

基于倾斜光栅的可调谐线偏振掺镱光纤激光器

杨锦民¹, 林彦吕¹, 黄千千¹, 黄梓楠¹, 邢志坤², 闫志君², 牟成博^{1*}

¹上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海先进通信与数据科学研究院,

上海大学特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444;

²华中科技大学光学与电子信息学院下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 提出了一种基于45°倾斜光纤光栅和光纤布拉格光栅的线性腔结构的可调谐线偏振掺镱光纤激光器。利用45°倾斜光纤光栅作为起偏器件实现了中心波长为1065.90 nm、3 dB带宽为0.03 nm、偏振消光比高于35 dB的线偏振激光输出, 输出激光的偏振消光比在4 h内稳定性良好。基于光纤布拉格光栅反射波长的温度特性实现了中心波长在1065.92~1066.87 nm范围内的连续可调, 在波长可调谐状态下输出激光的偏振消光比保持在30 dB以上。

关键词 激光器; 光纤激光器; 光纤布拉格光栅; 单偏振; 波长可调谐

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0314003

Wavelength-Tunable Linearly Polarized Yb-Doped Fiber Laser Based on Tilted Fiber Grating

Yang Jinmin¹, Lin Yanlü¹, Huang Qianqian¹, Huang Zinan¹, Xing Zhikun²,
Yan Zhijun², Mou Chengbo^{1*}

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract A tunable, linearly polarized Yb-doped fiber laser, based on a 45°-tilted fiber grating and a fiber Bragg grating with a linear cavity, is proposed. The use of the tilted fiber grating as a linear polarizer provides an output laser with a central wavelength of 1065.90 nm, a 3 dB bandwidth of 0.03 nm, and a polarization extinction ratio higher than 35 dB. The polarization extinction ratio remains stable for 4 h. The temperature characteristics of the beam reflected by the fiber Bragg grating make the central wavelength continuously tunable in the range of 1065.92–1066.87 nm; during the tuning operation, the output polarization extinction ratio is maintained at ≥ 30 dB.

Key words lasers; fiber lasers; fiber Bragg grating; single polarization; wavelength tunable

OCIS codes 140.3510; 060.3735; 260.5430; 140.3600

1 引 言

光纤激光器以其稳定性好、耦合效率高、散热性能好、成本低廉等优点受到研究人员的广泛青睐,其中以掺镱光纤(YDF)作为增益介质的光纤激光器在输出功率方面表现出优异的性能,成为近年来的热点课题之一。具有线偏振激光输出的光纤激光器在光纤陀螺仪^[1]、相干光束组合^[2]、超连续谱产

生^[3]、高次谐波产生^[4]等领域均有着重要的应用。

较早的实现线偏振激光输出的方法是在激光器的谐振腔中引入空间布儒斯特窗^[5],这种方法破坏了激光器的全光纤化结构,谐振腔的结构也较为复杂。近年来,实现线偏振激光输出的方法通常是以保偏掺杂光纤作为增益介质^[6],或利用刻写在保偏光纤上的光纤布拉格光栅(FBG)作为输出腔镜^[7]。这两种方法保持了激光器的全光纤化,谐振腔的结

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-09-14; 录用日期: 2019-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(61605107, 61505244)、天津大学光电信息技术教育部重点实验室开放课题(2018KFKT009)

* E-mail: mouc1@shu.edu.cn

构也较为简单,缺点是保偏光纤的使用提高了激光器的制作成本。为了保持激光器的全光纤化结构,降低激光器的制作成本,在腔内加入起偏器是一种可行的办法。传统的商用起偏器制作复杂、成本高且插入损耗较大。近年来提出的 45° 倾斜光纤光栅 (TFG) 具有高偏振相关损耗 (PDL)、低插入损耗、结构紧凑、散热性能好、与光纤型器件兼容性好等一系列突出的优点,可以作为一种理想的起偏器,被广泛应用于光纤传感和光纤激光器等领域^[8-11]。

目前,有关 45° TFG 线偏振光纤激光器的研究工作主要集中在环形腔结构激光器^[12-14]。另外一种典型的谐振腔结构的激光器——基于线性腔结构的激光器,相比于环形腔结构的激光器而言,具有结构简单、阈值功率低、斜率效率高等优点,在高功率光纤激光器^[15]、低重复频率耗散孤子锁模光纤激光器^[16]、低阈值锁模光纤激光器^[17] 等方向均有应用。本文搭建了一台基于 45° TFG 的线性腔结构的线偏振光纤激光器,激光器的阈值功率为 36 mW,斜率效率为 28.8%。

波长可调谐作为线偏振光纤激光器的研究方向之一,在光纤传感^[18]、激光雷达^[19]、光学相干断层扫描^[20] 等领域均有着重要的应用价值。由于 FBG 的反射波长与温度和应力均成良好的线性关系^[21],在腔内引入 FBG,控制其温度或对其施加应力是实现可调谐的一个可行的思路。目前已有研究人员将 FBG 作为可调谐滤波器应用于线偏振激光器的研究,实现了范围为 1~25 nm 的波长连续可调^[13,22]。以上研究中波长调谐的实现均是基于 FBG 反射波长的应力特性^[23-24],是一种较常用的方法,但这种方法通常依赖复杂的应力控制装置,且在对 FBG 施加应力的过程中容易损坏光栅。而利用 FBG 反射波长的温度特性来实现波长调谐的方法具有易操作、无损伤的特点。且随着光栅制备技术和光栅再生技术的发展,FBG 的高温稳定性得到了增强^[25-26],温度灵敏度得到提升^[27],利用 FBG 反射波长的温度特性可实现稳定、连续、宽范围的波长调谐。本文通过实验室自制的温控系统对 FBG 进行加热处理,实

现了中心波长在 1065.92~1066.87 nm 范围内的连续可调,波长调谐状态下激光器的偏振消光比 (PER) 保持在 30 dB 以上。

2 光纤光栅的制备与特性

实验所采用的 45° TFG 是用一台 244 nm 的氩离子倍频连续激光器作为紫外光源,通过相位掩模扫描技术,在型号为 HI1060 的单模光纤上进行刻写制备的。在刻写之前,将单模光纤放置在 15 MPa 压强、80 °C 的环境下,进行为期两天的载氢处理,以增强其光敏特性。实验所采用的 FBG 是用一台型号为 IPX-700 的准分子激光器作为光源,使用相位掩模曝光技术,在经过增敏后的单模光纤上进行刻写制备的,将刻写后的 FBG 在 100 °C 高温下进行持续 12 h 的退火以提高各项参数的稳定性。

45° TFG 的结构示意图如图 1 所示,在紫外光刻写的过程中会产生一系列折射率周期性变化的条纹,当光在光纤中传播经过这些条纹时,由于折射率的变化,光会发生反射和折射。由布儒斯特定律可知,当非偏振光以布儒斯特角入射到折射率变化的界面时,p 光(折射光)继续向前传播,s 光(反射光)经过光纤包层辐射到光纤之外。p 光和 s 光均为线偏振光,偏振矢量分别与入射面平行和垂直。每经过一道折射率条纹,上述过程就发生一次,经过多次反射和折射后,在 TFG 的另一端就输出了线偏振光。由紫外光刻写所导致的折射率变化量在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 之间^[28],范围极小,因此可以认为经紫外光刻写后的纤芯的折射率和纤芯原本折射率相等,由 Snell 定律计算得到布儒斯特角为 45° 。2009 年, Mou 等利用替代格林函数法对 TFG 中不同倾斜角度的光的耦合模式情况进行了理论和实验研究,结果表明,当倾角为 45° 时,倾斜光栅对 s 光具有最大的损耗而对 p 光的损耗几乎为 0^[22]。因此, 45° TFG 具有相当高的 PDL,可以作为起偏器来使用。

使用一台自搭建的工作于 1 μm 波段的宽带光源 (BBS) 以及一台 Yokogawa 公司产的型号为 AQ6370B 的光谱仪 (OSA) 对实验所采用的 45° TFG

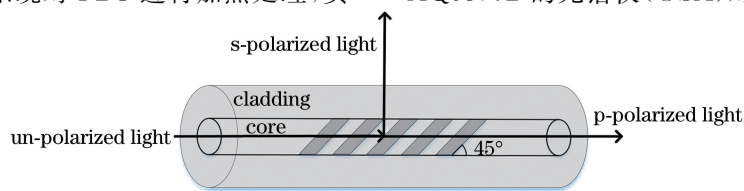


图 1 45° TFG 结构示意图

Fig. 1 Diagram of 45° TFG

的 PDL 和插入损耗进行测量,测量结果如图 2 所示。由图 2(a)可知,45°TFG 的 PDL 与波长相关,最高可达 30 dB,在 1060~1070 nm 波长范围内的 PDL 始终高于 20 dB。由图 2(b)可知,45°TFG 的插入损耗在 1064~1068 nm 波长范围内低于 4.3 dB。不难发现,图 2(a)中 PDL 曲线呈现波纹状的抖动。造成这种抖动的原因如下:当光透过 45°

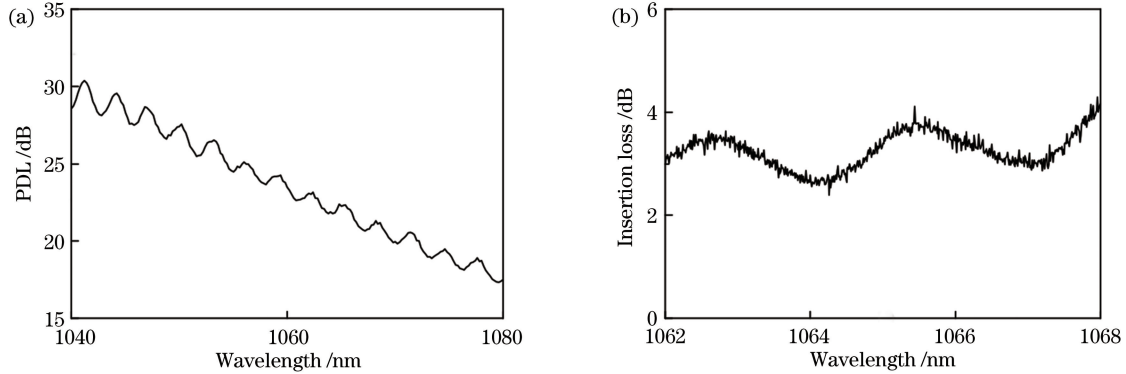


图 2 45°TFG 的光谱特性。(a)偏振相关损耗谱;(b)插入损耗谱

Fig. 2 Spectral characteristics of 45°TFG. (a) PDL spectrum; (b) insertion loss spectrum

FBG 作为一种特殊的短周期光栅,由于其反射特性和窄线宽特性,通常在激光器中充当窄带滤波器^[30-33],滤波器的通带为 FBG 的反射带宽,滤波器的可调谐性取决于 FBG 反射波长随温度或应力的可调谐性。根据 FBG 的耦合模式理论,FBG 的反射波长可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda_{\text{GRAT}} = n_{\text{eff}}\Lambda_{\text{PM}}, \quad (1)$$

式中: λ_B 为 FBG 反射波长; n_{eff} 为纤芯折射率; Λ_{GRAT} 为光栅调制周期; Λ_{PM} 为相位掩模板周期。只考虑温度对 FBG 反射波长的影响,且不考虑温度与应力的耦合作用,FBG 的反射波长与温度的关系可表示为

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = K_T\lambda_B, \quad (2)$$

式中: $d\lambda_B$ 为反射波长变化量; dT 为温度变化量; $K_T = \alpha + \xi$ 为温度灵敏系数, $K_T\lambda_B$ 为温度灵敏度, α 为热膨胀系数, ξ 为热光系数。实验中刻写 FBG 所用的相位掩模板的周期为 761 nm,单模光纤折射率约为 1.4,由(1)式估算得到 FBG 的反射波长为 1065.4 nm。对于纯石英光纤,热膨胀系数 α 约为 $0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,热光系数 ξ 约为 $6.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,由(2)式估算得到反射波长为 1065.4 nm 的 FBG 的温度灵敏度为 7.8 pm/°C。需要说明的是,由于光栅刻写的方式和退火的方式不同,FBG 的反射波长和温度灵敏度实际值也会有所偏差。

TFG 时,s 光将以辐射模的形式从纤芯耦合出去,且其传播方向与光纤轴垂直;然而,普通光纤的包层是有限的,部分辐射模将从包层和空气的边界反射回纤芯和包层的边界,从而形成谐振^[29]。需要说明的是,这种抖动并不影响光栅的特性和激光器的性能,可通过将光栅浸入与包层折射率匹配的凝胶或放入热收缩聚合物管中来消除抖动。

实验中借助一台工作于 1 μm 波段的 BBS、一台 OSA(AQ6370B, Yokogawa, 日本)及环形器测量了 FBG 的传输谱,测量结果如图 3(a)所示。由图 3(a)可知,FBG 的反射波长为 1065.9 nm,3 dB 带宽为 0.08 nm。为了研究 FBG 的反射波长与温度的关系,采用实验室自制的温控装置对 FBG 进行加热处理,温度每上升 10 °C 记录下 FBG 的反射波长,对得到的数据进行拟合,结果如图 3(b)所示。由图 3(b)可知,FBG 的反射波长与温度具有良好的线性关系,温度灵敏度为 8 pm/°C,与前面理论计算的结果大致符合。

3 光纤激光器的实验装置与 PER 测量装置

基于上述两种光栅器件,搭建了线性腔结构的可调谐线偏振掺镱光纤激光器,其装置示意图如图 4 所示。线性腔总长度约为 11 m,掺镱光纤(Yb1200-4/125, 恩耐激光技术有限公司,上海)长度为 30 cm。使用了一台最大输出功率为 600 mW 的 980 nm 的台式激光器作为泵浦源(TSLD1100, 光谷互连科技有限公司,武汉),通过一个 980/1060 的波分复用器(WDM)将泵浦光耦合进谐振腔内。45°TFG 在激光器中充当起偏器,以实现高偏振度激光输出。FBG 在激光器中充当窄带滤波器,以实现激光器的单波长工作。实验用到了一个 2×2 的

10:90 的光纤耦合器(OC),以 90%端口作为输入,10%端口作为输出,另外两端相连接以构成 Sagnac 环。Sagnac 环的总长度为 2 m,在激光器中充当反射镜。Sagnac 环中添加两个偏振控制器(PC)用来调节 Sagnac 环中频率相同、传播方向相反的两路光的偏振方向,以减弱由这两路光干涉带来的光谱谐振。将一个工作于 1 μm 波段的偏振无关隔离器

(PI-ISO)用于保证输出端激光的单向传输。

测量 PER 的实验装置已在图 4 中用虚线框标注出来,PC3 接在激光器的输出端,用于改变输出线偏振光的振动方向,一个商用起偏器与 PC3 相连以充当检偏器。输出激光的光谱用一台 OSA 记录,输出激光的功率由一台数字光功率计(AQ2160-02, Yokogawa, 日本)测量。

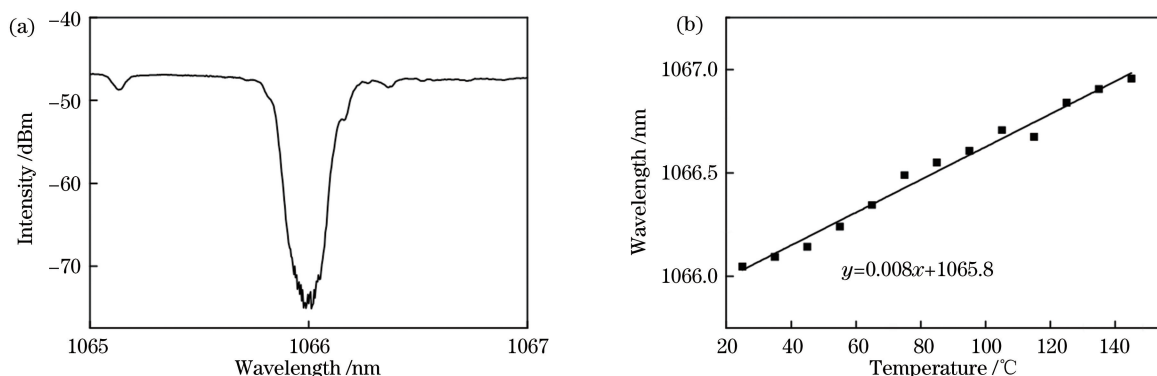


图 3 FBG 的传输谱及温度灵敏度拟合曲线。(a)传输谱;(b)温度灵敏度拟合曲线

Fig. 3 Transmission spectrum and temperature sensitivity fitting curve of FBG. (a) Transmission spectrum; (b) temperature sensitivity fitting curve

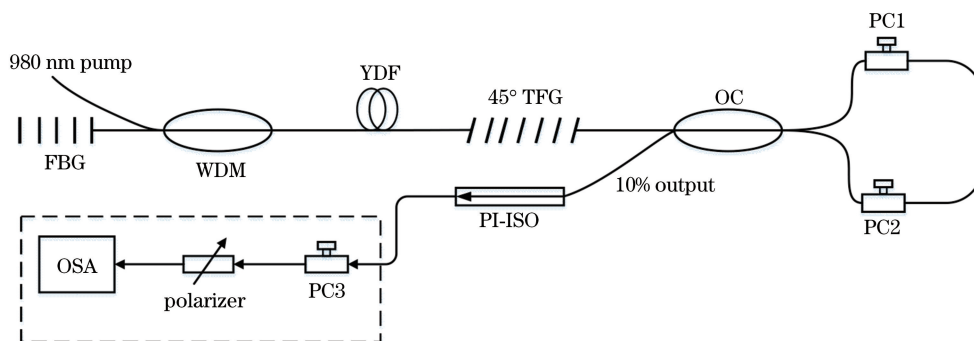


图 4 波长可调谐线偏振掺镱光纤激光器装置示意图

Fig. 4 Schematic of wavelength tunable linearly polarized Yb-doped laser

4 实验结果与讨论

图 5(a)记录了泵浦功率为阈值功率时激光器的输出光谱。由图 5(a)可知,输出激光的信噪比在 50 dB 以上,光谱的中心波长为 1065.9 nm,3 dB 带宽为 0.03 nm。光谱的中心波长与 FBG 的反射波长相同,表明 FBG 在激光器中所起作用与窄带滤波器相同,通过改变 FBG 的反射波长即可实现激光器中心波长的调谐。调节 PC3 以改变输出线偏振光的振动方向,当振动方向和检偏器偏振化方向平行时可以得到最大透射光强,当振动方向和检偏器偏振化方向垂直时可以得到最小透射光强。用光谱仪记录下最大和最小透过光强时激光器的输出光谱,如图 5(b)所示,两者作差即可得到输出激光的

PER。由图 5(b)可知,输出激光的 PER 大于 35 dB,输出激光的偏振度达到了 99.9%,表明输出激光几乎为线偏振光。实验中如果将 45°TFG 取下,将 YDF 直接与 OC 的 90%输入端相连,测量得到的激光器的偏振度仅为 19.6%,表明 45°TFG 的引入明显地改善了输出激光的偏振度。为了检测输出线偏振光的稳定性,在 4 h 内每隔 30 min 对输出激光的 PER 进行测量,结果如图 5(c)所示,PER 的波动小于 2 dB,表明输出的线偏振光具有良好的环境稳定性。激光器的阈值功率为 36 mW,为了检测激光器输出功率的稳定性,实验测量了不同泵浦功率下激光器的输出功率,并对得到的数据进行拟合,结果如图 5(d)所示,激光器的斜率效率为 28.8%;在泵浦功率为 330 mW 时每隔 30 min 对输出激光

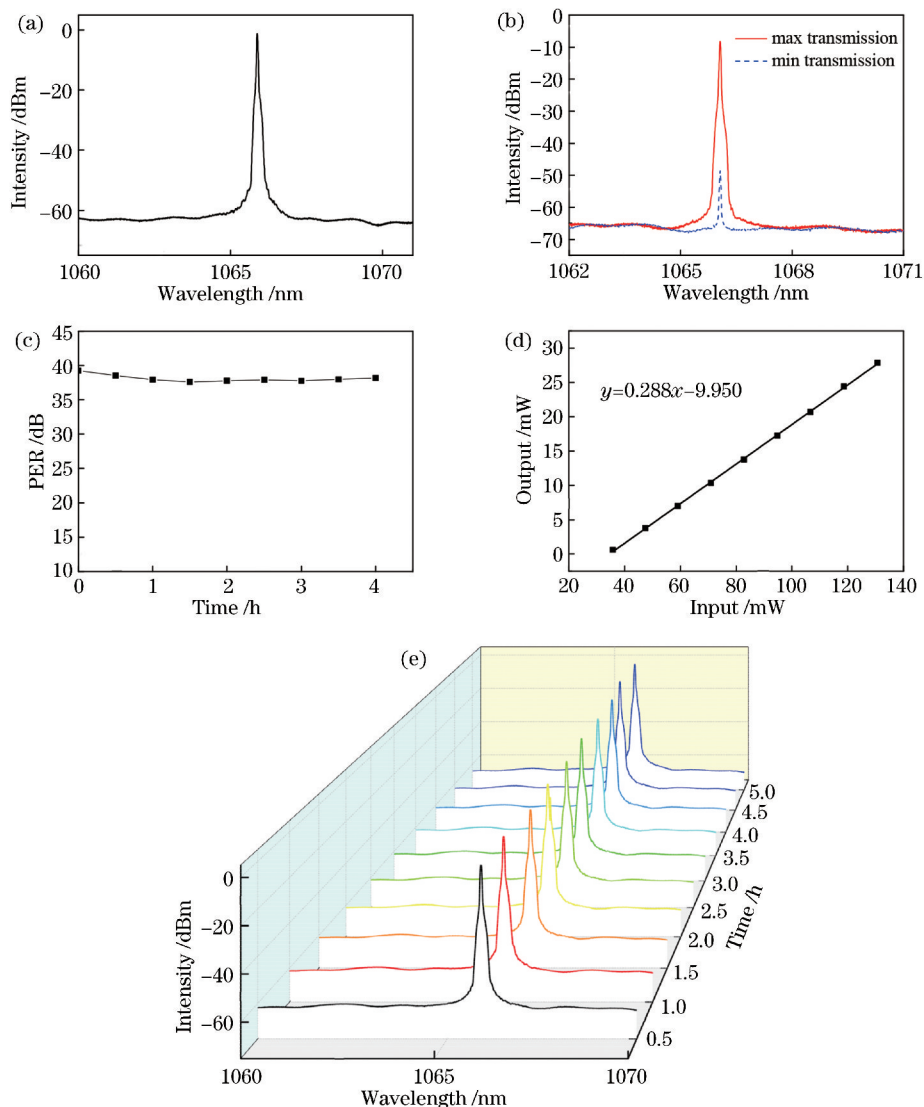


图 5 线性腔激光器输出激光特性。(a)输出光谱;(b) PER 传输谱;(c) PER 稳定性;(d)斜率效率;(e)输出光谱稳定性
 Fig. 5 Output laser performances of linear fiber laser. (a) Output spectrum; (b) PER transmission spectra;
 (c) PER stability; (d) slope efficiency; (e) output spectral stability

光谱进行测量,结果如图 5(e)所示,表明输出激光功率在 5 h 内具有良好的稳定性。

为验证线性腔结构的线偏振光纤激光器在阈值功率和斜率效率上的优越性,进行了激光器的谐振腔结构对比实验。本文使用同样的实验器件搭建了环形腔结构的线偏振掺镱光纤激光器,其结构示意图如图 6 所示。需要说明的是,图 6 中用于接入 FBG 的环形器(circulator)所带来的插入损耗(约为 3.11 dB)会在一定程度上降低该环形腔激光器的斜率效率,但并不会对实验结果造成实质性的影响。图 7 所示为记录的环形腔结构激光器的 PER 传输谱及斜率效率拟合曲线,由于使用的是相同的 45° TFG,实验得到的环形腔结构的线偏振掺镱光纤激光器的 PER 和线性腔的几乎相同,但阈值功率为

71 mW,斜率效率仅为 1.5%。这是因为环形腔为单向传输结构,激光在谐振腔内传输一周只经过一次增益光纤,而线性腔为双向传输结构,激光在谐振腔内传输一周经过两次增益光纤。因此,在实验器件相同、损耗基本相同的条件下,线性腔结构比环形腔结构具有更大的增益,在泵浦功率较低时更容易形成激光。

在实现线偏振激光输出的基础上,采用实验室自制的温控系统对 FBG 进行加热处理,研究 FBG 的温度对输出激光中心波长的影响,得到了激光器输出光谱随 FBG 反射波长变化的调谐图,如图 8(a)所示。从 25 °C 加热到 145 °C 的过程中,观察到输出激光的中心波长从 1065.9 nm 向长波方向连续调谐至 1066.9 nm。此外,控制 FBG 温度由 145 °C 下降

至 25 °C 的过程中,观察到输出激光的中心波长从 1066.9 nm 向短波方向连续调谐至 1065.9 nm,表明这种调谐是可逆的。从图 8(a)中观察到调谐过程中输出激光的幅度有 1 dB~2 dB 的微小浮动,这可能是由温控过程中 FBG 反射率的细微改变引起的。在温度改变 120 °C 的条件下实现了 1 nm 范围的波长可调谐,与之前测得的 FBG 的温度灵敏度 8 pm/°C 相符合。实验中若采用温度灵敏度更低的 FBG 将有望实现更高精度的波长调谐,若采用温度灵敏度更高的 FBG 将有助于实现更宽范围的波长调谐。

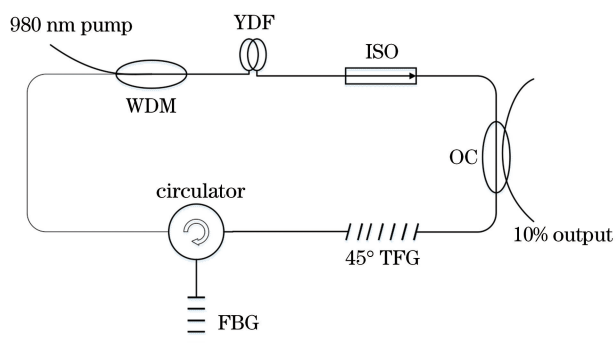


图 6 环型谐振腔结构示意图

Fig. 6 Schematic configuration of ring resonator

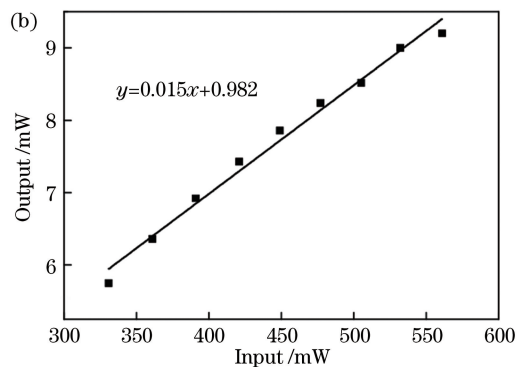
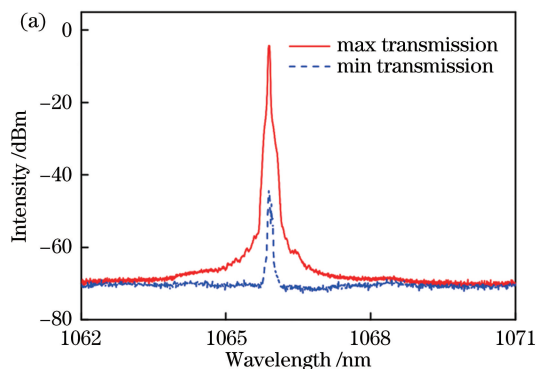


图 7 环形腔结构激光器输出激光特性。(a) PER 传输谱;(b)斜率效率

Fig. 7 Output laser performances of ring laser. (a) PER transmission spectra; (b) slope efficiency

在 25~145 °C 范围内,选取 8 个温度值对输出激光的 PER 进行测量,结果如图 8(b)所示。由图 8(b)可知,输出激光的 PER 均保持在 30 dB 以上,偏振度高于 99.9%,这表明波长调谐对输出激光的偏振度影响不大。图 8 (b)中输出激光的 PER 在温度升高时有略微下降的趋势,原因如下:在升温过程中,输出激光的波长在 1065~1067 nm 区间内逐渐向长波方向飘移,而 45° TFG 的 PDL 是波长相关的,且由图 2(a)可知,在 1065~1067 nm 区间内 45°

TFG 的 PDL 数值逐渐减小,这可能导致输出激光的 PER 数值减小。需要说明的是,图 2(a)中 1 nm 范围内 45° TFG 的 PDL 数值的改变量仅为 2 dB~3 dB,这种程度的 PDL 数值降低所带来的输出激光的 PER 下降是微不足道的^[28],因此图 8(b)中 PER 的下降趋势比较微弱,输出激光的偏振度仍可达到 99.9%。实验中若控制 FBG 的温度降低并稳定至室温 25 °C,输出激光的 PER 可以回到 35 dB 以上,这与波长调谐过程的可逆性是相符合的。

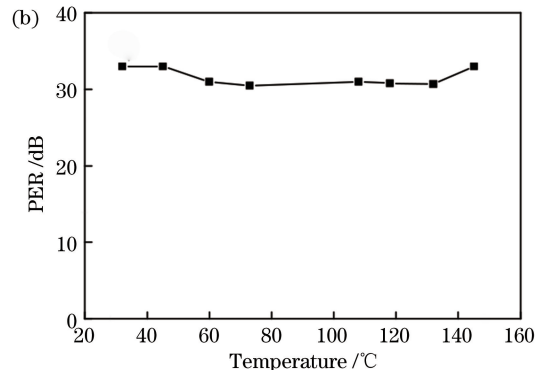
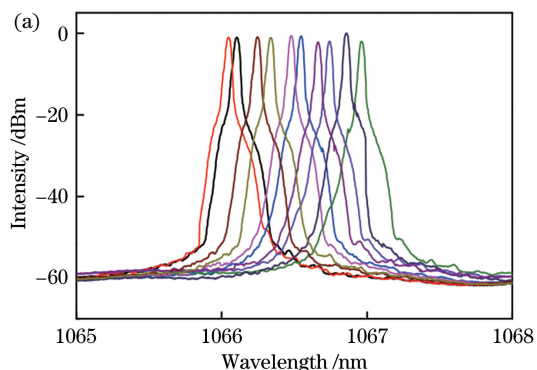


图 8 温控状态下光谱中心波长调谐曲线以及 PER 稳定性测量。(a)波长调谐曲线;(b) PER 稳定性测量

Fig. 8 Output wavelength tuning curves and PER stability under temperature-controlled condition.

(a) Output wavelength tuning curves; (b) PER stability measurement

5 结 论

利用 45° TFG 作为起偏器, 实现了 PER 高于 35 dB 的单偏振激光输出, 在 4 h 内激光器 PER 的抖动小于 2 dB。利用 FBG 作为窄带滤波器, 实现了激光器的单波长输出, 输出光谱的 3 dB 带宽为 0.03 nm。通过对 FBG 进行加热处理, 实现了范围为 1 nm 的波长连续可调谐, 在调谐状态下输出激光的 PER 保持在 30 dB 以上。实验所使用的 FBG 温度灵敏度为 $8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 若使用温度灵敏度更高的 FBG 则有望实现更宽范围的波长可调谐。

参 考 文 献

- [1] Liu H F, Feng L S, Jiao H C. Influence of laser polarization characteristic on performance of resonator fiber optic gyro [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(2): 161-165.
刘怀锋, 冯丽爽, 焦洪臣. 激光器偏振特性对谐振式光纤陀螺性能的影响 [J]. *半导体光电*, 2019, 40(2): 161-165.
- [2] Zhou P, Huang L, Xu J M, et al. High power linearly polarized fiber laser: generation, manipulation and application [J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60(12): 1784-1800.
- [3] Zhang B, Jin A J, Ma P F, et al. High-power near-infrared linearly-polarized supercontinuum generation in a polarization-maintaining Yb-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 28683-28690.
- [4] Hädrich S, Krebs M, Hoffmann A, et al. Direct and efficient high harmonic generation at 10 MHz repetition rate [C]//2015 European Conference on Lasers and Electro-Optics-European Quantum Electronics Conference, June 21-25, 2015, Munich, Germany. Washington, D. C.: OSA, 2015: CG_2_5.
- [5] Liu X, Du S T, Zhou J, et al. Linearly polarized operation of Yb-doped fiber laser by Brewster's angle-polished fiber end [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(2): 184-186.
- [6] Zlobina E A, Kablukov S I, Babin S A. Linearly polarized random fiber laser with ultimate efficiency [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 4074-4077.
- [7] Feng S C, Peng J, Peng W J, et al. Single-polarization, single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser based on twisting of polarization-maintaining fiber Bragg gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0102002.
冯素春, 彭健, 彭万敬, 等. 基于扭绞保偏光纤光栅的单纵模单偏振掺铒光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0102002.
- [8] Zhou K M, Simpson G, Chen X F, et al. High extinction ratio in-fiber polarizers based on 45° tilted fiber Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(11): 1285-1287.
- [9] Wang T X, Yan Z J, Mou C B, et al. Stable nanosecond passively Q-switched all-fiber erbium-doped laser with a 45° tilted fiber grating [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3583-3588.
- [10] Sun Z Y, Yan Z J, Mou C B, et al. All-fiber loading sensor based on a hybrid 45° and 81° tilted fiber grating structure [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(2): 343-348.
- [11] Zou C H, Wang T X, Yan Z J, et al. Wavelength-tunable passively mode-locked erbium-doped fiber laser based on carbon nanotube and a 45° tilted fiber grating [J]. *Optics Communications*, 2018, 406: 151-157.
- [12] Fu S G, Liu X J, Wei G X, et al. Polarization ytterbium-doped fiber laser based on 45° tilted fiber grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 0806003.
付圣贵, 刘晓娟, 魏功祥, 等. 基于 45° 倾斜光纤光栅的线偏振输出掺镱光纤激光器 [J]. *光子学报*, 2014, 43(8): 0806003.
- [13] Cheng X P, Zhou J Q, Shum P, et al. Tunable single polarization Yb³⁺-doped fiber ring laser by using intracavity tilted fiber Bragg grating [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7134: 71342V.
- [14] Mou C B, Yan Z J, Zhou K M, et al. Erbium doped fiber lasers based on 45° tilted fiber gratings [C]//2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE, 2017: 17466206.
- [15] Huang L, Shi C, Wang X L, et al. 100 W level all-fiber linear-polarization laser oscillator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0402005.
黄龙, 史尘, 王小林, 等. 百瓦级全光纤线偏振激光振荡器 [J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0402005.
- [16] Lu Q, Ma J D, Duan D, et al. Reducing the pulse repetition rate of picosecond dissipative soliton passively mode-locked fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2809-2816.
- [17] Lau K Y, Ng E K, Abu Bakar M H, et al. Low threshold linear cavity mode-locked fiber laser using microfiber-based carbon nanotube saturable absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 102: 240-246.
- [18] Zhang M, Zhong X S, Zheng W J, et al. Widely tunable, high optical signal-to-noise ratio erbium-

- doped photonic crystal fiber laser suitable for acetylene sensing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 109: 525-533.
- [19] de Young R J, Barnes N P. Profiling atmospheric water vapor using a fiber laser lidar system [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(4): 562-567.
- [20] Chamorovskiy A, Shramenko M V, Lobintsov A A, et al. Narrow linewidth broadband tunable semiconductor laser at 840 nm with dual acousto-optic tunable configuration for OCT applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9697: 96972T.
- [21] Guo T, Qiao X G, Jia Z N, et al. Simultaneous measurement of temperature and pressure by a single fiber Bragg grating with a broadened reflection spectrum [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(13): 2935-2939.
- [22] Yan Z J, Zhou K M, Zhang L. In-fiber linear polarizer based on UV-inscribed 45° tilted grating in polarization maintaining fiber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3819-3821.
- [23] Song Y W, Havstad S A, Starodubov D, et al. 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(11): 1167-1169.
- [24] Goh C S, Mokhtar M R, Butler S A, et al. Wavelength tuning of fiber Bragg gratings over 90 nm using a simple tuning package [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(4): 557-559.
- [25] Xue Y Z, Wang X F, Luo M M, et al. Review of regenerated fiber Bragg grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020007.
薛渊泽, 王学锋, 罗明明, 等. 再生光纤布拉格光栅的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020007.
- [26] Liao C R, He J, Wang Y P. Study on high temperature sensors based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328009.
廖常锐, 何俊, 王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328009.
- [27] Wei H W, Xu N. High sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor [J]. *Optical Communication Technology*, 2019, 43(5): 1-4.
魏昊文, 徐宁. 高灵敏度布喇格光纤光栅温度传感器 [J]. *光通信技术*, 2019, 43(5): 1-4.
- [28] Mou C B, Zhou K M, Zhang L, et al. Characterization of 45°-tilted fiber grating and its polarization function in fiber ring laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(10): 1905-1911.
- [29] Mou C B, Wang H, Bale B G, et al. All-fiber passively mode-locked femtosecond laser using a 45°-tilted fiber grating polarization element [J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18906-18911.
- [30] Li J, Wang J, Jiang W W, et al. Tunable erbium doped fiber ring laser using fiber Bragg grating-assisted add-drop filter [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(15): 3136-3139.
- [31] Rodriguez-Cobo L, Angeles Quintela M, Menezo P, et al. Study of fiber Bragg grating spectral overlapping for laser structures [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(11): 1108-1111.
- [32] Wu L Y, Pei L, Ning T G, et al. Polarization-independent, ultra-narrow band-pass and multi-wavelength tunable filter based on PS-PM-CFBG [J]. *Optics Communications*, 2019, 443: 55-62.
- [33] Fan Z J, Zeng X D, Cao C Q, et al. Novel structure of an ultra-narrow-bandwidth fibre laser based on cascade filters: PGFBG and SA [J]. *Optics Communications*, 2016, 368: 150-154.