引用本文:梁晓明,蔡润权,潘威宇,等. 基于动态布居光栅和随机光纤光栅的掺铒随机光纤激光器[J]. 光通信技术,2026,50(5):1-7.

基于动态布居光栅和随机光纤光栅的掺铒随机光纤激光器

梁晓明,蔡润权,潘威宇,王文志,黄彦承,张 亮*
(上海大学 通信与信息工程学院,上海 200444)

摘要:随机光纤激光器尽管具有结构简单和独特相位噪声特性,仍面临易受环境干扰和激光频率稳定性不足等挑战。提出了一种基于动态布居光栅(DPG)和随机光纤光栅(RFG)的掺铒随机光纤激光器(EDRFL),通过在RFG构成的环形随机腔结构中引入一段0.2 m未泵浦掺铒光纤(EDF),基于驻波场引起的空间烧孔效应使纤芯折射率发生周期性调制,等效形成超窄带宽的动态布拉格光栅,实现了随机激光的噪声抑制及稳定性能提升。实验结果表明,所设计的EDRFL相比于无DPG的EDRFL,激光频率噪声在1~5 kHz傅里叶频段范围普遍降低了10 dB以上。同时,基于DPG的EDRFL在1 s时间范围内波动的方差降低约2个数量级。

关键词:光纤激光器;随机光纤激光;动态布居光栅;随机光纤光栅;掺铒随机光纤
中图分类号:TN248.1　**文献标志码:**A　**文章编号:**1002-5561(2026)05-0001-07
DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.05.001

Erbium-doped random fiber laser based on dynamic population grating and random fiber grating

LIANG Xiaoming, CAI Runquan, PAN Weiyu, WANG Wenzhi, HUANG Yancheng, ZHANG Liang*
(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Despite having a simple structure and unique phase noise characteristics, random fiber lasers still face challenges such as susceptibility to environmental interference and insufficient laser frequency stability. An erbium-doped random fiber laser(EDRFL) based on dynamic population grating(DPG) and random fiber grating(RFG) is proposed. By introducing a 0.2 m unpumped erbium-doped fiber(EDF) into the annular random cavity structure composed of random fiber grating, the refractive index of the fiber core is periodically modulated based on the spatial hole burning effect caused by standing wave field, effectively forming a dynamic Bragg grating with ultra narrow bandwidth, achieving noise suppression and stability improvement of random laser. The experimental results show that the designed EDRFL reduces laser frequency noise by more than 10 dB in the Fourier frequency range of 1~5 kHz compared to the EDRFL without DPG. At the same time, the variance of fluctuations in DPG based EDRFL within a 1-second time range is reduced by about 2 orders of magnitude.

Key words: fiber laser, random fiber laser, dynamic population grating, random fiber grating, erbium-doped random fiber

0 引言

随机激光作为一种无需传统谐振腔的新型相干光源受到广泛关注,其最早起源于1968年Letokhov V S等人对随机增益介质的理论预测[1]。与传统激光器产生激光的机理不同,随机激光的产生主要依赖于介质内部的多重散射与相干反馈[2-3],得益于随机分布式反馈机制,输出激光具有窄线宽特性[4-7]。研究人员利用光纤波导结构实现随机激光,有效克服其方向性差、效率低等问题,并为随机激光的产生提供多样的增益机制和反馈类型[8]。2010年,Turisyn S K等人[9]提出结合光纤的随机光纤激光器(RFL),通过瑞利散射提供相干反馈,实现了拉曼随机光纤激光振荡。随后,利

收稿日期:2025-07-21。
基金项目:国家自然科学基金项目(62275146)资助。



作者简介:梁晓明(2004—),男,本科生,现就读于上海大学通信与信息工程学院光电信息科学与工程专业,主要研究方向为光纤激光。参与校级创新训练项目"分布式光纤传感与CNN分析",获校创新创业大赛银奖;获校级电子设计竞赛二等奖、学业优秀二等奖学金、本科生学术论坛二等奖;获评2026届优秀毕业生,毕业设计获评校级优秀毕业设计。
***通信作者:**张亮(1987—),男,博士学位,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器和光纤传感等方面研究。在国内外学术期刊发表论文80余篇,包括PRL、PhotoniX、LPR等物理与光电子学领域国际顶级期刊,研究成果曾入选"中国光学年度重要成果奖"。

用受激布里渊散射[10]、掺铒光纤(EDF)[11]和掺镱光纤[12-13]等有源光纤作为增益介质,RFL的结构也逐渐向低泵浦功率和小型化发展[14]。然而,多重散射引入的随机反馈会导致多谐振模式的出现,并引发随机的模式竞争与跳变,导致激光输出频率的不稳定性,限制了其实际应用。针对该问题,众多研究者通过温度调控[15]、全光调控[16]、光学注入锁定[17]等主动稳频方式和引入可饱和吸收体[18]、全保偏光纤[19]等被动稳频方式,为提升随机激光的频率稳定性提供了新的思路,但以上方法在系统复杂度、调节范围与性能限制方面具有一定的局限性。

Frisken S[20]于1992年在EDF中发现了动态布居光栅(DPG)结构,其作为一种独特的光谱滤波与稳频技术,展现出巨大潜力。DPG的优势在于其能动态形成窄带滤波并自动追踪特定波长,从而有效抑制激光模式竞争,这一特性已被用于实现单频[21]和可调谐光纤激光输出[22],对激光器的输出稳定性有显著改善[23-25]。近年来,研究者们[26-27]通过在布里渊RFL结构中引入DPG,成功抑制了随机激光模式跳变。为此,本文提出一种基于DPG和随机光纤光栅(RFG)的掺铒随机光纤激光器(EDRFL)。

1 基本原理

1.1 RFG基本原理

不同于传统的光纤布拉格光栅(FBG),RFG的折射率调制从宏观来看没有固定的周期,其折射率变化可以看作是一系列具有不同周期与调制深度的微小固定周期光纤光栅,可以通过传输矩阵模型对RFG进行数学描述[28]:

$$t_i = \sqrt{1 - r_i^2} \tag{1}$$

式中:t_i表示每个调制点的透射系数,r_i表示其反射系数。该调制点的传输矩阵$\boldsymbol{T}_i$可以表示为

$$\boldsymbol{T}_i = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{t_i^*} & -\dfrac{r_i^*}{t_i^*} \\ -\dfrac{r_i^*}{t_i} & -\dfrac{1}{t_i} \end{bmatrix} \tag{2}$$

同时,RFG中存在折射率调制部分与未调制部分,未调制部分的传输矩阵$\boldsymbol{T}_i'$可以表示为

$$\boldsymbol{T}_i' = \begin{bmatrix} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi_i} & 0 \\ 0 & \mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi_i}\mathrm{e}^{\alpha z_i} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中:α为损耗系数,z_i为调制点之间的随机间距;ϕ_i为调制点引入的相位变化,$\phi_i = \dfrac{2\pi n z_i}{\lambda}$,$n$为介质折射率,$\lambda$为入射光波长。对于具有$N$个调制点的RFG,其总传输矩阵$\boldsymbol{T}_N$为每个调制部分与未调制部分的累积,表达式为

$$\boldsymbol{T}_N = \prod_{i=1}^{N} \boldsymbol{T}_i \boldsymbol{T}_i' \tag{4}$$

由此可分别求得RFG的总透射率与反射率。由于RFG的平均反射强度大于传统的单模光纤,可等效于特殊的FBG。这种等效特性源于RFG中的光局域化效应,从而实现了增强的随机分布式反馈。当前向传输光进入RFG后,部分光会穿过并到达输出端,其余则被反射回增益介质,如此循环反复形成谐振;当增益大于损耗时,形成随机激光输出。

1.2 DPG基本原理

当2束同频率、同偏振的光束在未泵浦的铒、镱等稀土元素掺杂光纤两端相向传输时,其干涉会形成具有周期性波腹波节分布的稳定驻波场[29]。在干涉条纹波腹处(光强最大区域),高功率密度引发布居粒子数反转,导致可饱和吸收体的吸收系数降低;在波节处(光强最小区域),较高的吸收系数促使粒子集中在基态,由此在稀土掺杂光纤内不同位置产生布居粒子数变化现象,在空间烧孔效应与驻波的周期性共同作用下,对EDF吸收系数产生周期性调制,使得纤芯的折射率发生周期性变化从而形成吸收型的DPG。根据驻波场与入射波长的关系可知,DPG的布拉格波长λ_B不是固定不变的,它可以自动匹配注入光的波长,λ_B理论公式为

$$\lambda_B = 2n_{\mathrm{eff}}\Lambda \tag{5}$$

式中:n_{eff}为光栅的有效折射率,Λ为光栅的调制周期。本文利用正弦折射率变化型光纤光栅的半峰全宽(FWHM)公式来估算DPG的带宽指标,带宽公式[30]具体可以写为

$$\Delta f_{\mathrm{FWHM}} = \frac{c}{\lambda_B}\kappa\sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_{\mathrm{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{M}\right)^2} \tag{6}$$

式中:c为真空中的光速;κ为光栅耦合系数;Δn为折射率调制幅度,即光栅总折射率变化量的一半;M为EDF长度L内光栅的总周期数,$M = \dfrac{L}{\Lambda}$。

由于DPG具有毫秒量级的时间寿命,当RFL发生跳模时,DPG仍能在其寿命时间内将反射率最大的中心波长锁定在原始波长,从而稳定激光的起振模式。同时,DPG对谐振频率光束与其他频率光束的吸收存在显著差异,表现出频率选择特性,进而实现随机激光模式的稳定。

1.3 EDRFL基本原理

本文提出的EDRFL采用半开放环形腔结构,其结构如图1所示。该装置由980 nm泵浦光源、980/1 550 nm波分复用器(WDM)、2段不同长度的EDF(Coherent EDFC-980-HP)、可调谐滤波器(TOF)和RFG组成。其中,TOF的3 dB带宽为0.1 nm,工作波长范围为1 545~1 555 nm。长度为6 m的普通商用EDF通过WDM由980 nm激光泵浦,产生受激辐射并提供线性增益,最终通过调节TOF可获得特定波长范围的激光输出。另有一段0.2 m未泵浦的EDF受到环行器(CIR)端口2的输出光与RFG反馈光的共同作用,在EDF内部形成驻波场,产生空间烧孔效应,导致EDF纤芯折射率周期性变化,等效于临时写入的超窄带宽DPG。RFG为随机激光系统提供随机反馈,其反馈光经CIR(端口2至端口3)注入环形腔形成受激振荡。当增益大于损耗时,输出端口即可产生随机激光。

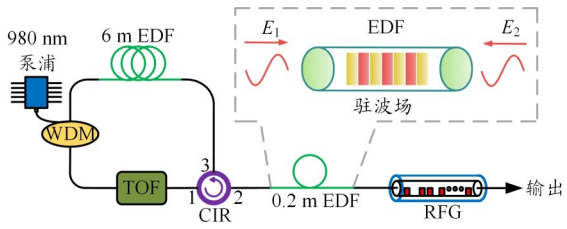


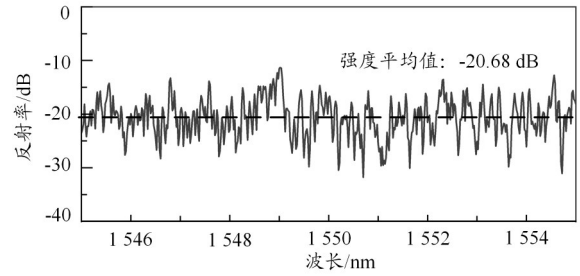
图1 EDRFL结构示意图

本文采用的RFG通过飞秒激光分层刻写技术制备而成,在3 cm长标准单模光纤(SSMF)纤芯内部实现了约60 000个折射率调制点的精确分布。为表征其性能,采用商用EDF放大器产生的宽带自发辐射(ASE)对RFG及25 km SSMF进行了反射光谱测试,结果如图2所示。可以看出,在1 545~1 555 nm的波长范围内,RFG相较于SSMF的平均反射强度有显著增强,提升了约13.19 dB。这一结果表明,该RFG结构通过无序分布的折射率调制形成多重散射点,在空间上提供了增强的分布式反馈。

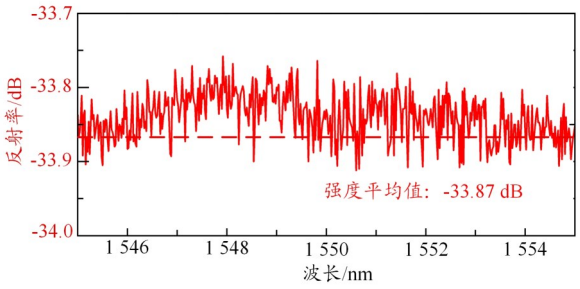
2 实验结果与分析

2.1 激光光谱及功率特性

本文利用光谱分析仪(OSA)测试了EDRFL在不同980 nm泵浦功率(172、202、232、290 mW)时的输出光谱特性,OSA分辨率为0.02 nm,测试结果如图3所示。可以看出,随着980 nm泵浦光功率的增强,随机激光的输出光功率逐渐增大,激光的中心波长均在1 550.0 nm处。当泵浦功率达到202 mW时,输出光信



(a) RFG



(b) 25 km SSMF

图2 RFG和25 km的SSMF反射谱

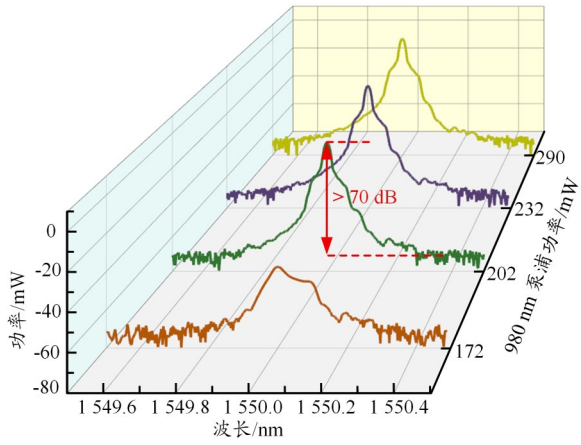


图3 不同980 nm泵浦功率下EDRFL的输出光谱

噪比超过70 dB,之后持续增加泵浦功率,光信噪比则始终保持在70 dB以上,表明通过调节980 nm泵浦功率可有效调控EDRFL的输出特性,获得高信噪比激光。

实验进一步测试了EDRFL的输出光功率与980 nm泵浦功率的关系,如图4所示。可以看出,当泵浦功率超过125 mW的激光阈值后,输出光功率与泵浦功率呈线性关系,对应的激光效率为0.61%。该激光转换效率较低的主要原因在于未泵浦EDF引入的额外吸收损耗、插入损耗以及RFG分布式随机反馈导致的部分能量以非相干散射形式损耗。

2.2 线宽特性

线宽是激光器的一个重要特性。理论上当激光

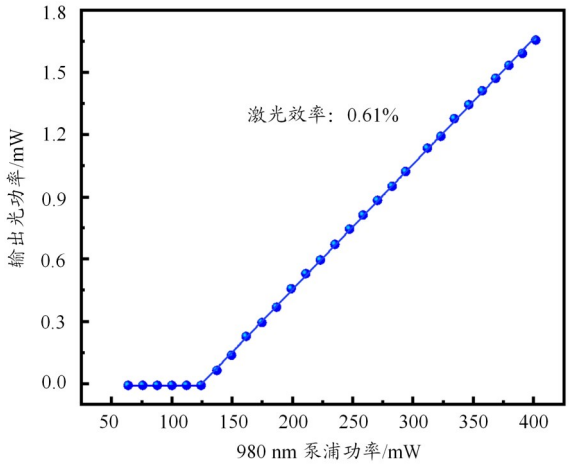


图4 EDRFL的输出光功率随980 nm泵浦功率的变化

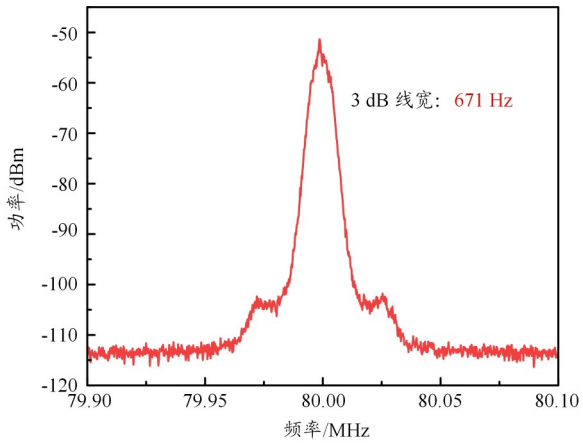


图6 EDRFL的拍频信号频谱图

器输出单纵模时,理想情况下光谱应为单一冲激函数曲线。受各类噪声影响,实际输出光谱会出现展宽现象。工程应用中,通常采用3 dB线宽(即光谱峰值功率下降50%对应的频率差值)来评估激光器的单色性能。本文采用延迟自外差系统分析EDRFL的激光线宽特性,其线宽测量装置结构图如图5所示,待测激光输出经过10∶90耦合器(OC)分为上下2个支路。其中一个支路通过长距离延迟光纤消除信号相干性,作为参考光路;另一个支路经声光调制器(AOM)引入80 MHz频移,将信号搬移至高频段,使拍频信号低频分量远离零频区,从而最大限度地抑制环境噪声干扰。经可调光衰减器(VOA)调节后,得到与下半支路输出功率相近的信号。2路信号经耦合拍频后,由光电探测器(PD)完成光/电转换,最后通过电频谱分析仪(ESA)进行线宽表征。

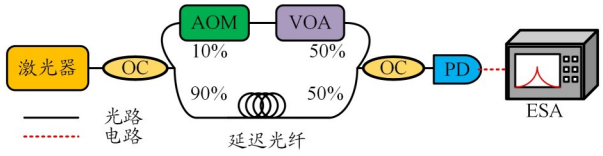


图5 EDRFL线宽测量装置结构图

EDF长度为0.2 m时,EDRFL的拍频信号频谱图如图6所示。基于该测试数据,本文采用外差谱20 dB谱宽计算方法估算激光器线宽[31],可有效降低$\frac{1}{f}$噪声干扰,其外差谱在峰值以下20 dB处的谱宽约为激光器3 dB线宽的20倍。实验结果表明,输出3 dB线宽为671 Hz,表明该激光器具有窄线宽单纵模输出特性。

2.3 噪声抑制特性

本文提出的EDRFL的相对强度噪声(RIN)主要源自随机反馈引起的功率波动,按频率分布可分为低频段闪烁噪声和环境噪声、中频段的弛豫振荡噪声以及高频段的散粒噪声。图7为EDRFL的RIN谱。可以看出,RIN接近−110 dB/Hz。低频段噪声呈现较大变化,中频段以弛豫振荡噪声为主,这源于增益介质上能级粒子与光子的非线性相互作用,表现为阻尼振荡,RIN谱在特定频段呈现弛豫振荡峰。根据速率方程建立的弛豫振荡噪声模型[32],弛豫振荡的振荡频率及峰值与谐振腔结构、泵浦功率及损耗等因素相关。实验数据表明,该激光器存在弛豫振荡现象,中心振荡频率位于10 ~100 kHz,与EDF的弛豫振荡理论特性吻合。

激光频率噪声描述了激光场矢量相位的随机波动特性。基于维纳−辛钦定理,其功率谱密度可通过

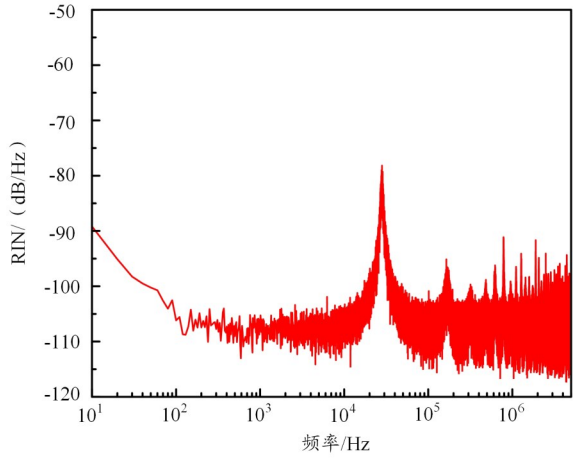


图7 EDRFL的RIN谱

相位波动自相关函数的傅里叶变换获得。本文采用基于3×3耦合器的非平衡迈克尔逊干涉仪解调系统[33]对EDRFL实验测量,该测量系统的核心元件为3×3光纤耦合器,其独特的光学特性使输出端3路光信号形成稳定的120°相位差。系统引入双法拉第旋转镜结构,通过偏振态动态补偿机制有效消除了传统干涉仪中常见的偏振衰落现象。在信号处理层方面,本文通过构建PD输出信号的微分交叉相乘算法与积分运算的级联处理,实现了激光相位波动信息的精确解调,为后续相位噪声和频率噪声的定量分析奠定了数据基础。

为提升测量EDRFL的信噪比,实验系统采用了多重抗干扰设计。首先,将干涉仪主体封装于具备隔振隔热功能的密闭箱体,有效抑制环境振动和温度波动的影响;其次,通过3.41 km延时光纤构建延时放大机制,提高了相位分辨能力。该方案为激光器件的噪声特性分析提供了可靠的技术手段。实验分别测量了有/无DPG时EDRFL的频率噪声谱,如图8所示。可以看出,有DPG时EDRFL的频率噪声得到了显著抑制。在1 kHz频率处,有DPG时EDRFL的频率噪声为32.35 dB·Hz²/Hz,无DPG时为45.19 dB·Hz²/Hz;在5 kHz频率处,有DPG时频率噪声为6.34 dB·Hz²/Hz,无DPG时为17.26 dB·Hz²/Hz。相较于无DPG的情况,有DPG时EDRFL在1~5 kHz的频率噪声普遍被抑制了10 dB以上。

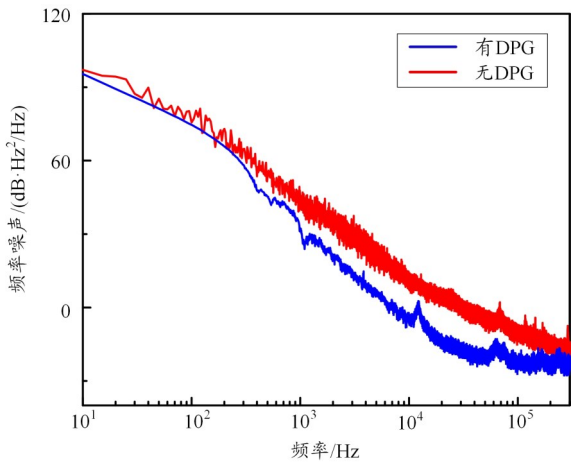
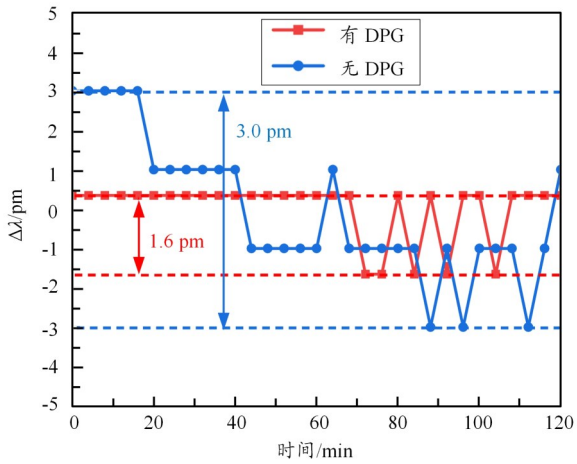


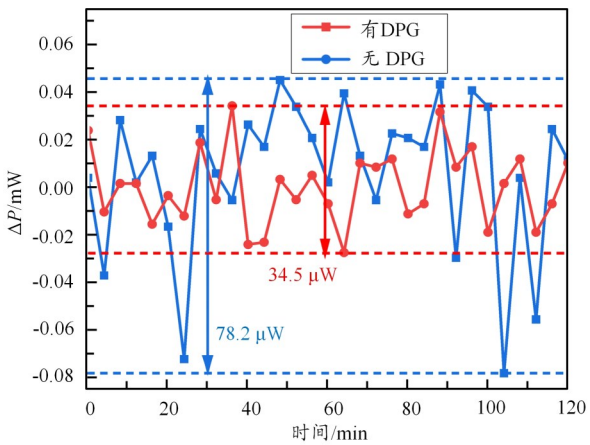
图8 有/无DPG的EDRFL的频率噪声谱

2.4 激光稳定性

激光器的稳定性可通过短时间和长时间激光输出性能进行评估。本文采用长时间稳定性作为分析指标,通过连续监测EDRFL输出的光功率及波长稳定性对其进行性能评价。实验在2 h内每隔4 min采集一次光谱数据,记录有DPG和无DPG时EDRFL的波长与功率。基于多组数据,通过计算与中心频率及平均光功率的差值,得到波长波动Δλ与功率波动ΔP的测试结果如图9所示。可以看出,加入DPG后,Δλ和ΔP的波动峰峰值分别为1.6 pm和34.5 μW,均显著优于无DPG条件下的3.0 pm和78.2 μW。进一步计算2种结构Δλ和ΔP的总体方差,结果如表1所示。可以看出,有DPG时Δλ和ΔP的方差分别为0.402 pm²和327.334 μW²,无DPG时分别为3.366 pm²和992.173 μW²。通过对长时间实验数据的对比分析可知,加入DPG的EDRFL在波长和功率稳定性上均表现出更好的稳定性。



(a) Δλ测试



(b) ΔP测试

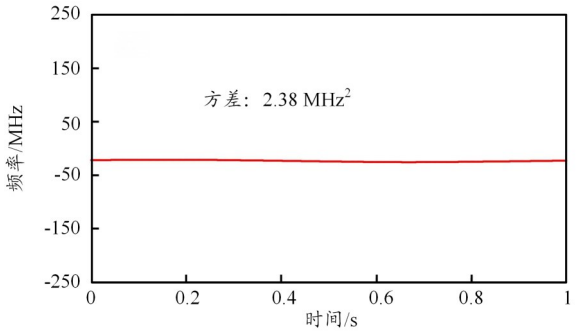
图9 有/无DPG的EDRFL的稳定性测试

激光器的频率稳定性是衡量其性能的关键指标之一,表征连续激光器在特定时段内的频率波动幅度,反映了器件输出维持频率稳定的能力。在环形光纤激光器中,激光器的性能受到与相对较长的腔长结

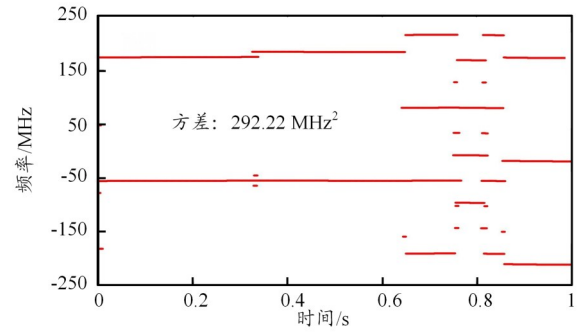
表1 有/无DPG时EDRFL波长与输出功率波动的方差对比

结构	总体方差	
	$\Delta\lambda$/pm^2	ΔP/μW^2
有DPG	0.402	327.334
无DPG	3.366	992.173

构相关的多模振荡和模式跳变的影响[34]。模式跳变现象在早期研究中已获得充分阐释[35],其本质是在具有均匀加宽特性的增益介质中,由自发辐射噪声等随机扰动通过模式竞争机制引发的一类模式动态行为。本研究采用双激光器外差干涉法[36],通过将高稳频参考激光(NKT Photonics Koheras ADJUSTIK E15)与待测EDRFL的输出进行耦合拍频,经PD转换至电域分析,分别测量有/无DPG的EDRFL的频率稳定性,结果如图10所示。实验数据分析表明,在1 s观测时段内,所提EDRFL(加入0.2 m EDF的DPG)未观测到模式跳变,其频率波动方差仅为2.38 MHz^2;相较之下,未加入DPG的EDRFL表现出显著的模式竞争,2个主要模式频率波动方差为292.22 MHz^2,且存在多个模式。对比结果显示,DPG的引入使EDRFL的频率短时间波动方差降低约120倍,约2个数量级,有效遏制了模式跳变现象的发生。



(a)有DPG



(b)无DPG

图10 有/无DPG条件下,EDRFL激光频率时域瀑布图

3 结束语

本文提出了一种EDRFL,将未泵浦的EDF引入基于RFG的EDRFL中,利用特殊的驻波条件下饱和吸收效应形成DPG,实现对随机激光的稳定性优化。引入DPG后,EDRFL输出呈现窄线宽特性,线宽约为671 Hz。相较于传统基于RFG的EDRFL,所提EDRFL在1~5 kHz频率范围内的频率噪声普遍降低了10 dB以上,且在1 s时间范围内的模式稳定性提升了约2个数量级,激光器稳定性得到显著增强。这一稳定性提升源于DPG选择性反馈特定波长的特点,有效抑制了模式竞争,从而增强了激光单模运行时激光频率和功率的稳定性。该EDRFL结合了DPG的优势,在传统EDRFL基础上有效优化了输出激光质量,为高稳定性窄线宽光纤激光器的研究提供了一种有效的设计思路。

未来可通过优化未泵浦EDF的长度和掺铒离子浓度等方式增强DPG调制深度,另外可采用全保偏光纤结构,结合DPG的稳频作用与保偏光纤的偏振稳定优势,进一步提升窄线宽随机光纤激光器的稳定性,为下一代相干通信和超精密传感系统提供理想的光源。

致谢:中北大学王海洋副教授在随机光栅等的光纤器件方面提供的协助。

参考文献:

[1] Letokhov V S. Generation of light by a scattering medium with negative resonance absorption[J]. Journal of Experimental and Theoretical Physics,1968,4(26):835-840.

[2] Wiersma D S. The physics and applications of random lasers[J]. Nature Physics,2008,4(5):359-367.

[3] 陈雷,楼祺洪,王之江,等. 纳米ZnO粉末中随机激光现象[J]. 物理学报,2006,55(2):920-922.

[4] Sugavanam S,Tarasov N,Shu Xuewen,et al. Narrow-band generation in random distributed feedback fiber laser[J]. Optics Express. 2013,21(14):16466-16472.

[5] Gao Song,Zhang Liang,Xu Yanping,et al. Tapered fiber based Brillouin random fiber laser and its application for linewidth measurement[J]. Optics Express,2016,24(25):28353-28360.

[6] 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.

[7] 胡杰,王奕斐,邢志坤,等. 基于随机光纤光栅的窄线宽随机光纤激光器[J]. 光学学报,2020,40(16):122-127.

[8] 杜文彧,胡志家,曹志刚,等. 随机激光研究综述(特邀)[J]. 红外与激光工程,2020,49(12):30-54.

[9] Turitsyn S K,Babin S A,El-Taher A E,et al. Random distributed feedback fiber laser[J]. Nature Photonics,2010,4(4):231-235.

[10] Fotiadi A A, Preda E, Megret P. Brillouin fiber laser with incoherent feedback[C]//CLEO: 2011-Laser Science to Photonic Applications, May 1-6, 2011, USA, New York: IEEE, 2011: 1-2.
[11] Zhang Weili, Li Shiwei, Ma Rui, et al. Random distributed feedback fiber laser based on combination of Er-doped fiber and single-mode fiber [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21 (1): 44-49.
[12] Meng Qingyang, Wu Han, Han Bing, et al. LD-pumped random fiber laser based on erbium-ytterbium co-doped fiber[J]. Photonic Sensors, 2020, 10(2): 181-185.
[13] Song Jingxuan, Dong Xinyong, Guo Ziyang, et al. Random laser with erbium-doped fiber and fs-laser introduced random fiber grating[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Hangzhou, China, 2018: 1-3.
[14] Chen Lanjian, Song Rui, Lei Chenmin, et al. Random fiber laser directly generates visible to near-infrared supercontinuum[J]. Optics Express, 2019, 27(21): 29781-29788.
[15] Zhang Weili, Song Yunbo, Zeng Xiaopei, et al. Temperature-controlled mode selection of Er-doped random fiber laser with disordered Bragg gratings[J]. Photonics Research, 2016, 4(3): 102-105.
[16] Zhang Weili, Ma Rui, Tang Chenghao, et al. All optical mode controllable Er-doped random fiber laser with distributed Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2015, 40(13): 3181-3184.
[17] Hu Bo, Zhang Weili, Ma Rui, et al. Wavelength locking of Er-doped random fiber laser[J]. Laser Physics Letters, 2019, 16: 055102-055107.
[18] 侯刘敏,侯云龙,刘圆凯,等. 基于可饱和吸收体锁模激光器中的呼吸子[J]. 物理学报,2025,74(4):129-135.
[19] Zhang Liang, Wang Chen, Li Zhengying, et al. High-efficiency Brillouin random fiber laser using all-polarization maintaining ring cavity[J]. Optics Express 2017, 25(10): 11306-11314.
[20] Frisken S. Transient Bragg reflection gratings in erbium-doped fiber amplifiers [J]. Optics Letters, 1992, 17(24): 1776-1778.
[21] Cheng Yu, Kringlebotn J, Loh W, et al. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter[J]. Optics Letters, 1995, 20(8): 875-877.
[22] Zhang Kang, Kang J. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. Optics Express, 2008, 16(18): 14173-14179.
[23] Wang Kaile, Wen Zengrun, Chen Haowei, et al. Single-frequency all-polarization-maintaining ytterbium-doped bidirectional fiber laser[J]. Optics Letters, 2021, 46: 404-407.
[24] Wang Kaile, Lu Baole, Qi Xinyuan, et al. Wavelength-tunable single-frequency ytterbium-doped fiber laser based on a double-circulator interferometer[J]. Laser Physics Letters, 2019, 16(1): 015104-015109.
[25] Wang Tianshu, Guo Yubin, Wang Ke. Analyzing longitudinal-mode of single-frequency ring fiber laser [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(6): 1494-1497.
[26] Pang Yuxi, Xu Yanping, Zhao Xian, et al. Low-noise narrow-linewidth brillouin random fiber laser with dynamic fiber grating[C]//2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA, 2022: 1-2.
[27] Zhang Liang, Qiu Zenghuan, Xiao Zhelan, et al. Frequency-stabilized Brillouin random fiber laser enabled by self-inscribed transient population grating[J]. Optics Letters, 2022, 47: 150-153.
[28] 刘艳,李阳,闫小军,等. 随机折射率调制光纤光栅中的模式耦合分析[J]. 红外与毫米波学报,2016,35(1):72-77.
[29] Stepanov S. Dynamic population gratings in rare-earth-doped fibers: properties and possible applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(22): 224002-224025.
[30] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277-1294
[31] Mercer L B. 1/f frequency noise effects on self-heterodyne linewidth measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(4): 485-493.
[32] 梁迅,马丽娜,胡永明,等. 连续抽运情况下光纤激光器弛豫振荡特性研究[J]. 半导体光电,2008,29(6):815-819.
[33] 徐丹,卢斌,杨飞,陈迪俊,等. 基于3×3耦合器的窄线宽单频激光器噪声测量技术[J]. 中国激光,2016,43(1):26-32
[34] Spirin V, LóPez-Mercado C, Kinet D, et al. A single-longitudinal-mode Brillouin fiber laser passively stabilized at the pump resonance frequency with a dynamic population inversion grating[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(1): 015102-015105.
[35] Ohtsu M, Teramachi Y, Otsuka Y, et al. Analyses of mode-hopping phenomena in an AlGaAs laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(4): 535-543.
[36] 解东宏,邓大鹏,郭丽,等. 窄线宽激光器线宽测量方法[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(1):010006-010011.