg 等利用 2 cm 长的高掺杂 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤作为增益介质,搭建了波长为 1 550 nm 的 DBR 型单频激光器,首次实现

了超过 100 mW 的功率输出,有源光纤的增益系数高达 5 dB/cm^[7]。2004 年该课题组报道了基于高掺 Yb^{3+} 光纤的 1 μm DBR 型单频光纤激光器^[8]。该光纤在 1 064 nm 处的增益系数达到 2 dB/cm,实验使用 1.5 cm 的有源光纤获得了超过 200 mW 的单频激光输出,斜率效率为 31%。2007 年该公司的 Jihong Geng 等利用研制的高掺铈铬酸盐光纤实现了 2 μm 波段单频光纤激光器的高效率输出^[9]。实验中使用的掺铈光纤 Tm_2O_3 的掺杂浓度达到 5 wt.%,因此仅使用 2 cm 长的有源光纤便实现了在 1 893 nm 处 50 mW 的单频激光输出,激光器的泵浦阈值仅为 30 mW,斜率效率为 35%。但由于光纤光栅与有源光纤玻璃材质的不同,激光谐振腔熔接损耗达到 1.6 dB。近年来,国内在高掺杂光纤方面也取得了长足的发展。2010 年中国科学院上海光学精密机械研究所的蔡海文课题组研制出增益系数达到 4.2 dB/cm 的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤,并利用其实现了 100 mW 的单频激光输出^[10]。同年华南理工大学杨忠民课题组将 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤的增益系数提高到了 5.2 dB/cm,并依此实现了超过 300 mW 的 DBR 型单频光纤激光器^[11]。之后该课题组又相继报道了基于高掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤(增益系数为 5.7 dB/cm)和高掺 Tm^{3+} 铬酸盐光纤(增益系数为 2.3 dB/cm)的短腔型百毫瓦级单频光纤激光器^[12-13]。

相比于石英玻璃,磷酸盐和铬酸盐玻璃具有较高的稀土离子掺杂能力,能够提供更高的增益系数,从而为高功率 DBR 型单频光纤激光器的实现提供了有效的增益介质。但这些软玻璃光纤在提供高增益的同时,仍然存在一些制约其广泛应用的因素。首先,由于光纤激光器中其他器件都是基于石英光纤,二者物理特性的不同,特别是在光纤的熔点、热膨胀系数等参数上具有很大的差异,这将导致熔接点的机械强度较弱,极易造成激光运行的不稳定;其次,尽管依靠高性能的熔接设备能够实现不同种类光纤之间的熔接,但不得不承认,仍然具有很大的难度,并要求一定的熔接技术和操作经验^[14-15]。此外,由已报道的结果可以发现:这类光纤激光器高度依赖于各课题组自行研制的高掺杂多组分光纤,不利于其推广和广泛应用。另一方面,随着玻璃材料及光纤制造技术的发展,商用的稀土掺杂石英光纤的增益系数逐渐提高,应用这类基于石英玻璃有源光纤

研制的全石英光纤单频激光系统将极富竞争力。文中系统研究了基于稀土掺杂石英光纤的 DBR 型单频光纤激光器。利用商用的掺 Nd³⁺、Yb³⁺、Er³⁺/Yb³⁺和 Tm³⁺石英光纤,实现了 DBR 型光纤激光器在光纤激光器领域 3 个主要研究波段 (1 μm, 1.5 μm 和 2 μm 波段)有效的单频运转。实验中对各波段单频光纤激光器的输出特性,包括输出功率,激光线宽和相对强度噪声在内的参数进行了系统的分析和讨论。

1 基于稀土掺杂石英光纤的 DBR 型单频光纤激光器

1.1 基于掺 Nd³⁺石英光纤的 930 nm DBR 型单频光纤激光器

掺 Nd³⁺光纤在 900~945 nm 的激光发射谱能够用来倍频产生纯净的蓝光输出,从而应用在海洋探测、荧光光谱分析以及生物 DNA 排序等领域。因此,对基于掺 Nd³⁺石英光纤的 930 nm 单频光纤激光器进行了研究。实验所用有源光纤为 Nufern 公司生产的 PM-NDF-5/125 光纤,其纤芯和包层直径分别为 5 μm 和 125 μm,纤芯的数值孔径为 0.15,光纤在 808 nm 处的吸收系数为 4.5 dB/cm^[6]。实验首先研究了 808 nm 泵浦条件下,有源光纤在不同长度下的发射光谱特性。如图 2 所示,掺 Nd³⁺光纤主要的发射峰位于 910 nm

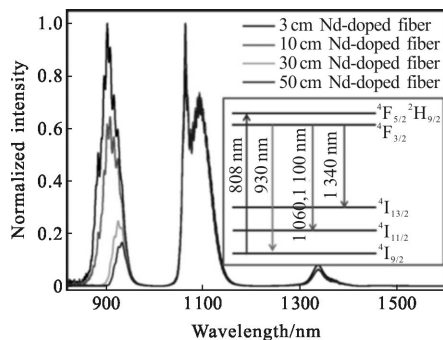


图 2 在 125 mW 808 nm 激光泵浦条件下,不同长度的掺 Nd³⁺石英光纤的发射光谱特性

Fig.2 Spectra of forward ASE for different lengths of Nd³⁺-doped silica fiber, core-pumped by 125 mW laser at 808 nm

和 1 064、1 100 nm 附近,分别对应着三能级跃迁 (⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2})和准四能级跃迁(⁴F_{3/2}-⁴I_{11/2})。当有源光纤长度逐渐增加时,沿光纤长度方向泵浦强度逐渐减弱,其在 910 nm 处的发射逐渐降低,并由于短波处的重吸收导致发射峰开始向长波方向移动。掺 Nd³⁺光纤

的这一特性有利于利用短直腔实现波长<945 nm 的单频光纤激光器。

在基于掺 Nd³⁺石英光纤的单频光纤激光系统中,一对中心波长为 930 nm 的光纤光栅与掺杂光纤熔接形成谐振腔。其中,高反光栅写于非保偏的石英光纤(HI-780 光纤)中,反射率达到 99.99%,反射带宽为 0.3 nm;部分反射光栅写于保偏光纤上,其反射率为 90%,3 dB 带宽为 0.02 nm。保偏光纤的双折射特性使得部分反射光栅具有两个不同的反射波长,但其中只有一个波长落在高反光栅的反射带中,因而激光器的输出具有偏振特性。考虑到光栅栅区的长度,以及部分反射光栅的反射带宽,为实现激光器稳定的单纵模运转,实验选取了 2.5 cm 长的掺 Nd³⁺光纤作为增益介质。激光器的纵模运转特性通过一商用扫描 Fabry-Perot(F-P)干涉仪测得,该干涉仪的自由光谱范围(FSR)为 10 GHz,精细度为 160。如图 3 所示,激光器获得了稳定的单纵模运转,通过 1 h 的模式监测,未出现跳模或模式竞争现象。光谱仪(YOKOGAWA, AQ6375)测得的激光器的输出谱如图 4 所示,激光的中心波长位于 929.77 nm,考虑到

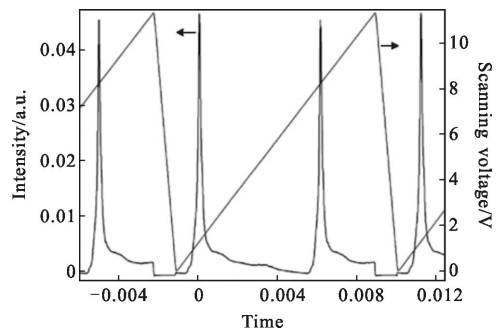


图 3 扫描 F-P 干涉仪测得的掺 Nd³⁺单频光纤激光器纵模特性
Fig.3 Longitudinal-mode characteristics of Nd³⁺-doped single-frequency fiber laser measured with a scanning F-P interferometer

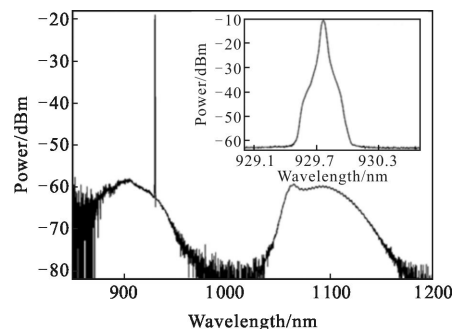


图 4 掺 Nd³⁺单频光纤激光器的输出光谱
Fig.4 Output spectrum of the single-frequency Nd³⁺-doped fiber laser

1100 nm 附近的自发辐射(ASE), 930 nm 掺 Nd³⁺光纤激光器的信噪比达到 40 dB。

使用热敏功率探测器 (Newport, 818P-001-12) 测得的掺 Nd³⁺单频光纤激光器的输出功率如图 5 所示。激光器相对于注入泵浦功率的阈值为 35 mW, 在注入泵浦功率为 125 mW 时获得最大的输出功率为 1.9 mW。考虑到剩余的泵浦功率、WDM 的插损以及熔接损耗, 得到激光输出功率与吸收泵浦功率之间的关系, 此时激光的斜率效率为 2.9%。较低的转换效率主要由于 930 nm 附近的激光发射属于三能级激光系统, 与 1060 nm 附近的准四能级激光相比难度较大, 需要更高的泵浦亮度及光纤增益。实验同时对激光输出功率的稳定性进行了监测, 如图 5 的插图中所示, 激光器在 1 h 内的功率抖动约为 1.5%。

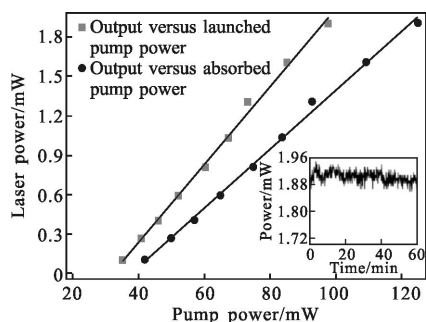


图 5 激光器输出功率与注入泵浦功率及吸收泵浦功率的关系
Fig.5 Output power of the laser as a function of the launched and absorbed pump power

通过搭建一套延迟的自外差系统, 实验测得了掺 Nd³⁺单频光纤激光器的线宽。其中, 10 km 光纤延迟线使得测量系统的线宽分辨率达到 20 kHz。图 6 显示了激光器输出功率为 1.8 mW 时的外差信号, 通过 Lorentz 线型拟合得到激光器的线宽为 44 kHz。

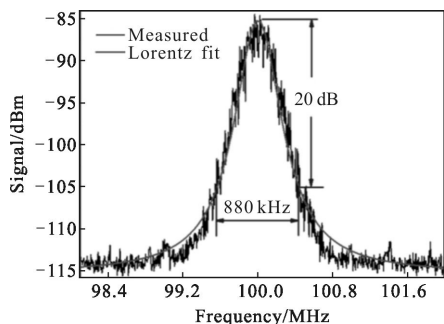


图 6 掺 Nd³⁺光纤激光器输出功率为 1.8 mW 时的外差信号
Fig.6 Heterodyne signal of the Nd³⁺-doped fiber laser at the output power of 1.8 mW

1.2 基于掺 Yb³⁺石英光纤的 980 nm DBR 型单频光纤激光器

980 nm 单频光纤激光器因其窄线宽、低噪声的特性能够作为高质量的泵浦源, 用于实现掺镱以及掺铒光纤激光器的高效输出。同时, 在单光子探测、非线性频率变换等领域具有潜在的应用前景。实验使用 2 cm 长的商用高掺 Yb³⁺石英光纤作为增益介质。Yb³⁺在 980 nm 处的发射为三能级系统, 需要将至少一半的掺杂粒子激发到激光上能级, 因此采用 915 nm 单模激光器纤芯泵浦的方式来提高泵浦强度。激光谐振腔中高反光栅反射率为 99.9%。考虑到激光器的起振以及激光功率有效的提取, 选择反射率为 70% 的光纤光栅作为输出耦合器件。该光栅的反射带宽控制在小于 0.05 nm, 从而保证 2.5 cm 的腔长能够获得稳定的单纵模运转。此外, 全石英光纤的激光系统使得整个激光器的熔接损耗低于 0.01 dB。

激光器的输出功率随泵浦功率的变化如图 7 所示, 激光阈值接近于 17 mW, 低于参考文献[17]中高掺 Yb³⁺磷酸盐单频光纤激光器的 45 mW 激光阈值。这得益于全石英光纤系统的低熔接损耗, 特别是有源光纤和光纤光栅的熔接焊点。实验测得激光器在阈值处的泵浦吸收为 3.6 dB。在注入的泵浦功率为 150 mW 时, 激光器的输出功率达到 25 mW, 相对于注入泵浦功率的斜率效率约为 16.7%。激光器在 980 nm 附近的发射效率与掺 Yb³⁺石英光纤本身的参数有关^[18], 可以通过优化光纤的掺杂浓度、纤芯结构以及光纤长度等参数来进一步提高激光器的效率。

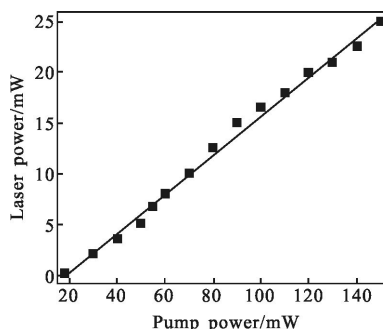


图 7 978 nm 单频光纤激光器输出功率与泵浦功率的关系
Fig.7 Output power of the 978 nm single-frequency fiber laser versus the launched pump power

由激光器的输出光谱(图 8)可以看出; 应用较短的掺杂光纤, 有效地避免了长波方向 1030 nm 附近

的自发辐射或寄生激射的产生,980 nm 单频激光的信噪比达到 45 dB。图 8 中的插图为光谱仪分辨率设置为 0.02 nm 时的激光光谱,激光中心波长为 978.1 nm。激光运转的纵模特性由一自制的光纤 F-P 干涉仪测得,干涉仪自由光谱范围约为 2 GHz,精细度为 157。如图 8 中插图所示,在一个自由光谱范围内存在的单一透射峰,证实光纤激光器的单纵模运转,更精细的线宽测量受限于 F-P 干涉仪 12.7 MHz 的分辨带宽。

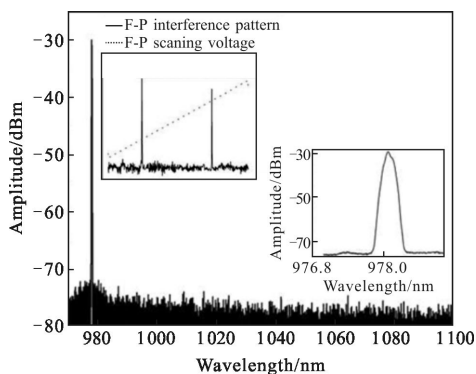


图 8 978 nm 光纤激光器的输出光谱;插图:光谱仪分辨率为 0.02 nm 下的激光光谱图;F-P 干涉仪测得的激光器纵模特性

Fig.8 Optical spectrum of the 978 nm fiber laser; Inset: spectrum of the laser measured with the resolution of 0.02 nm; Fabry-Perot interference pattern

1.3 基于掺 Yb³⁺石英光纤的 1 064 nm DBR 型单频光纤激光器

在众多稀土掺杂型光纤激光器中,掺 Yb³⁺光纤激光器获得了最高的能量提取效率和输出功率^[19]。Yb³⁺在 $F_{5/2} \sim F_{7/2}$ 能级之间的能量转换能够产生 970~1 200 nm 之间的宽光谱发射。除 980 nm 处,激光在更长波长的运转,由于较低的量子亏损、较高的功率输出而得到了更广泛的关注。因此,实验中笔者研究了基于掺 Yb³⁺石英光纤工作在 1 064 nm 处的单频光纤激光器。

实验使用的掺杂光纤为 CorActive 公司的 Yb406 光纤,该光纤在 915 nm 处的吸收系数为 600 dB/m,数值孔径为 0.16。激光谐振腔由一段 2 cm 长的掺 Yb³⁺石英光纤熔接在一对中心波长为 1 064 nm 的光栅对之间构成。其中,高反光栅的反射率为 99.9%,反射带宽为 0.3 nm;部分反射光栅的反射率为 60%,反射带宽控制在 0.05 nm。一单模 976 nm 的泵浦源

经 976/1 064 WDM 耦合进激光器中。

1 064 nm 激光器的输出功率随注入泵浦功率之间的关系如图 9 所示,激光器的阈值为 8 mW。输出功率随着泵浦功率的增加而逐渐提高,当注入的泵浦功率为 230 mW 时,获得 32 mW 的激光输出功率,斜率效率为 15%。图 10 为分辨率为 0.02 nm 时激光器的输出光谱,激光中心波长为 1 064.1 nm,信噪比大于 60 dB。该掺 Yb³⁺光纤激光器的单纵模运转特性由一商用扫描 F-P 干涉仪所验证,扫描干涉图样如图 11 所示。和参考文献[20]报道的掺 Yb³⁺石英光纤

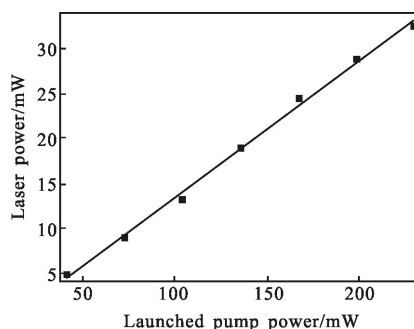


图 9 1 064 nm 单频光纤激光器输出功率与注入泵浦功率的关系
Fig.9 Output power of the single-frequency fiber laser at 1 064 nm as a function of the launched pump power

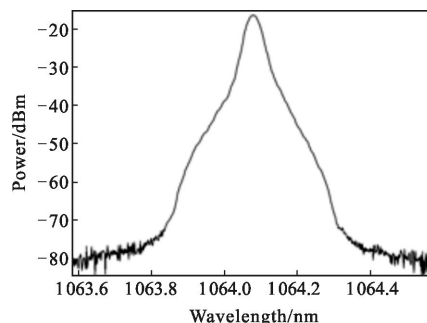


图 10 分辨率为 0.02 nm 下的 1 064 nm 激光光谱
Fig.10 Optical spectrum of the laser measured by an OSA with the resolution of 0.02 nm

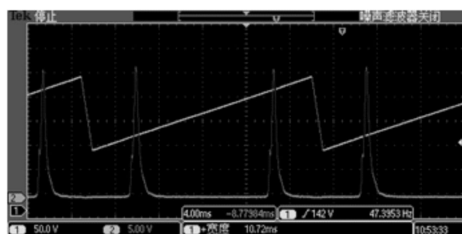


图 11 扫描 F-P 干涉仪下激光器单纵模运转特性
Fig.11 Single-longitudinal mode characteristics of the laser measured by the scanning Fabry-Perot interferometer

单频激光器相比,文中的 1064 nm 单频激光器具有较低的激光阈值,以及高出一倍的斜率效率。这得益于实验中各焊点较好的熔接处理,以及对整个激光谐振腔进行的实时温度控制以获得稳定的激光运转。

1.4 基于 Er³⁺/Yb³⁺共掺石英光纤的 1550 nm DBR 型单频光纤激光器

1550 nm 单频光纤激光器的谐振腔结构为一段商用的 Er³⁺/Yb³⁺共掺石英光纤熔接在一对窄带宽的光纤光栅对之间^[21]。有源光纤为 Nufern 公司生产的 PM-EYDF-12/130-HE 光纤,该光纤在 915 nm 处的包层吸收系数为 3.3 dB/m。作为输出耦合器的部分反射光栅反射率为 85%,反射带宽小于 0.05 nm。较高的光栅反射率一方面是为了保证激光器的正常谐振,同时能够提取出一定的激光功率。为控制激光谐振腔长度以保证单纵模运转,光纤光栅的尾纤在熔入谐振腔前需切至栅区附近。实验中有源光纤长度为 2 cm,并由一单模 976 nm 半导体激光器泵浦激发。在激光输出特性测试前需对激光器整体进行集成封装,并进行温度控制。

图 12 为 1550 nm 光纤激光器输出功率与注入泵浦功率之间的关系。激光器阈值在 105 mW 附近,在注入泵浦功率为 350 mW 时获得输出功率 6.5 mW。相对于注入泵浦功率,激光器的斜率效率仅为 2.7%。较低的转换效率是由于石英光纤中 Er³⁺的掺杂浓度有限,且激光器中有源光纤长度较短,Yb³⁺与 Er³⁺之间未能实现有效的能量转换。激光器在输出功率为 6.5 mW 时的光谱如图 13 所示,激光中心波长位于 1549.85 nm,未产生 1 μm 及 1530 nm 处 ASE,激光信噪比大于 60 dB。

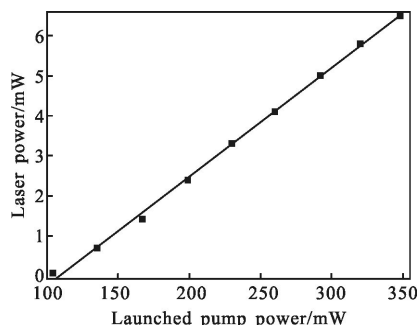


图 12 Er³⁺/Yb³⁺共掺单频光纤激光器输出功率与注入泵浦功率的关系

Fig.12 Output power of the Er³⁺/Yb³⁺ co-doped single frequency fiber laser versus the launched pump power

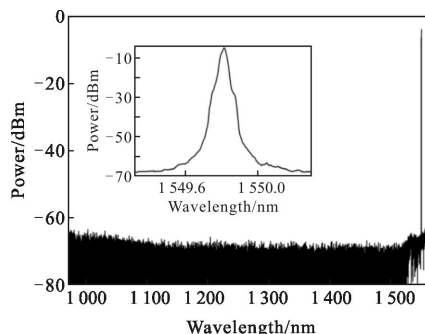


图 13 Er³⁺/Yb³⁺共掺光纤激光器输出光谱;插图:光谱仪分辨率为 0.02 nm 下的激光光谱图

Fig.13 Optical spectrum of the Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fiber laser; Inset: Laser spectrum measured with a resolution of 0.02 nm

该 Er³⁺/Yb³⁺共掺 1550 nm 单频光纤激光器的线宽由延迟的自外差方式测得,测量系统中延迟光纤为 50 km 的单模光纤(Corning, SMF-28),从而使得外差测量系统的线宽分辨率达到 4 kHz。实验测得的外差信号如图 14 所示,20 dB 线宽为 143 kHz,对应的激光器 Lorentz 线宽为 7 kHz,这意味着该单频光纤激光器的相干距离高达 75 km。图 15 为实验测得

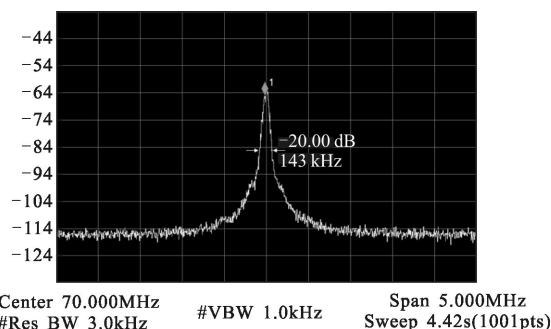


图 14 延迟自外差方法测得的 1550 nm 单频光纤激光器的线宽
measured with delayed self-heterodyne method

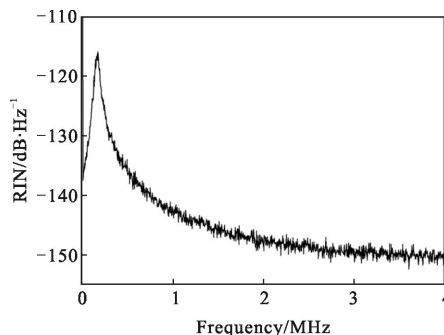


图 15 激光器在输出功率为 6.5 mW 时的相对强度噪声
Fig.15 Relative intensity noise of the laser at the laser power of 6.5 mW

的激光器的相对强度噪声，激光弛豫振荡频率位于 200 kHz 附近，强度为 -118 dB/Hz。随着频率逐渐增加，噪声强度逐渐降低，在高频处趋于 -150 dB/Hz，接近背景散粒噪声。总的来看，该 1 550 nm 单频光纤激光器具有长相干距离、低噪声等优点，是应用在相干光通信、多普勒雷达和高分辨光谱分析等领域的优质光源。

1.5 基于掺 Tm^{3+} 石英光纤的 1 950 nm DBR 型单频光纤激光器

最后，笔者使用商用的掺 Tm^{3+} 石英光纤搭建了一台 2 μm DBR 型单频光纤激光器^[22]。实验所用的掺 Tm^{3+} 光纤为 Nufern 公司生产的 PM-TDF-10P/130-HE 光纤，该光纤的纤芯/包层直径为 10/130 μm ，纤芯的数值孔径为 0.15，在 793 nm 处的包层吸收系数为 4.7 dB/m。构成激光谐振腔的光纤光栅对反射率分别为 99.9% 和 70%，其中部分反射光栅的 3 dB 带宽为 0.05 nm。根据掺 Tm^{3+} 光纤的吸收特性，实验选用 793 nm 单模半导体激光器作为泵浦源，并经由 793/1950 WDM 耦合进激光器中。由于光纤光栅在 2 μm 波段的制作技术并没有 1 μm 和 1.5 μm 波段成熟，构成谐振腔的光栅对栅区较长。根据 Barmenkov 等人^[23] 的研究，布拉格光栅的有效长度与光栅的栅区长度有关，理论计算得到保证激光器单纵模运转的有源光纤长度应小于 2 cm，但为避免理论计算中光纤参数与实际情况的误差，实验中笔者使用光纤截断法来确定有源光纤的最优长度。通过扫描 F-P 干涉仪对每个激光谐振腔样品的纵模运转特性进行测试，最终确定有源光纤长度为 1.9 cm 时，能够获得稳定的单纵模激光运转，其经扫描干涉仪测试得到的纵模特性如图 16 所示。

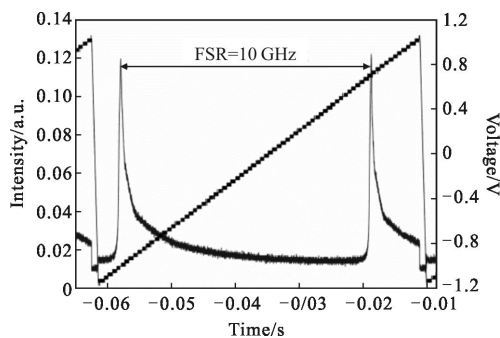


图 16 掺 Tm^{3+} 光纤激光器经 F-P 干涉仪测得的纵模特性

Fig.16 Longitudinal-mode characteristics of Tm^{3+} -doped fiber laser measured with a scanning F-P interferometer

由图 17 中激光器输出功率与泵浦功率之间的关系可知，相对于注入泵浦功率，激光器的阈值为 75 mW。随着泵浦功率的增加，激光器输出功率逐渐增加，并在泵浦功率为 240 mW 时得到最高输出功率 18 mW。由图中可见，激光器的输出并未出现饱和现象，进一步的功率提高只受限于泵浦源所能提供的功率。在考虑剩余泵浦功率、系统熔接损耗，以及 WDM 插损的情况下，得到激光器输出功率与吸收的泵浦功率之间的关系，此时的激光斜率效率为 13.4%。图 18 为该掺 Tm^{3+} 光纤激光器在输出功率为 18 mW 时的光谱，激光器的中心波长位于 1 950.1 nm。此外，光谱中还存在 1 530 nm 附近的 ASE，这是由掺杂离子在 $^3\text{H}_4$ 和 $^3\text{F}_4$ 能级之间能量转换所产生，但仍能保证激光器的信噪比大于 50 dB。

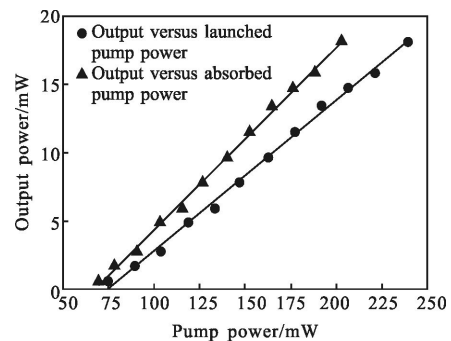


图 17 激光器输出功率与注入泵浦功率及吸收泵浦功率的关系

Fig.17 Output power of the laser as a function of launched and absorbed pump power

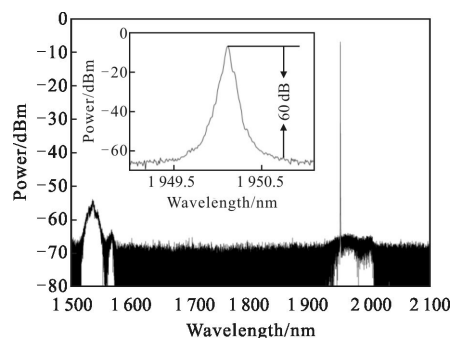


图 18 掺 Tm^{3+} 单频光纤激光器的输出光谱；插图为光谱仪分辨率为 0.05 nm 时记录的激光光谱

Fig.18 Output spectrum of the Tm^{3+} -doped single-frequency fiber laser; Inset: Laser spectrum measured by an OSA with the resolution of 0.05 nm

激光器的线宽由延时的自外差系统测得，10 km

的光纤延迟线使得线宽测试系统的分辨率达到 20 kHz。如图 19 所示,通过对外差信号进行 Lorentz 拟合得到激光器在泵浦功率为 135 mW 时的线宽为 37 kHz。此时激光器的相对强度噪声如图 19 插图所示,激光的弛豫振荡频率位于 480 kHz 左右,噪声强度为 -95 dB/Hz,其后噪声强度随着频率的增加而逐渐降低,最终趋于背景散粒噪声。

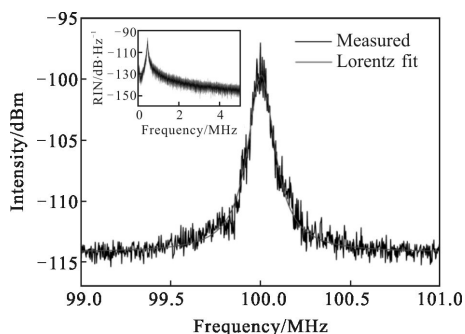


图 19 泵浦功率为 135 mW 时测得的外差信号;插图为此时光激光器的相对强度噪声

Fig.19 Lineshape of the heterodyne signal measured at the pump power of 135 mW; Inset: The corresponding RIN spectrum

2 结 论

文中对基于稀土掺杂石英光纤的 DBR 型单频光纤激光器进行了系统的研究。利用商用的掺 Nd³⁺、Yb³⁺、Er³⁺/Yb³⁺、Tm³⁺石英光纤,实现了光纤激光器在 3 个主要激光研究波段的单频运转。实验中,对各单频光纤激光器的单纵模运转特性进行了分析,测得了激光器的输出功率、光谱、线宽以及噪声等信息,从而在实验上验证了商用稀土掺杂的石英光纤能够作为有效的激光增益介质来实现 DBR 型单频光纤激光器。基于全石英光纤的单频光纤激光器具有系统损耗低、机械强度高以及结构紧凑等优势,能够作为单频激光器中的有力竞争者,应用到激光雷达、相干光通信和激光非线性频率变换等领域。

参考文献:

[1] Polynkin A, Polynkin P, Mansuripur M, et al. Single-frequency fiber ring laser with 1W output power at 1.5 μm [J]. *Optics Express*, 2005, 13(8): 3179-3184.
 [2] Shi W, Petersen E B, Nguyen D T, et al. 220 μJ monolithic single-frequency Q-switched fiber laser at 2 μm by using highly Tm-doped germanate fibers [J]. *Optics Letters*, 2011,

36(18): 3575-3577.
 [3] Bai X, Sheng Q, Zhang H, et al. High-power all-fiber single-frequency Erbium-Ytterbium co-doped fiber master oscillator power amplifier [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1-6.
 [4] Qi G, Xiong S, Liang X, et al. High-performance and narrow line-width nanosecond pulse laser amplifier for weak signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3234-3237.
 [5] Zyskind J L, Mizrahi V, DiGiovanni D J, et al. Short single frequency erbium-doped fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(15): 1385-1387.
 [6] Ball G A, Glenn W H. Design of a single-mode linear-cavity erbium fiber laser utilizing Bragg reflectors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, 10(10): 1338-1343.
 [7] Spiegelberg C, Geng J, Hu Y, et al. Compact 100 mW fiber laser with 2 kHz linewidth[C]//Optical Fiber Communication Conference, OSA, 2003, PD45.
 [8] Kaneda Y, Spiegelberg C, Geng J, et al. 200-mW, narrow-linewidth 1064.2-nm Yb-doped fiber laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA, 2004, CThO3.
 [9] Geng J, Wu J, Jiang S, et al. Efficient operation of diode-pumped single-frequency thulium-doped fiber lasers near 2 μm [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(4): 355-357.
 [10] Pan Z, Cai H, Meng L, et al. Single-frequency phosphate glass fiber laser with 100-mW output power at 1535 nm and its polarization characteristics[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(1): 52-54.
 [11] Xu S H, Yang Z M, Liu T, et al. An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5 μm [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1249-1254.
 [12] Xu S, Yang Z, Zhang W, et al. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb³⁺-doped phosphate fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3708-3710.
 [13] Qi Y, Shanhui X, Can L, et al. A single-frequency linearly polarized fiber laser using a newly developed heavily Tm³⁺-doped germanate glass fiber at 1.95 μm [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(9): 094206.
 [14] Wang J, Li W. Method of fusion splicing silica fiber with low-temperature multi-component glass fiber: US, 6866429 [P]. 2005-03-15.
 [15] Li H, Lousteau J, MacPherson W N, et al. Thermal sensitivity of tellurite and germanate optical fibers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(14): 8857-8863.

- [16] Fang Q, Xu Y, Fu S, et al. Single-frequency distributed Bragg reflector Nd doped silica fiber laser at 930 nm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1829–1832.
- [17] Zhu X, Shi W, Zong J, et al. 976 nm single-frequency distributed Bragg reflector fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4167–4169.
- [18] Liu Y, Cao J, Xiao H, et al. Study on the output properties of fiber lasers operating near 980 nm [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(2): 266–274.
- [19] Shi W, Fang Q, Zhu X, et al. Fiber lasers and their applications [Invited] [J]. *Applied Optics*, 2014, 53 (28): 6554–6568.
- [20] Guan W, Marciante J R. Single-polarization, single-frequency, 2 cm ytterbium-doped fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(10): 558–559.
- [21] Fang Q, Xu Y, Shijie Fu, et al. Single frequency distributed Bragg reflector Nd-doped silica fiber laser at 930 nm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1829–1832.
- [22] Fu S, Shi W, Lin J, et al. Single-frequency fiber laser at 1950 nm based on thulium-doped silica fiber [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5283–5286.
- [23] Barmenkov Y O, Zalvidea D, Torres-Peiró S, et al. Effective length of short Fabry-Perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2006, 14(14): 6394–6399.