光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023021501

基于 M-Z 滤波的波长可调谐掺铒光纤随机激光器

张文铎[1,2]，何　巍[1,2*]，李智翰[1,2]，郭国文[1,2]，杨松岩[1,2]

（北京信息科技大学 1. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室；2. 光纤传感与系统北京实验室，北京 100016）

摘　要： 提出了一种基于 M-Z 结构的可调谐掺铒光纤随机激光器，并对随机激光输出过程、随机激光的波长可调谐输出以及随机激光的稳定性进行了实验研究。通过采用光纤熔接手段将两个 2×2 光纤耦合器进行熔接，构成全光纤 M-Z 滤波结构。实验结果表明，激光器的阈值功率为 120 mW，调整可调谐衰减器改变增益损耗，实现波长可调谐输出，其中单波长输出分别为 1 554.4，1 555.2 和 1 556.3 nm，信噪比达到 31.65 dB；双波长输出分别为 1 525.9，1 556.2 和 1 531.6，1 556.2 nm，信噪比优于 21.92 dB；三波长输出分别为 1 527.4，1 546.9，1 551.6 和 1 526.9，1 530.0，1 549.8 nm，信噪比优于 20.10 dB；四波长输出为 1 525.9，1 530.1，1 547.9 和 1 552.3 nm，信噪比优于 18.95 dB；其中单波长和双波长的功率波动分别优于 1.65 和 1.99 dB；激光器斜率效率为 0.627%。

关键词： 光纤随机激光；掺铒光纤；M-Z；波长可调谐

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0371－05

Wavelength Tunable Erbium-Doped Random Fiber Laser Based on M-Z Filter

ZHANG Wenduo[1,2], HE Wei[1,2], LI Zhihan[1,2], GUO Guowen[1,2], YANG Songyan[1,2]

(1. Key Lab Minist Educ Optoelect Measurement Technol; 2. Beijing Lab Opt Fiber Sensing & Syst, Beijing Informat Sci & Technol Univ, Beijing 100016, CHN)

Abstract: In this paper, a tunable erbium-doped fiber random laser based on M-Z structure is proposed. The output process, the wavelength tunable output and the stability of random laser were experimentally studied. Two 2×2 optical fiber couplers were fused by optical fiber fusion to form an all-fiber M-Z filter structure. The experimental results show that the threshold power of the laser is 120 mW. The gain loss is changed by adjusting the tunable attenuator, and the wavelength tunable output is realized. The single-wavelength output is 1 554.4, 1555.2 and 1556.3 nm respectively, and the signal-to-noise ratio is 31.65 dB. The dual-wavelength output is 1 525.9, 1 556.2 and 1 531.6, 1 556.2 nm respectively, and the signal-to-noise ratio is better than 21.92 dB. The output of three wavelengths are 1 527.4, 1 546.9, 1 551.6 and 1 526.9, 1 530.0 and 1 549.8 nm respectively, and the signal-to-noise ratio is better than 20.10 dB. The four-wavelength output is 1 525.9, 1 530.1, 1 547.9 and 1 552.3 nm, and the signal-to-noise ratio is better than 18.95 dB. The stability of single wavelength and dual wavelength is better than 1.65 and 1.99 dB respectively. The slope efficiency of the laser is 0.627%. Therefore, the random laser can achieve single-wavelength, dual-wavelength, three-wavelength tunable output and four-wavelength stable output.

Key words: random fiber laser; erbium doped fiber; M-Z; wavelength tunable

收稿日期：2023－02－15.

基金项目：国家自然科学基金项目(52105540)；高等学校学科创新引智计划项目(D17021)；北京市自然基金-市教委联合基金项目(KZ201911232044).

* **通信作者：**何　巍　**E-mail:** gregg1986@sina.com

0 引言

光纤随机激光器具有多波长输出、窄线宽、低阈值以及结构紧凑等特点，在激光雷达[1]、红外探测[2]、散斑成像[3]、光纤通信[4]等方面具有重要的研究意义，已经成为光纤激光和光纤传感的研究热点之一。

近年来，国内外研究机构已经对光纤随机激光器运行机制、结构设计以及性能测试开展了相关的研究。2015 年，Du 等[5]提出了一种工作在 1 μm 的可调谐随机分布反馈光纤激光器，其线宽为 0.4 nm，可调谐范围为 1 040～1 090 nm，输出功率波动在 1 dB 以内。2016 年，Litago 等[6]提出了一种双向泵浦可调谐双波长随机分布反馈光纤激光器，功率波动为 0.11 dB，3 dB 线宽为 0.13 nm，双波长可调谐范围为 9 nm。2017 年，Heba 等[7]提出了一种在标准单模光纤中基于瑞利背散射的宽带可调谐单纵模随机激光器调谐范围在 1 500～1 570 nm。2018 年，Popov 等[8]提出了一种 85 m 长的宽反射光谱双锥形瑞利光纤实现的可调谐随机激光，通过泵浦波长变化实现的激光可调谐性，其调谐范围在 1 548.0～1 551.4 nm。2018 年，Chen 等[9]研究了基于线形腔和复合腔结构的布里渊掺铒混合增益光纤激光器的输出特性，布里渊波长可从 1 540～1 570 nm 进行调谐输出，线形腔和复合腔阈值泵浦功率分别在 139～172 mW 及 196～294 mW 范围内变化。2019 年，Yang 等[10]提出并演示了一种结构简单、波长可调的半开腔随机光纤激光器，利用受激布里渊散射和掺铒光纤提供混合增益和瑞利散射作为随机分布反馈，输出波长可以在 1 529～1 588 nm 的范围内调谐。2020 年，Shen 等[11]介绍了一种由 FS 激光器和可调谐光纤布拉格光栅引入的随机光纤光栅辅助的可调谐掺铒光纤激光器，调谐范围为 4.45 nm (1 548.04～1 552.49 nm)。2021 年，Lu 等[12]提出并演示了一种使用 pi 光纤布拉格光栅（FBG）作为滤波器的全开腔波长可调谐随机光纤激光器（WT-RFL），激光阈值为 22 mW，最大峰值功率波动为 0.55 dB，可调谐范围为 800 pm。2022 年，Guo 等[13]提出了一种可调谐多波长受激布里渊散射调 Q 随机光纤激光器。随机分布反馈由一段 25 km 单模光纤(Single Mode Fiber，SMF)提供，激光输出的波长间隔为 0.08 nm。

由上述报道可知，现有光纤随机激光器研究主要采用半开腔以及环形腔结构，结合长距离光纤、高非线性光纤、光纤布拉格光栅等元器件作为散射介质提供瑞利散射增益实现随机激光输出。然而，现有研究存在核心元器件制备以及系统结构复杂、激光波长调谐不灵活、多波长输出稳定性较低等难点，成为了制约随机激光器在光纤激光传感方面的因素。针对上述问题，本文提出并设计了一种半开腔结构掺铒光纤随机激光器，结合长距离 SMF 作为随机反馈介质，并采用光纤马赫-曾德尔（Mach-Zehnder，M-Z）结构作为滤波器，实现了多波长可调谐随机激光输出。

1 激光器结构及原理

本文提出的基于 M-Z 滤波的光纤随机激光器系统原理如图 1 所示，激光器结构由输出波长为 980 nm 的泵浦光源（Laser Diode，LD）、980/1 550 nm 的波分复用器（Wavelength Division Multiplexer，WDM）、掺铒光纤（Erbium Doped Fiber，EDF）、长距离单模光纤、可调节衰减器（Variable Attenuator，VA）、M-Z 滤波结构以及光纤跳线构成半开腔系统。所设计的激光器采用 13 m 长的掺铒光纤作为有源增益介质，结合 10 km 长的 SMF 提供随机反馈；光纤 M-Z 结构在谐振腔中起到滤波效果。

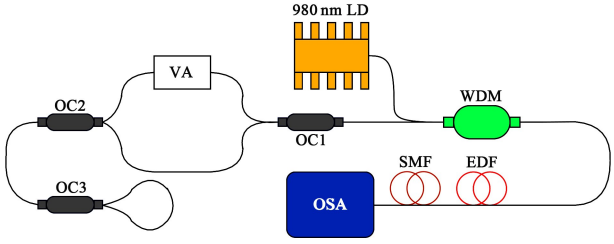


图 1 光纤随机激光器原理

根据安德森局域化效应，当光子的散射平均自由程小于或等于光的波长时，被散射的光子可以回到初始的散射微粒上，进而形成闭合散射回路。当光子由于强散射形成循环光散射时产生激光所需的相干反馈。光在传播过程中会形成随机路径，随机介质长度增加，会导致更多的随机路径产生。由于增益和随机反馈的存在，通过泵浦 EDF 可以实现掺铒光纤随机激光输出。为防止光纤端面的菲涅耳反射，输出端采用 8°的光纤跳线。

光纤 M-Z 滤波结构由两个 2×2 耦合器（Optical Coupler，OC）熔接构成，干涉周期表达式如公式(1)所示：

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}}{\Phi} \cdot \Delta L \tag{1}$$

式中，Δn_{eff} 表示纤芯与包层之间的折射率差，Φ 表示光纤纤芯和包层的相位差，ΔL 为两干涉臂长差。M-Z 的两臂臂长差 ΔL 决定了干涉谱周期。因此，M-Z 能够实现梳状滤波效果，在谐振腔中插入该滤波结构，能够在梳状谱的峰值位置产生激光，进而实现光纤激光器的波长可调谐输出。

2　分析与讨论

实验中对 M-Z 的光谱特性进行了研究，首先，搭建了 M-Z 实验系统，用光谱仪（OSA）对 M-Z 反射谱进行采集。M-Z 的梳状谱效果如图 2 所示，干涉周期 $\Delta\lambda$ 为 4.989 nm。因此将 M-Z 加入到激光器系统中，能够对输出光波长起到调制效果。

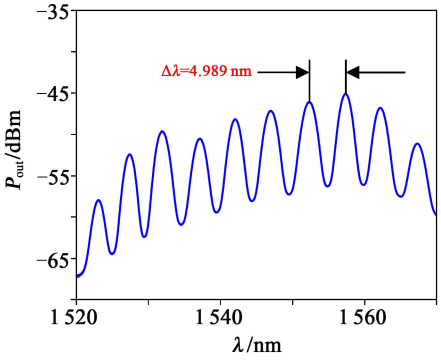
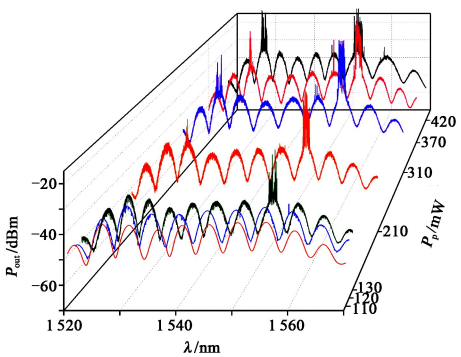
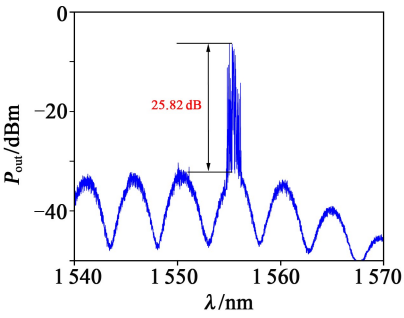


图 2　M-Z 反射光谱

接下来，按如图 1 所示的原理搭建了光纤随机激光器系统。泵浦波长为 980 nm，图 3(a)中各个曲线显示了不同泵浦功率 P_p 下的随机激光输出光谱。当泵浦功率为 120 mW 时，如图中蓝色曲线所示，为该激光器阈值功率；当泵浦功率增加到 130 mW 时，在 1 550 nm 波长附近产生了随机激光输出；随着泵浦功率的进一步增加，输出光谱中的随机激光模式逐渐增多，并且逐渐在 1 530 nm 波长附近产生了随机激光。如图所示，M-Z 对随机激光输出波长起到了调制效果。实验中，继续增加泵浦功率，激光纵模数量进一步增加，当泵浦功率为 210 mW 时，对 1 555 nm 附近波长的光谱细节进行采集，如图 3(b)所示，信噪比为 25.82 dB。



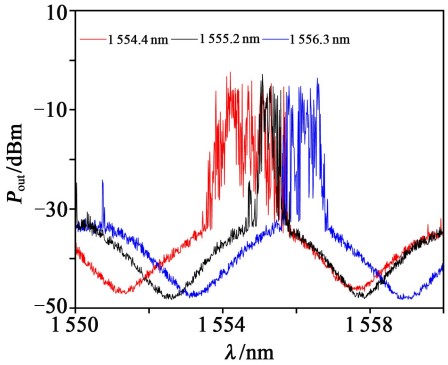
(a) 随机激光产生过程



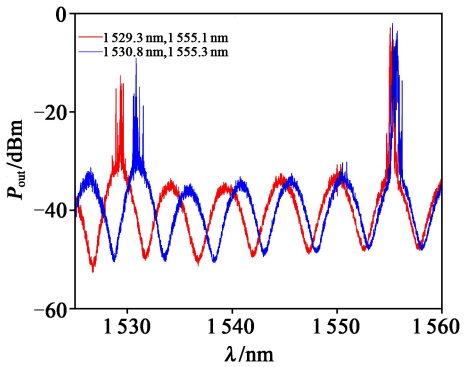
(b) 210 mW 时的随机激光光谱细节

图 3　随机激光产生过程及细节

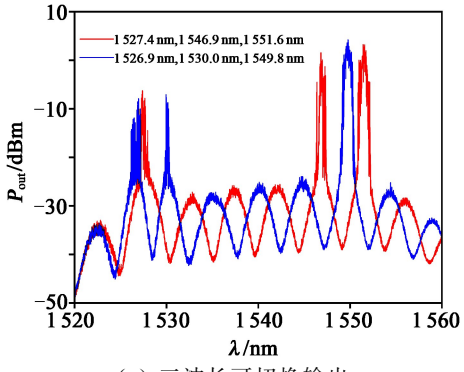
调整泵浦功率为 310 mW，并保持泵浦功率稳定不变，通过调节 VA 改变腔内增益损耗，实现随机激光波长可调谐输出。实验中，分别实现了单波长、双波长、三波长和四波长激光可调谐输出，其光谱分别如图 4(a)～(d)所示。其中，单波长可调谐激光输出如图 4(a)所示，中心波长分别为 1 554.4，1 555.2 和 1 556.3 nm 单波长激光输出，激光信噪比达到 31.65 dB，3 dB 线宽分别为 1.95，0.50 和 0.75 nm。通过调整 VA 可以实现双波长随机激光可调谐输出，如图 4(b)为所示，输出波长分别为 1 525.9，1 556.2 和 1 531.6，1 556.2 nm，3 dB 线宽分别优于 1.04 和 1.32 nm，信噪比优于 21.22 和 22.31 dB。实验中，通过调节 VA 实现了两组不同的三波长激光可调谐输出，如图 4(c)所示，输出波长分别为 1 527.4，1 546.9，1 551.6 和 1 526.9，1 530.0，1 549.8 nm，输出信噪比分别优于 20.24 和 20.10 nm。保持泵浦功率不变，通过调节 VA 能够实现稳定四波长激光输出，其光谱如图4(d)所示，



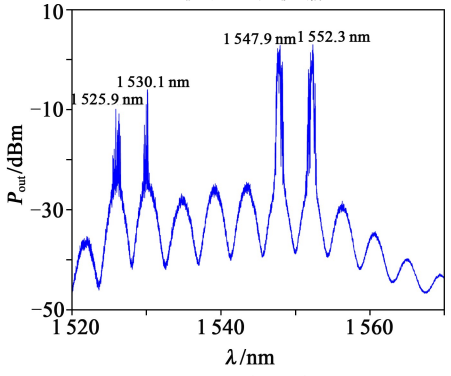
(a) 单波长可切换输出



(b) 双波长可切换输出



(c) 三波长可切换输出

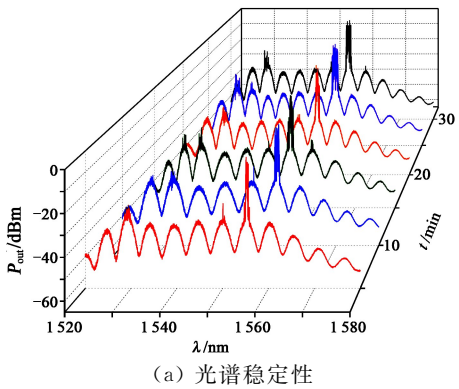


(d) 四波长激光输出

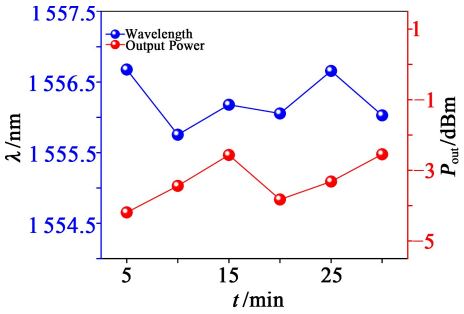
图 4 随机激光可调谐输出光谱

输出波长分别为 1 525.9,1 530.1,1 547.9,1 552.3 nm,3 dB 线宽均小于 0.75 nm,信噪比均优于 18.95 dB。

为了测试随机激光系统输出稳定性,实验中保持了VA和泵浦功率310 mW不变,对该激光器系统的单波长和双波长输出特性进行了 30 min 的稳定性测试。实验中,每隔 5 min 进行一次数据采集,其中图 5(a)为 1 555.6 nm 单波长激光输出光谱稳定性,图 5(b)为波长漂移及功率波动变化,分别小于 0.92 nm 和 1.65 dB,随机激光稳定性较好。



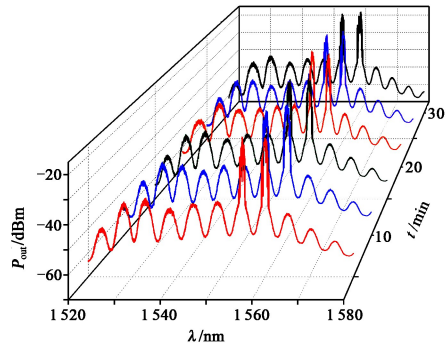
(a) 光谱稳定性



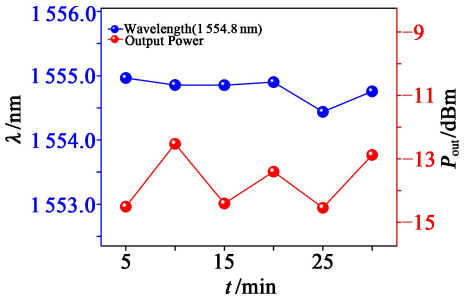
(b) 功率、波长稳定性

图 5 单波长激光输出稳定性

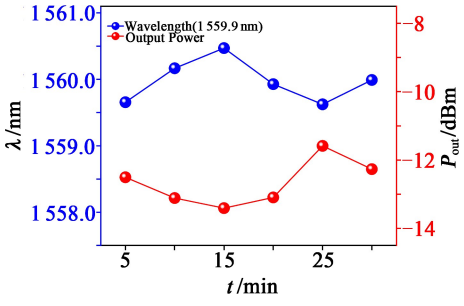
同样地,对系统双波长稳定性进行测试,每隔 5 min 进行一次数据采集。其中图 6(a)为 1 554.8,



(a) 光谱稳定性



(b) 1 554.8 nm 功率、波长稳定性



(c) 1 559.9 nm 功率、波长稳定性

图 6 双波长激光输出稳定性

1 555.9 nm 双波长激光输出光谱稳定性，图 6(b)～(c)为波长漂移及功率波动变化。其中两波长漂移分别小于 0.52 和 0.85 nm，输出功率波动分别小于 1.99 和 1.82 dB，随机激光稳定性较好，无明显的跳模产生。

实验中对激光器的斜率效率进行测试，用 AP-OPM-02-HS 型号的光电探测器采集输出激光。激光器的输出功率与泵浦功率的关系如图 7 所示，泵浦功率从 120 mW 逐渐增加到 520 mW 时，随机激光器的输出功率从 0.029 mW 增加到 2.828 mW，斜率效率 0.627%，相关系数为 0.999 8，该激光器的输出功率与泵浦功率具有良好的线性关系。

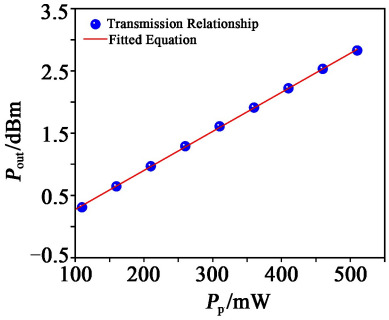


图 7　激光器输出功率

3　结论

本文提出并设计了一种基于 M-Z 的波长可调谐掺铒光纤随机激光器，建立了 M-Z 波长调制系统，可实现单波长、双波长、三波长可调谐输出及四波长输出，输出信噪比可达到 31.65 dB；并对单波长和双波长输出的光谱稳定性、波长漂移、功率波动以及斜率效率进行了分析；其中单波长和双波长的波长变化分别优于 0.92 和 0.85 nm，功率波动分别优于 1.65 和 1.99 dB，随着泵浦功率的增加，激光器输出功率逐渐增大，与泵浦功率之间具有良好的线性关系，激光器斜率效率为 0.627%。所设计的基于 M-Z 的波长可调谐掺铒随机光纤激光器结构简单，能实现较好的多波长稳定输出及调谐，在光纤通信、光学测量、光谱分析等领域具有重要应用价值。

参考文献：

[1] Chen H, Gao S, Zhang M, et al. Advances in random fiber lasers and their sensing application[J]. Sensors (Basel), 2020, 21(21): 6122.

[2] 卞耀兴，沈会会，刘大禾，等. 输出性能可调控的随机激光器的研究进展[J]. 中国科学：物理学力学天文学，2022，52(7)：173-190.
Bian Yaoxing, Shen Huihui, Liu Dahe, et al. Research progress of random lasers with tunable output performances [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2022, 52(7): 173-190.

[3] Babin S A, Turitsyn S K, Churkin D V, et al. Random distributed feedback fibre lasers[J]. Physics Reports, 2014, 542(2): 133-193.

[4] 饶云江. 光纤随机激光器及其应用研究进展[J]. 光子学报，2019，48(11)：7-27.
Rao Yunjiang. Research advances of random fiber lasers and its applications[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11): 7-27.

[5] Du X Y, Zhang H W, Wang X L, et al. Tunable random distributed feedback fiber laser operating at 1 μm[J]. Appl. Optics, 2015, 54(4): 908-911.

[6] Litago I A, Pérez-Herrera R A, Quintela Má, et al. Tunable dual-wavelength random distributed feedback fiber laser with bidirectional pumping source[J]. J. of Lightwave Technol., 2016, 34(17): 4148-4153.

[7] Heba S, Hussein K, Diaa K. Single-longitudinal-mode broadband tunable random laser[J]. Opt. Lett., 2017, 42(16): 3247.

[8] Popov S M, Butov O V, Chamorovski Y K, et al. Narrow linewidth short cavity Brillouin random laser based on Bragg grating array fiber and dynamical population inversion gratings [J]. Results in Physics, 2018, 9: 806-808.

[9] 陈相材，高伟清，陈　亮，等. 线形和复合腔结构布里渊光纤激光器实验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)，2019，42(5)：715-720.
Chen Xiangcai, Gao Weiqing, Chen Liang, et al. Experimental study on Brillouin fiber laser with linear and composite cavity [J]. J. of Hefei University of Technol. (Natural Science Edition), 2019, 42(5): 715-720.

[10] Yang Q. Tunable random fiber laser with half-open-cavity configuration[J]. Optik, 2019, 194: 163098.

[11] Shen C G, Huang R F, Liu Z X, et al. Tunable erbium-doped fiber laser assisted by a FS-laser introduced random fiber grating [C]// 18th Inter. Conf. on Optical Communications and Networks (ICOCN), 2019: 1-3.

[12] Lu H B, Yang L, Xia L, et al. Band-edge-enhanced tunable random laser using a polymer-stabilised cholesteric liquid crystal[J]. Liquid Crystals, 2021, 48(2): 255-262.

[13] Guo T, Zhang A, Pan H, et al. Tunable multi-wavelength SBS Q-switched random fiber laser based on SMF[J]. Appl. Phys. B, 2022, 99: 128.

作者简介：

张文铎(1998—)，男，山东省德州市人，硕士研究生，主要研究方向为光纤传感系统；

何　巍(1986—)，男，北京市人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为光纤激光器和光纤传感系统。