

基于偏振依赖多模-单模-多模光纤滤波器的波长间隔可调谐双波长掺铒光纤激光器

彭万敬 刘鹏

Continuously spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on polarization-dependent in-line multimode-single-mode-multimode fiber filter

Peng Wan-Jing Liu Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 154202 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190297

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190297>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于增益光纤长度优化的双波长运转掺铒光纤锁模激光器

Dual-wavelength mode-locked Er-doped fiber laser based on optimizing gain fiber length

物理学报. 2017, 66(13): 134203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.134203>

基于光纤叠栅的全光纤声光可调谐滤波器的特性分析

Analysis of all fiber acousto-optic tunable filter based on superimposed fiber Bragg gratings

物理学报. 2015, 64(17): 174207 <https://doi.org/10.7498/aps.64.174207>

滤波对8字腔掺铒光纤激光器锁模运转的影响

Influence of spectral filtering on mode-locking operation of figure-eight Er-doped fiber laser

物理学报. 2019, 68(6): 064206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182144>

超长腔碳纳米管锁模多波长掺铒光纤激光器

Ultra-long cavity multi-wavelength Yb-doped fiber laser mode-locked by carbon nanotubes

物理学报. 2015, 64(20): 204205 <https://doi.org/10.7498/aps.64.204205>

高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器

High-repetition-rate passively mode-locked erbium-doped all fiber laser

物理学报. 2015, 64(6): 064206 <https://doi.org/10.7498/aps.64.064206>

利用啁啾脉冲光谱滤波和非线性偏振旋转技术实现高稳定性和开机自启动的全光纤掺Yb³⁺光纤锁模激光器

Highly stable and self-started all-fiber Yb³⁺ doped fiber laser mode-locked by chirped pulse spectral filtering and nonlinear polarization evolution

物理学报. 2016, 65(21): 214207 <https://doi.org/10.7498/aps.65.214207>

基于偏振依赖多模-单模-多模光纤滤波器的波长间隔可调谐双波长掺铒光纤激光器*

彭万敬¹⁾ 刘鹏^{2)†}

1) (中国工程物理研究院应用电子学研究所, 高能激光科学与技术重点实验室, 绵阳 621900)

2) (邢台学院物理与电子工程学院, 邢台 054001)

(2019年3月4日收到; 2019年5月5日收到修改稿)

报道了一种具有全光纤结构的双波长掺铒光纤激光器, 该激光器的核心器件为一款新型的多模-单模-多模光纤干涉滤波器. 该滤波器通过一段偏振保持光纤引入偏振依赖相位差, 因而其干涉滤波效果具有良好的偏振依赖特性. 入射抽运功率为 50 mW 时, 系统输出激光波长为 1544.82 与 1545.61 nm, 波长间隔 0.8 nm, 双波长激光边模抑制比均大于 45 dB, 输出峰值功率差小于 1 dB, 功率波动在 0.7 dB 以内. 通过调整腔内的偏振控制器, 可实现双波长间隔的连续可调谐输出, 波长间隔的调谐范围为 0—3 nm. 输出信号的偏振态测试结果显示, 系统保持精准的单偏振输出, 并且在不同的调谐条件下, 双波长激光表现出不同的偏振特性, 当双波长激光的偏振状态相互正交时, 系统的偏振消光比达到 35 dB, 整体调谐过程表现出良好的偏振稳定度.

关键词: 光纤激光器, 光纤干涉滤波器, 双波长, 连续可调谐

PACS: 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.60.Fc

DOI: 10.7498/aps.68.20190297

1 引言

光纤激光器自诞生以来便凭借其特有的窄线宽、高信噪比、结构紧凑、散热性好等优点而快速得到市场的认可^[1,2]. 其中, 双波长掺铒光纤激光器由于在毫米波生成、光纤传感、高精度干涉测量、波分复用通信系统以及高分辨率光谱学等领域的应用而受到越来越多的研究者的重视^[3-6]. 由于掺铒光纤所固有的均匀展宽特性极易导致模式竞争^[7], 因此要想获得室温下稳定的双波长掺铒光纤激光输出比较困难. 为此, 人们相继提出了多种双波长掺铒光纤激光器的实现方案. 目前, 在谐振腔中引入滤波器件是人们常用的方法, 常见的滤波器件包括保偏光纤光栅^[8,9]、级联光纤光栅^[10]、重叠光

纤光栅^[11-13]、基于光纤光栅的塞格纳克干涉仪^[14]、法布里-珀罗滤波器^[15,16]、马赫-曾德尔干涉仪^[17,18]等. 在上述双波长掺铒光纤激光器的实现方案中, 大多数输出的双波长是固定的, 少数几种方案可支持几种不同的双波长输出, 但每一种的波长间隔也是固定的. 近年来, 由于具有波长间隔连续可调谐特性的双波长掺铒光纤激光器在毫米波生成、微波光子滤波器以及多参量激光传感等焦点领域具有广阔的应用前景, 使得该环节的研究成为热点. 目前已提出了一些实现方案, 诸如: 引入两个独立的可调带通滤波器实现对光源纵模输出的选择^[19], 借助温度或应力实现对谐振腔中光纤光栅中心波长的调谐^[20-23], 借助体光栅实现波长间隔的可调谐^[24], 利用马赫-曾德尔干涉仪的声光效应实现调谐控制^[25]等.

* 中国工程物理研究院研究基金 (批准号: TCGH1001-02)、河北省高等学校科学技术研究重点项目 (批准号: ZD2017305) 和河北省科技计划项目 (批准号: 16210411) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liupeng1974@163.com

上述几种方案在实施过程中通常需要借助温度或应力对谐振腔内的滤波器件进行调谐, 而这些过程一方面会增加操作的难度, 另一方面所需附加的分立元件会加大腔内损耗, 使得系统的复杂度加大, 不利于系统集成.

本文提出了一种新型的双波长掺铒光纤激光器设计方案, 该方案可实现波长间隔连续可调谐的双波长激光输出, 该激光器的核心器件为偏振多模-单模-多模 (polarization-maintaining multimode-single-mode-multimode, PD-MSM) 光纤滤波器, 具有全光纤结构, 无需其他分立光学元件, 无需附加温度或应力调节, 连续调谐过程仅需通过对腔内信号的偏振态控制即可实现, 连续间隔可调谐范围达到 3 nm, 调谐过程中双波长信号均保持稳定单偏振输出, 功率稳定, 易于系统集成.

2 PD-MSM 光纤干涉滤波器

如图 1 所示, PD-MSM 光纤滤波器主要由两段完全相同的多模光纤 (multimode fiber, MMF) 与一段偏振保持光纤 (polarization-maintaining fiber, PMF) 组成. 多模光纤两端熔接有普通单模光纤 (single-mode fiber, SMF), 构成两个全同的单模-多模-单模 (single-mode-multimode-single-mode, SMS) 光纤模式转换器, 左侧的 SMS 模式转换器外侧 SMF 负责信号光导入 (Lead-in), 右侧的 SMS 模式转换器外侧 SMF 负责信号光导出 (Lead-out), 位于中间的 PMF 通过与两个模式转换器内侧的 SMF 熔接后构成完整的光纤滤波器.

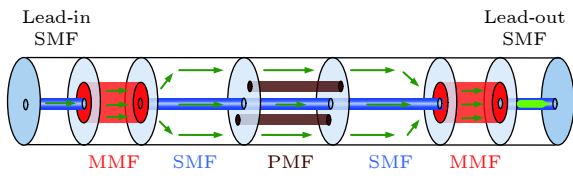


图 1 PD-MSM 光纤滤波器结构示意图
Fig. 1. Structure of PD-MSM filter.

PD-MSM 光纤滤波器的工作原理源自传输中纤芯模式与包层模式之间的干涉作用. 两个全同的模式转换器分别用于模分器与合模器的功能, 左侧的模式转换器负责将 Lead-in SMF 纤芯中的单模信号激发为 MMF 纤芯中的多模信号, 右侧的模式转换器负责将 MMF 纤芯中的多模信号耦合至

Lead-out SMF 纤芯中以单模方式输出. 两段 MMF 之间的 SMF 与 PMF 除去涂覆, 信号光以纤芯模式与包层模式同时传输, 构成干涉滤波的基础, 同时由于 PMF 引入的双折射, 使得光纤滤波器整体具有偏振依赖特性.

图 2 为五种不同的 SMS 模式转换器的模式激发比例 (分别对应 5 种不同的 MMF 长度). 由于 SMF 与 MMF 是对轴熔接的, 且 SMF 基模具有圆对称性, 因而 MMF 中耦合激发的模式主要是 LP_{0n} 模, 图 2 中取前 12 阶 LP_{0n} 模. η 为模式转换器中起始由 SMF 输入的 LP_{01} 模到输出激发模式 LP_{0n} 模的归一化激发系数, $|\eta|^2$ 为对应的归一化功率系数. 实验中所用 MMF 数值孔径为 0.20, 芯包直径为 49/125 μm ; 所用 SMF 数值孔径为 0.13, 芯包直径为 8.2/125 μm . 由于测试中光纤长度的截取精度在 0.1 mm 以内, 因此这里选取的 MMF 对比长度为 1.1—1.5 mm. 由图 2 可见, 在保持纤芯 LP_{01} 模式具有较高激发比的情况下, MMF 长度为 1.3 mm 时模式转换器所激发的 LP_{02} 模式和 LP_{03} 模式达到最大, 此时 LP_{03} 与 LP_{01} 模式的激发比最为接近并明显高于其他所有模式. 当模式转换器内 SMF 中的 LP_{01} 模和所激发的某一个包层模的激发比数倍高于其他模式时, 整个 MSM 光纤滤波器近似于一个双臂马赫-曾德尔滤波器, 因而具有较均匀的透射谱.

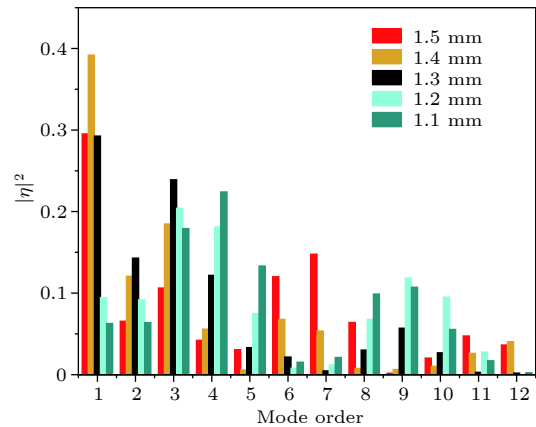


图 2 五种不同 SMS 模式转换器的前 12 阶 LP_{0n} 模式激发系数
Fig. 2. Normalized excitation coefficients of the first 12 LP_{0n} modes with five different SMS mode converters.

图 3 给出了以上模式转换器构成的 MSM 光纤滤波器透射谱的傅里叶空间频谱, 模式转换器之间的光纤长度为 58 mm. 为方便对比, 图 3 中嵌入

了两种 MSM 光纤滤波器的透射谱, 左上图为采用 1.5 mm 长 MMF 的模式转换器构成的 MSM 光纤滤波器的透射谱, 右下图为采用 1.3 mm 长 MMF 的模式转换器构成的 MSM 滤波器的透射

谱. 由图 3 可以看出, 采用 1.3 mm 长度 MMF 的模式转换器构成的 MSM 光纤滤波器具有更均匀的透射谱周期, 这有利于达到 PD-MSM 制作的光谱一致性.

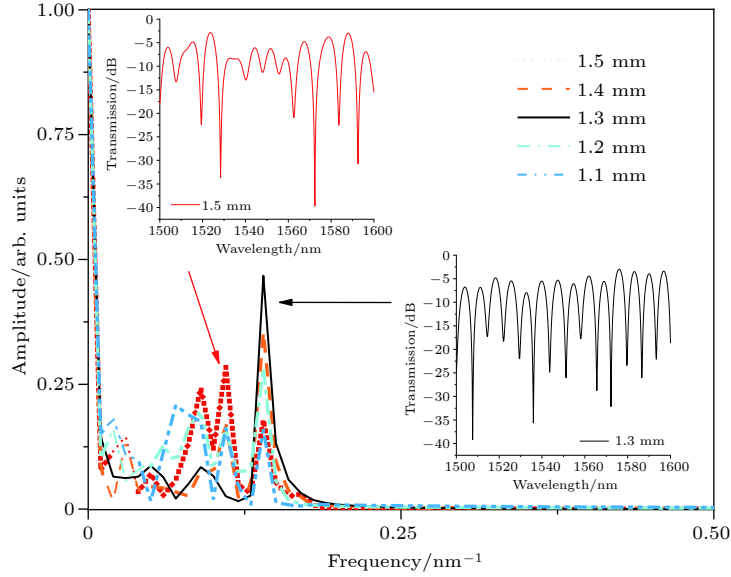


图 3 MSM 滤波器的空间频谱

Fig. 3. Spatial frequency spectra of MSM filter.

如图 1 所示, PD-MSM 结构中插入一段实验室自制的 PMF, 纤芯双折射 B_0 为 6.8×10^{-4} , 其在结构与折射率分布方面与 SMF 光纤一致, 两者之间的模式耦合很弱, 可以不予考虑. 由于 PMF 自带的双折射效应, 使得快慢轴方向 (x, y 方向) 上的光存在一个长度相关相移 $\Delta\phi$. 当近似于一个双臂马赫-曾德尔滤波器时, PD-MSM 的 x 或 y 方向上的透射光谱为

$$T_s = \left| \sum_n \eta_n^2 \cdot \exp(j\beta_n L_{SMF} + j\beta_{n,s} L_{PMF}) \right|^2 \approx |\eta_1|^4 + |\eta_v|^4 + 2|\eta_1 \eta_v|^2 \cos(j\phi_s), \quad (1)$$

其中 $s = x$ 或 y , η_n 为模式转换器中由 Lead-in SMF 中的 LP_{01} 模激发到 SMF 中的 LP_{0n} 圆对称包层模的激发系数, β_n 与 $\beta_{n,s}$ 分别为 LP_{0n} 模在 SMF 和 PMF 中的传播常数, L_{SMF} 与 L_{PMF} 分别为 PD-MSM 两段 MMF 之间 SMF 的总长度和 PMF 的长度.

当 $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$ 为 π 时, PD-MSM 滤波器在 x 方向的透射谱峰值刚好对应 y 方向的谷值, 即仅 x 偏振光能够高透, 反之亦然. 因此 PD-MSM 滤波器对于特定波段具有起偏作用, 在此条件下

PMF 的长度应满足:

$$L_{PMF} = \frac{\pi}{(\Delta\beta_{v,y} - \Delta\beta_{v,x})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{|B_0 - B_v|}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\beta_{v,y}$ 和 $\Delta\beta_{v,x}$ 分别为 PMF 中 LP_{0v} 模在 x, y 方向的传播常数差, B_v 为 PMF 中激发的主要特征包层模式的双折射. 由此可见, PD-MSM 滤波器中 PMF 的长度取值 L_{PMF} 与两端 MMF 之间的间距无关, 仅与特征传输模式的双折射有关. 由于在 PMF 中, 包层模式的双折射无法通过有限差分束传播法直接计算得到, 因而在实验中通过直接测试长度为 l_s 的 PMF 对光谱偏移 $\Delta\lambda$ 的贡献 ($L_{PMF} = l_s \cdot FSR/\Delta\lambda$) 确定 PMF 的长度取值, 计算得到 L_{PMF} 为 1.5 mm, 对应以上模式转换器激发的特征包层模式的双折射 B_v 为 1.63×10^{-4} . 图 4 所示为光纤激光器实验中所用 PD-MSM 滤波器单偏振态下的透射谱, SOP1 与 SOP2 分别对应 x 偏振态和 y 偏振态 (states of polarization, SOP), 相应的自由谱域 (free spectral range, FSR) 在 6.3 nm 左右. 所用 PMF 长度 1.5 mm, 两段 MMF 长度均为 1.3 mm, MMF 间距 58 mm.

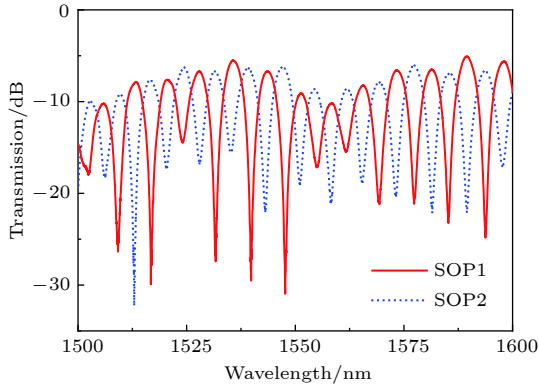


图 4 PD-MSM 光纤滤波器透射谱
Fig. 4. Transmission spectra of the PD-MSM filter.

3 实验方案

图 5 为所设计的双波长掺铒光纤激光器结构示意图. 采用环形腔结构, 腔内 PD-MSM 光纤滤波器提供滤波功能, 并确保信号的偏振依赖特性; 980 nm 抽运光 (pump) 通过波分复用器 (wavelength division multiplexer, WDM) 注入环形腔; 掺铒单模光纤 (erbium-doped fiber, EDF) 提供 C 波段光信号的增益; 光纤偏振控制器 (polarization controller, PC) 对腔内信号的偏振态提供连续控制; C 波段光纤隔离器 (isolator, ISO) 确保激光信号在环形腔内的单向传输; 环形腔内的激光通过一个 9 : 1 的单模光纤耦合器 (optical coupler, OC) 输出; 输出信号由 YOKOGAWA™ 公司

AQ6375 型光谱分析仪 (optical spectrum analyzer, OSA) 进行测量, OSA 的分辨率为 0.05 nm.

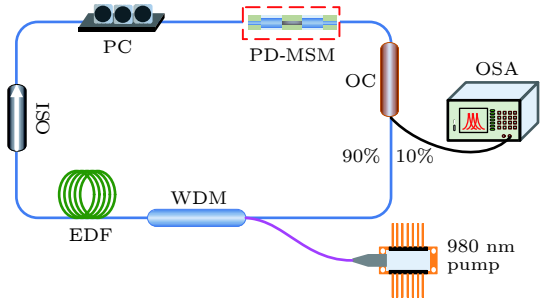


图 5 间隔可调双波长掺铒光纤激光器结构示意图
Fig. 5. Schematic setup of the proposed continuously spacing-tunable dual-wavelength EDFL.

4 实验结果与分析

图 6 为稳定输出时的双波长掺铒光纤激光器输出光谱图, 此时的注入抽运功率为 50 mW (阈值功率为 20 mW). 在 PC 的调节下, 谐振腔内各波长的增益得到合理控制, 实现系统稳定的双波长激光, 输出波长分别为 1544.82 与 1545.61 nm, 波长间隔为 0.8 nm, 相应的边模抑制比均高于 45 dB, 同时双波长信号的峰值功率差控制在 1 dB 以内 (图 6(a)). 连续测试 (测试时间: 50 min, 测试次数: 10 次) 的结果显示, 双波长输出的峰值功率波动控制在 0.7 dB 以内, 系统输出稳定性良好 (图 6(b)).

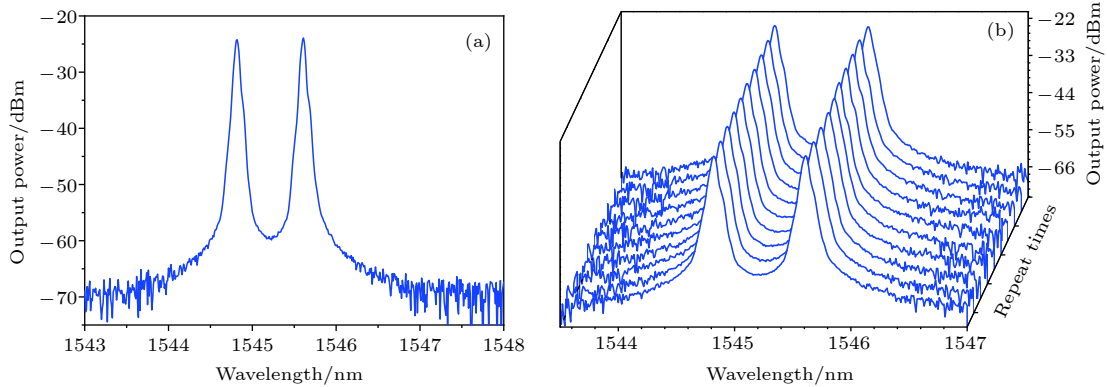


图 6 掺铒光纤激光器输出 (a) 双波长输出; (b) 输出稳定性测试
Fig. 6. Output of the EDFL: (a) Dual-wavelength lasing output; (b) output stability test.

实验测试发现, 在腔内 PC 控制下, 系统不仅能获得稳定的双波长激光输出, 而且还可实现双波长间隔的连续可调谐. 图 7 所示为系统双波长间隔连续调谐的测试光谱, 其中包含了两个连续切换的

双波长输出过程. 保持抽运功率 50 mW 不变, 调节腔内 PC, 双波长间隔连续发生变化. 当两激光波长的峰值功率差控制在 1 dB 以内时, 最大可获得 0—1.2 nm 的调谐范围, 当峰值功率差控制在

10 dB 以内时, 最大可获得 0—1.6 nm 的调谐范围, 1.2—1.6 nm 的调谐区段, 双波长输出峰值功率差随波长间距同步增大, 调谐过程的测试光谱见图 7(a) (调谐 I). 在腔内 PC 的持续调节下, 双波长输出中短波长信号停止谐振, 同时激发出在 1547.8 nm 附近的长波长信号 (图 7(b) 最前端红色谱线右侧支), 系统依旧保持双波长输出, 并且波

长切换的过程是连续变化的. 重复相应的调谐过程可获得 1.6—3 nm 的最大调谐范围, 调谐过程的测试光谱见图 7(b) (调谐 II). 在调谐 I 与调谐 II 的整体过程中, 系统可提供 0—3 nm 的波长间隔连续可调节输出, 若将该双波长掺铒光纤激光器用于毫米波生成, 将不仅能获得稳定的毫米波信号, 而且还可实现输出毫米波信号频率的连续可调谐.

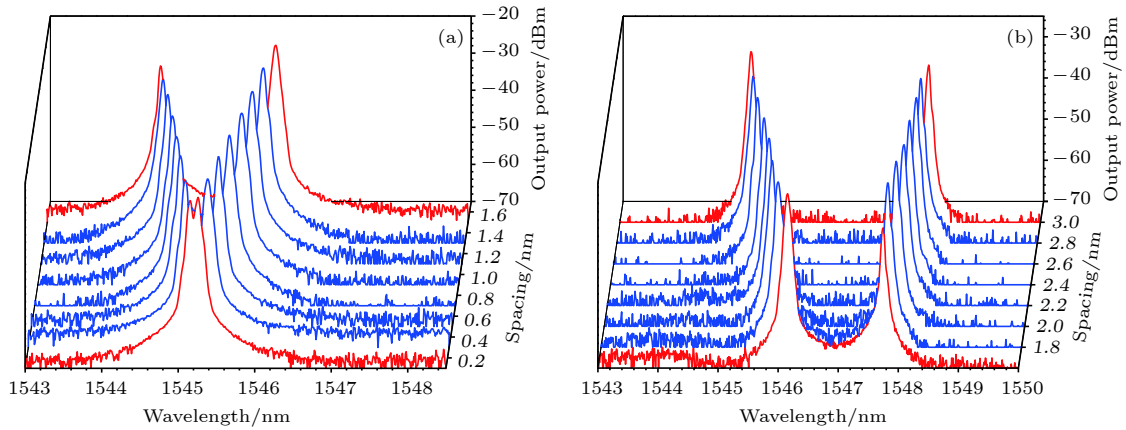


图 7 双波长输出波长间隔连续调谐过程 (a) 调谐 I, 0—1.6 nm; (b) 调谐 II, 1.6—3 nm

Fig. 7. Continuously spacing tuning of the dual-wavelength output: (a) Tuning I, 0–1.6 nm; (b) tuning II, 1.6–3 nm.

将系统双波长调谐输出光谱与 PD-MSM 光纤滤波器透射谱相比较, 可掌握波长间隔连续调谐的具体细节, 如图 8 所示. 图中红、蓝虚线对应 PD-MSM 光纤滤波器两相互正交偏振态的透射曲线, 黑色实线与绿色虚线为调谐过程中的稳定双波长输出光谱. 图 8(a) 对应调谐 I 过程, 起始时, 两激光信号分别位于 PD-MSM 光纤滤波器两正交偏振透射谱线交叠波长两侧 (图 8(a) 黑色实线), 随着波长间隔加大, 逐渐远离交叠波长位置 (图 8(a) 绿

色虚线), 调谐过程中双波长输出信号的移动范围保持一致. 图 8(b) 对应调谐 II 过程, 图中绿色虚线为调谐状态切换后的双波长输出起始位置, 短波长信号位于 PD-MSM 光纤滤波器两正交偏振透射谱线交叠波长右侧, 长波长信号位于其中一偏振态的峰值波长附近, 随着波长间隔加大, 双波长信号相向移动, 调谐过程中短波长信号的移动范围明显大于长波长信号, 波长间隔接近最大值 3 nm 时, 短波长信号基本与 PD-MSM 光纤滤波器两正交偏振

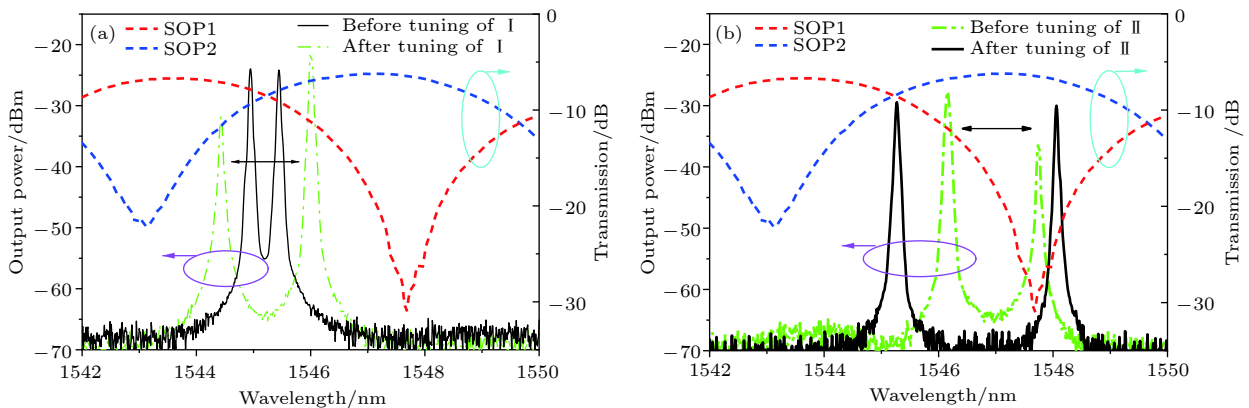


图 8 双波长输出调谐过程 (对比 PD-MSM 光纤滤波器透射谱) (a) 调谐 I; (b) 调谐 II

Fig. 8. Comparison between the transmission spectra of PD-MSM filter and spacing tuning of the dual-wavelength output: (a) Tuning I; (b) tuning II.

透射谱线的交叠波长一致 (图 8(b) 黑色实线).

为进一步了解系统的整体输出特性, 设计了两种测试方案 (Test 1, Test 2) 用于测试双波长输出的偏振态细节, 如图 9 所示. Test1 用于检测两波长激光信号的偏振正交特性, 系统由 PC、偏振分束器 (polarization beam splitter, PBS) 以及 OSA 组成. Test 2 用于检测每个激光信号的偏振稳定性, 系统由可调带通滤波器 (tunable bandpass filter, TBF) 与偏振分析仪 (polarization analyzer, PA, Agilent 8509B) 组成.

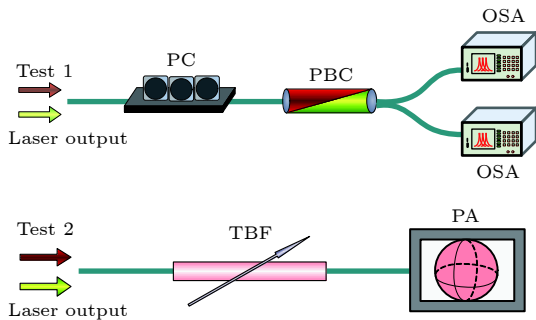


图 9 激光输出偏振态测试系统

Fig. 9. Schematic of laser output polarization testing.

Test 1 中, 将输出双波长激光信号注入测试系统, 信号先经过 PC 后再进入 PBS, 而后分出的两路信号由 OSA 进行测试. 测试过程中, 首先调节 PC, 确保将双波长激光信号中的任一信号的偏振态调至与 PBS 某输出端的线偏振态保持一致, 然后分别测试 PBS 两输出端的信号光谱. 图 10 为调谐过程中 PBS 两端口输出光谱的测试结果, 图中所示波长分别为调谐 I、调谐 II 过程中的代表波长, Port1 与 Port2 分别对应 PBS 的两个不同输出端口. 图 10(a) 对应调谐 I 过程, 可以看出, 两端口输出双波长激光信号的偏振消光比 (polarization extinction ratio, PER) 均高达 35 dB, 这说明输出的两信号分别位于相互正交的两个偏振态上, 此时掺铒光纤激光器的双信号激光输出不仅可以从波长上加以区分, 还可以从偏振态上区别开来. 图 10(b) 对应调谐 II 过程, 可以看出, Port1 输出双波长信号的 PER 达到 24 dB, 而 Port2 输出双波长信号的 PER 只有 6 dB, 这说明输出的两信号的偏振态并非相互正交. 此时掺铒光纤激光器的双信号激光输出, 可以从波长上加以区分, 但无法从偏振态上进行识别.

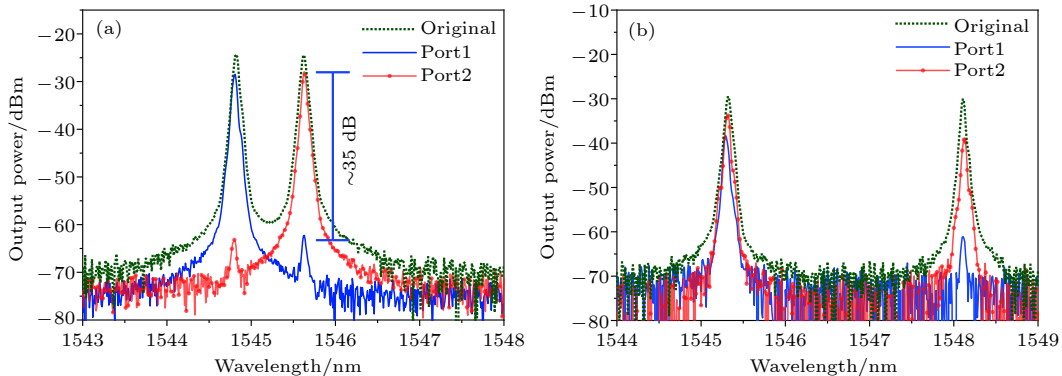


图 10 偏振态测试系统 1 输出 (a) 调谐 I; (b) 调谐 II

Fig. 10. Output of Test 1: (a) Tuning I; (b) tuning II.

Test 2 中, 将双波长激光信号注入测试系统, 首先信号通过 TBF 滤波器得到其中的一个波长, 然后利用 PA 观察该波长信号的偏振稳定性. 测试时间为 20 min, 保持常温常压及无振动测试环境, 图 11 为调谐过程中相应的测试结果, 图中所示波长分别为调谐 I、调谐 II 过程中的代表波长. 图 11(a) 和图 11(b) 对应调谐 I 过程, 图中显示输出信号的测试结果均位于 Poincare 球的赤道与两极之间, 因而为典型的椭圆偏振光, 且相互正交. 图 11(c)

和图 11(d) 对应调谐 II 过程, 图 11(c) 中信号显示为椭圆偏振光, 而图 11(d) 中信号的测试结果靠近 Poincare 球赤道附近, 表现出良好的线偏振特性. 通过对比可以看到, Test 2 的测试结果与 Test 1 的测试结果是相符合的. 长时间扫描结果显示所有信号的偏振态均保持十分稳定, 漂移很小, 并且偏振度 (degree of polarization, DOP) 测量结果均近似为 1 (DOP > 1 情况源自设备系统误差), 整体输出表现出良好的单偏振特性.

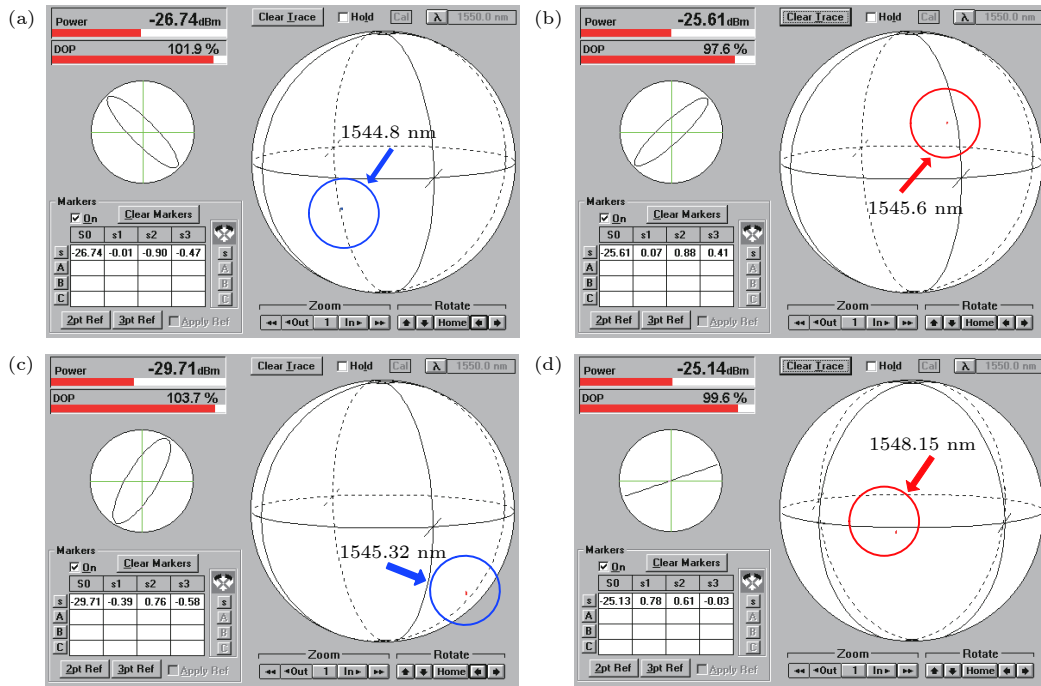


图 11 偏振态测试系统 2 输出 (a), (b) 调谐 I; (c), (d) 调谐 II
Fig. 11. Output of Test 2: (a), (b) Tuning I; (c), (d) tuning II.

5 结 论

提出了一种新型的 PD-MSM 光纤滤波器结构, 该滤波器集滤波与偏振保持特性于一体, 将其用于掺铒光纤激光器系统设计, 成功实现了 0—3 nm 波长间隔连续可调谐双波长激光输出, 输出双波长信号的边模抑制比达到 45 dB. 系统输出的偏振态测试结果显示, 该双波长掺铒光纤激光器在调谐全程中均保持稳定的单偏振输出, 最大偏振消光比可达 35 dB. 该激光器为全光纤型激光器, 性能稳定, 便于系统集成.

参考文献

[1] Liu J, Liu C, Shi H X, Wang P 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 194209 (in Chinese) [刘江, 刘晨, 师红星, 王璞 2016 *物理学报* **65** 194209]
 [2] Dou Z Y, Tian J R, Li K X, Yu Z H, Hu M T, Huo M C, Song Y R 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 064206 (in Chinese) [窦志远, 田金荣, 李克轩, 于振华, 胡梦婷, 霍明超, 宋晏蓉 2015 *物理学报* **64** 064206]
 [3] Ahmad H, Muhammad F D, Chang H P, Thambiratnam K 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **20** 0902308
 [4] Zhu T, Zhang B M, Shi L L, Huang S H, Deng M, Liu J G, Li X 2016 *Opt. Express* **24** 1324
 [5] Li Q, Feng S C, Peng W J, Liu P, Feng T, Tan S Y, Yan F P 2012 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **54** 2074
 [6] Li Z, Zhou J, He B, Liu H K, Liu C, Wei Y R, Dong J X, Lou Q H 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 074203
 [7] Feng X H, Liu Y G, Dong X Y 2007 *Chin. J. Las.* **34** 883 (in

Chinese) [冯新焕, 刘艳格, 董孝义 2007 *中国激光* **34** 883]
 [8] Ibarra-Escamilla B, Durán-Sánchez M, Álvarez-Tamayo R I, Posada-Ramírez B, Kuzin E A, Das S, Dhar A, Pal M, Paul M C, Kir'yanov A V 2019 *Laser Phys.* **29** 015102
 [9] Yin B, Feng S C, Bai Y L, Liu Z B, Liang L J, Liu S, Jian S S 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 1227
 [10] Han J H 2010 *Optik* **121** 2266
 [11] Feng T, Ding D L, Zhao Z W, Su H X, Yan F P, Yao X S 2016 *Laser Phys. Lett.* **13** 105104
 [12] Feng T, Ding D L, Zhao Z W, Su H X, Yan F P, Yao X S 2016 *Opt. Express* **24** 19760
 [13] Feng T, Yan F P, Liu S, Bai Y, Peng W J, Tan S Y 2014 *Laser Phys. Lett.* **11** 125106
 [14] He X Y, Wang D N, Liao C R 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 842
 [15] He X Y, Fang X, Liao C R, Wang D N, Sun J Q 2009 *Opt. Express* **17** 21773
 [16] Pan S L, Yao J P 2009 *Opt. Express* **17** 5414
 [17] Jasim A A, Ahmad H 2017 *Opt. Laser Technol.* **97** 12
 [18] Wang F, Xu E M, Dong J J, Zhang X L 2011 *Opt. Commun.* **284** 2337
 [19] Yeh C H, Chow C W, Shih F Y, Wang C H, Wu Y F, Chi S 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 125
 [20] Feng T, Yan F P, Liu S, Peng W J, Tan S Y, Bai Y L, Bai Y 2014 *Laser Phys.* **24** 085101
 [21] Choi B K, Park I G, Byun J H, Kim N, Han S P, Park K H, Seo J K, Lee H K, Jeon M Y 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 125105
 [22] Kim R K, Chu S H, Han Y G 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 521
 [23] Villanueva G E, Pérez-Millán P, Palaci J, Cruz J L, Andrés M V, Martí J 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 254
 [24] Liu J, Shen D Y, Huang H T, Zhao T, Zhang X Q, Fan D Y 2014 *Appl. Phys. Express* **7** 032702
 [25] Yan N, Han X F, Chang P F, Huang L G, Gao F, Yu X Y, Zhang W D, Zhang Z, Zhang G Q, Xu J J 2017 *Opt. Express* **25** 27609

Continuously spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on polarization-dependent in-line multimode-single-mode-multimode fiber filter*

Peng Wan-Jing¹⁾ Liu Peng^{2)†}

1) (*The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Institute of Applied Electronics of CAEP, Mianyang 621900, China*)

2) (*School of Physics and Electronic Engineering, Xingtai University, Xingtai 054001, China*)
(Received 4 March 2019; revised manuscript received 5 May 2019)

Abstract

A continuously spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped all-fiber laser is proposed and experimentally demonstrated in this paper. The key component of the laser is a novel polarization-maintained multimode-single-mode-multimode fiber interference filter, which is composed of two single-mode-multimode-single-mode fiber mode converters with a polarization-maintaining fiber sandwiched between them. As the polarization-maintaining fiber gives rise to a polarization-dependent phase difference, the fiber filter shows good polarization-dependent characteristics in interference filtering. Based on the mode interference and polarization control, the good wavelength tuning results are obtained in experiment. An optimized length of 1.3 mm for multimode fiber and 1.5 mm for polarization-maintaining fiber are adopted based on the theoretical and experimental analysis. When the phase difference between the lasing in the fast axial direction and that in the slow axial direction is π , the peaks and valleys in the transmission spectrum of the fiber filter correspond exactly to the two orthogonal polarization states. In the test, when the pump power is 50 mW, a high-quality dual-wavelength lasing output (at 1544.82 nm and 1545.61 nm) is observed to have side-mode suppression ratio better than 45 dB, the wavelength spacing of 0.8 nm, the peak power difference of less than 1 dB, and the output keeps stable with a small power fluctuation less than 0.7 dB. By adjusting the polarization controller in the ring cavity, two different dual-wavelength outputs can be obtained, which are corresponding to tuning I and tuning II. In tuning I, a dual-wavelength lasing output in a wavelength spacing tuning range of 0–1.2 nm can be obtained within 1 dB peak power difference, correspondingly, 0–1.6 nm tuning range within 10 dB peak power difference. In tuning II, with continuously adjusting the polarization controller, the short wavelength signal of the dual-wavelength output stops resonating, and simultaneously another wavelength signal near 1547.8 nm is excited, the switching is continuous and the system remains dual-wavelength output. In tuning II, a maximum tuning range of 1.6–3 nm is obtained. In both of tuning I and tuning II, a 0–3 nm continuously spacing-tunable dual-wavelength output is obtained, all of which keep stable single-polarization operation. The test results show that the polarization state of the dual-wavelength lasing varies with tuning; a maximum polarization extinction ratio of 35 dB is obtained as the two wavelengths are orthogonally polarized.

Keywords: fiber laser, multimode-interference fiber filter, dual-wavelength, continuously tunable

PACS: 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.60.Fc

DOI: 10.7498/aps.68.20190297

* Project supported by the Research Foundation of CAEP, China (Grant No. TCGH1001-02), the Scientific Research Project of Hebei Education Department, China (Grant No. ZD2017305), and the Research Project of Hebei Science and Technology Department, China (Grant No. 16210411).

† Corresponding author. E-mail: liupengcn1974@163.com