

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.05.006

光电反馈抑制DBR单纵模光纤激光器的弛豫振荡噪声

刘元煌^{1,2}, 魏珊珊², 陈雨君^{1,2}, 姚波², 毛庆和^{1,2*}

(1 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

2 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所光子器件与材料安徽省重点实验室,
安徽 合肥 230031)

摘要: 报道了使用光电反馈法对 1.5 μm 分布式布拉格反射 (DBR) 单纵模光纤激光器强度噪声的抑制结果。通过分析光纤激光器的泵浦扰动到激光输出功率波动的传递函数, 发现其相频响应在弛豫振荡频率处有 180° 相位突变。因此, 依据已有的商用比例积分 (PI) 控制电路设计并构建了一阶移相网络, 在弛豫振荡频率处提供 45° 超前相位以补偿该频率处的相位突变。采用该反馈控制系统, 可将激光器的弛豫振荡峰由 -95 dB/Hz 降至 -125 dB/Hz, 抑制幅度高达 30 dB。抑制后的光纤激光器有望在精密测量等应用中发挥重要作用。

关键词: 激光技术; 弛豫振荡噪声; 光电反馈; 单纵模; 光纤激光器

中图分类号: TN242

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)05-00677-07

Relaxation oscillation noise suppression in a DBR single-longitudinal-mode fiber laser using optoelectronic feedback

LIU Yuanhuang^{1,2}, WEI Shanshan², CHEN Yujun^{1,2}, YAO Bo², MAO Qinghe^{1,2*}

(1 School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2 Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The suppression of intensity noise in a 1.5 μm distributed Bragg reflector (DBR) single-longitudinal-mode fiber laser using optoelectronic feedback was reported. By analyzing the transfer function from the pump disturbance to the output power fluctuation, it was found that the phase of the fiber laser has a 180° phase mutation at the relaxation oscillation frequency. Therefore, a first-order phase-

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0405100, 2017YFB0405200), 中国科学院战略性先导科技专项 (B类) (XDB21010300), 国家自然科学基金 (61805258, 61377044), 先进激光技术安徽省实验室主任基金 (20191001), 安徽省科技重大专项 (201903a07020021)

作者简介: 刘元煌 (1995 -), 海南澄迈人, 研究生, 主要从事单纵模光纤激光器方面的研究。E-mail: liuyh39@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 毛庆和 (1963 -), 安徽泾县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事纤维光学、激光物理与器件及其应用技术等方面的研究。

E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2021-04-02; 修改日期: 2021-05-17

*通信作者。

shifting network, which can provide a 45° lead phase at the relaxation oscillation frequency to compensate for the phase mutation at that frequency, was designed and constructed based on an existing commercial proportional integral (PI) control circuit. With the designed feedback control system, the relaxation oscillation peak of the laser was reduced from -95 dB/Hz to -125 dB/Hz, the suppression amplitude was as high as 30 dB. The suppressed fiber laser is expected to play an important role in applications such as precision measurement.

Key words: laser techniques; relaxation oscillation noise; optoelectronic feedback; single longitudinal mode; fiber laser

0 引言

单纵模光纤激光器具有线宽窄和相干性好等优点,在光纤传感^[1]、激光雷达^[2]、相干光通信^[3]等领域都有广泛应用。但是,对于诸如光纤水听器系统^[4]等精密测量应用,自由运转单纵模激光器的强度噪声会叠加到检测信号上,造成检测信号信噪比下降,影响测量系统的探测精度。为此,必须设法抑制激光器的强度噪声,特别是抑制激光器最主要的强度噪声—弛豫振荡^[5]。迄今,研究人员已发展出多种抑制弛豫振荡噪声的方法,包括光电反馈^[6]、强度调制^[7]、半导体光放大(SOA)^[8]和注入锁定^[9]等,其中,光电反馈方法将测得的噪声信号通过反馈电路进行处理后,产生控制信号来调制泵浦源驱动电流,从而达到抑制激光器强度噪声的目的,其原理结构简单、易于集成实现,且不会牺牲过多的激光输出功率。早在单纵模光纤激光器研制成功不久, Ball 等^[10]就基于光电反馈法,运用光电探测结合比例积分微分(PID)反馈电路,通过控制泵浦电流有效抑制了分布 Bragg 反射(DBR)单纵模光纤激光器的强度噪声,在弛豫振荡频率处取得了 30 dB 的抑制效果,但同时,高于弛豫振荡峰的高频段强度噪声却有所增大。另一方面,由泵浦扰动到固体激光输出功率波动的传递函数在弛豫振荡频率处有一对共轭复极点,因而会产生 180° 的相位突变^[11,12],在利用光电反馈抑制其强度噪声的弛豫振荡峰时,必须要考虑该相位突变,否则可能会导致反馈系统不稳定,甚至会产生振荡;而通过优化反馈系统增益和相位,不仅可避免反馈系统的不稳定振荡,还可改善对强度噪声弛豫振荡的抑制效果。鉴于光纤激光器强度噪声行为与固体激光器类似,研究人员在抑制光纤激光器强度噪声时也考虑了这一相位突变因素,但是,仅通过设计 PID 电路参数只能在特定频段提供线性相位变化,难以补偿弛豫振荡频率处的相位突变,而通过在反馈电路后接入移相网络,在弛豫振荡频率处提供 44° 相位超前,已将环形腔掺铒光纤激光器强度噪声的弛豫振荡峰抑制了 35 dB^[13]。但对于目前应用最广的 DBR 单纵模光纤激光器,在通过光电反馈抑制强度噪声的弛豫振荡峰时尚未考虑这种相位突变,迄今也未见相关实验演示的报道。

本文报道一种采用光电反馈法抑制 DBR 单纵模光纤激光器的弛豫振荡噪声的结果,通过对泵浦源扰动到激光输出功率波动传递函数的响应特性分析,测得弛豫振荡频率存在 180° 相位突变,由此设计出相应的移相网络,在弛豫振荡频率处提供了约 45° 的相位超前,进而成功地将 DBR 单纵模光纤激光器弛豫振荡峰抑制近 30 dB。

1 实验装置

图 1 为用于研究光电反馈抑制单纵模 DBR 光纤激光器强度噪声中弛豫振荡峰的实验装置。所用激光器

为自主研发的 1550 nm 的 DBR 单纵模光纤激光器^[14], 该激光器封装在隔温隔振盒中, 并配有精密温控单元, 可实现长期稳定的单纵模运转。光纤激光器的泵浦源为 975 nm 的激光二极管 (LD), 由带有 250 kHz 调制带宽电流调制端口的控制单元驱动。光纤激光器的输出激光经隔离器 (ISO) 后, 由耦合比为 70:30 的光纤耦合器 (OC) 分为两路, 其中 30% 的一路由光电探测器 (PD)(Thorlabs, PDA10CF-EC) 探测, 转换的电信号与参考电压比较, 获取激光强度噪声, 再由反馈伺服电路产生抑制强度噪声所需的控制信号, 反馈到泵浦驱动的电流调制端口, 通过实时调控激光输出功率抑制激光器强度噪声。而 70% 的一路则作为激光器输出端, 并通过光电探测器和频谱仪实时监测激光器强度噪声的抑制效果。反馈伺服控制单元由比例积分 (PI) 控制器和移相网络构成。PI 控制器为商用伺服控制器 (New Focus, LB1005), 移相网络由电阻 R_1 与电容 C 并联后, 再与另一电阻 R_2 串联构成, 通过调节电阻值该网络能在特定频段产生相位超前, 故所用电阻器均为精密可调电阻, 以适用于具有不同弛豫振荡频率激光器的噪声抑制。

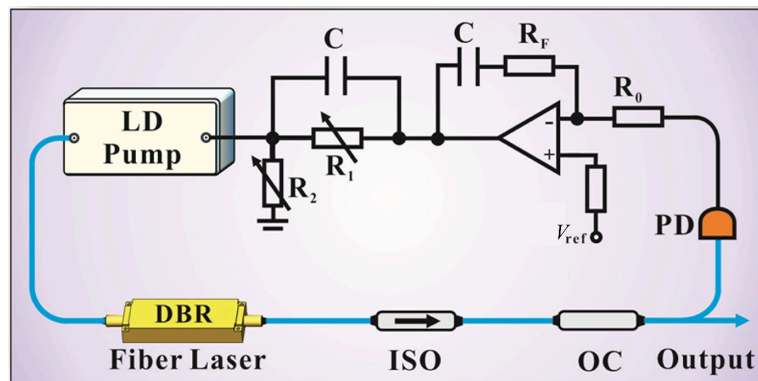


图1 光电反馈抑制单纵模 DBR 光纤激光器强度噪声的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for suppressing intensity noise of single-longitudinal-mode DBR fiber laser with photoelectric feedback

2 结果与讨论

为优化设计光电反馈电路参数以获取最佳强度噪声抑制效果, 需要测量出 DBR 光纤激光器的响应特性。为此, 首先测量了自由运转光纤激光器的相对强度噪声 (RIN) 谱, 结果如图 2(a) 所示, 由图可见, 激光器弛豫振荡频率随着泵浦功率增大而向高频移动^[15]。为确保激光器弛豫振荡频率处在泵浦驱动的调制带宽之内, 将激光器泵浦功率固定在 65 mW, 对应的弛豫振荡频率为 161 kHz。此时, 测量得到如图 2(b) 所示的激光器泵浦扰动到激光输出功率波动的传递函数幅频和相频响应特性。由图 2(b) 可见: 在低频段传递函数幅频和相频响应都较为平坦; 在 161 kHz 弛豫振荡频率处, 幅频响应出现峰值, 比低频段幅度高出 20 dB, 相频响应则发生 180° 的突变; 而在高于 161 kHz 后, 幅频和相频响应幅度都呈较快下降趋势。相频响应幅度不平坦的原因在于泵浦驱动的 250 kHz 响应带宽, 它相当于一个低通滤波器, 其相频响应特性将近似以 -45° 每十倍频的下降趋势, 叠加到测得的激光器传递函数在 25 kHz ~ 2.5 MHz 范围内的相频响应上。

PID 反馈控制电路传递函数的一般形式为 $G_c(j\omega) = K_p + K_i/(j\omega) + j\omega K_d$, 式中 K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例、积分和微分的增益。该传递函数的幅频响应从低频到高频表现为先减小后保持不变再增大的趋势, 通过改变控制器参数, 增益发生变化 (即“拐点”) 的频率也随之改变, 而相位则会在拐点频率的前后十倍频内发生 90° 的线性变化, 尽管调节微分电路参数可在弛豫振荡频率处提供超前相位, 但在高于此频率后却会提供更

大的超前相位, 恶化激光器的高频强度噪声。因此, 本研究选用只包含 PI 电路的伺服控制器, 实验测得其传递函数如图 3(a) 所示, 可见其拐点频率 f_{PI} 约为 1 kHz。尽管改变控制器参数可改变 f_{PI} , 但相频响应曲线仅会整体移动, 在拐点附近的线性变化趋势保持不变, 由此可见, 该 PI 控制器由比例电路和积分电路组成, 其中比例电路仅提供增益, 但不改变信号的相位, 而积分电路只能提供滞后的相位, 因此, 该控制器只能为反馈系统提供所需的增益, 而无法在弛豫振荡频率处提供相位补偿, 必须额外引入移相网络。

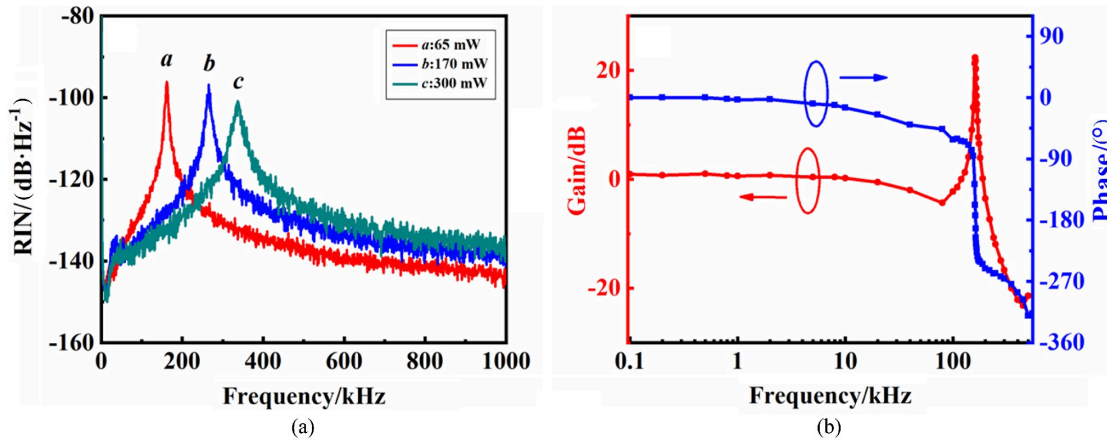


图 2 (a) 不同泵浦功率下激光器的相对强度噪声; (b) 激光器泵浦传递函数的频率响应特性

Fig. 2 (a) Relative intensity noise (RIN) of laser in different pump power; (b) Frequency response characteristics of laser's pump transfer function

为此, 设计了具有 $G(j\omega) = (1 + j\omega\alpha T) / [\alpha(1 + j\omega T)]$ 传递函数的一阶相位超前移相网络, 其中, $\alpha = (R_1 + R_2) / R_2$ 为衰减因子, $1/T = (R_1 + R_2) / (CR_1R_2)$ 为传递函数的极点, 该网络在频率 $\omega_m = (\sqrt{\alpha} T)^{-1}$ 处达到最大值 $\phi_m = \sin^{-1}[(\alpha - 1) / (\alpha + 1)]$ 。通过采用 Multisim 软件, 基于图 2(b) 和图 3(a) 所示的幅频和相频响应特性, 模拟得到了构成该移相网络的电子器件参数 $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 200 \Omega$, $C = 1 \text{ nF}$ 。并由此搭建了移相网络, 图 3(b) 为实测的该网络在 100 Hz ~ 8 MHz 内的频率响应特性。可见, 在低频段幅频响应较低, 高于 10 kHz 后以约 20 dB/十倍频的斜率增加, 至 1 MHz 后增加的斜率趋于平缓, 以适应图 3(a) 所示的商用 PI 控制器在幅值上的匹配。该移相网络在低频和高频段均不提供相位变化, 但在对应于弛豫振荡峰的 30 kHz ~ 1 MHz 频段内将提供较大相位超前角, 在 200 kHz 处最大相位超前角约为 51°。通过改变移相网络的电阻值, 可根据弛豫振荡频率位置调节相位补偿所对应的频率。

当将商用 PI 伺服反馈电路和一阶移相网络作为反馈控制单元用作激光器光电反馈系统时, 实验测量了反馈控制系统的开环传递函数, 即从泵浦电流调制端口经过激光器到控制信号输出的传递函数, 该传递函数理论上为泵浦传递函数与反馈控制单元传递函数的卷积。图 4 为当商用 PI 伺服器 $f_{PI} = 1 \text{ kHz}$ 且增益为 15 dB 时的实际测量结果, 可见, 带有移相网络的反馈系统在弛豫振荡频率 (161 kHz) 处增益达到约 20 dB 的最大值, 与图 2(b) 对比可见, 接入移相网络导致激光器弛豫振荡频率附近的相位超前约 45°。

图 5 为实际所测采用带有移相网络的光电反馈法抑制激光器强度噪声弛豫振荡的实验结果。相比于自由运转激光器的强度噪声谱 (黑色), 若仅采用商用伺服控制电路, 激光器强度噪声的弛豫振荡峰可由 -95 dB/Hz 降至约 -115 dB/Hz (蓝色), 即抑制了约 20 dB; 而加入移相网络后, 该弛豫振荡峰的噪声水平可降至约 -125 dB/Hz (红色), 抑制幅度高达约 30 dB, 比不加移相网络时改善了 10 dB, 这是因为引入的移相网络增大

了系统的增益裕度, 使得在保证系统稳定的前提下控制器能提供更大的增益, 从而进一步改善抑制效果, 该结果与文献[13]所得抑制结果相仿。因此, 针对这种在弛豫振荡频率处存在 180° 相位突变的 DBR 单纵模光纤激光器, 通过采用移相网络将反馈环路的相位超前以补偿这种相位突变, 可以有效地改善弛豫振荡噪声的抑制效果。

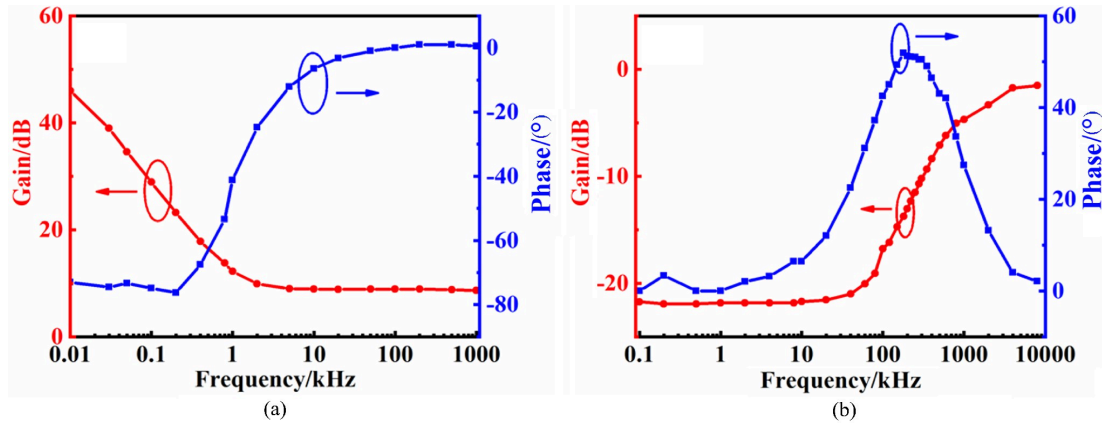


图 3 (a) PI 伺服控制器的频率响应特性; (b) 一阶移相网络的频率响应特性

Fig. 3 (a) Frequency response characteristic of PI servo controller; (b) Frequency response characteristic of the first-order phase shift network

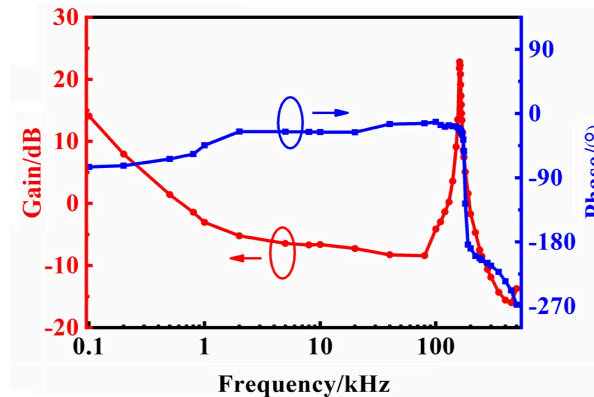


图 4 系统开环传递函数的频率响应

Fig. 4 Frequency response of the system open loop transfer function

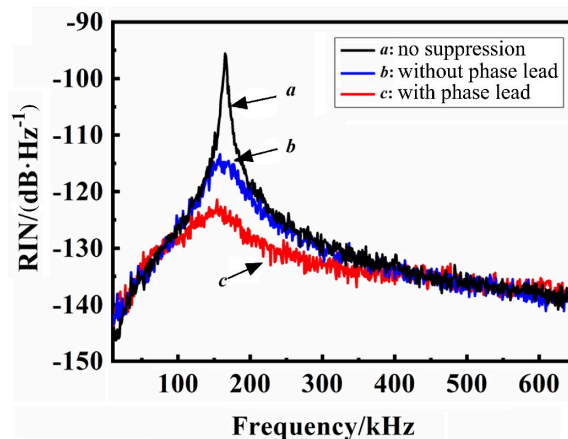


图 5 单纵模 DBR 光纤激光器抑制前后的相对强度噪声谱

Fig. 5 Relative intensity noise spectra of single-longitudinal-mode DBR fiber laser before and after suppression

3 结 论

报道了以光电反馈系统抑制DBR单纵模光纤激光器的弛豫振荡噪声的结果。实验测得DBR激光器泵浦振动至输出功率传递函数在弛豫振荡频率处存在 180° 相位突变,而商用PI伺服控制器无法在特定频率处提供相位超前,使得弛豫振荡噪声的抑制效果有限,通过在PI控制器后引入移相网络对激光器弛豫振荡处的相位突变进行补偿,可改善噪声抑制效果。本研究依据测得的激光器和商用PI控制器传递函数特性,设计并构建了一阶移相网络,在弛豫振荡频率处提供 45° 相位超前,以补偿激光器在该频率处的相位突变。采用带有移相网络的光电反馈系统后,激光器弛豫振荡峰由自由运转下的 -95 dB/Hz降至约 -125 dB/Hz,抑制幅度高达约 30 dB,抑制后的光纤激光器有望在精密测量等应用中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] Geng J H, Spiegelberg C, Jiang S B. Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(9): 1827-1829.
- [2] An Y Y, Wang Z D, Jing X, *et al.* Research on continuous fiber laser coherent wind radar technology [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, 15(3): 174-179.
安晏阳,王振东,靖旭,等.连续光纤激光相干测风雷达技术研究[J].大气与环境光学学报,2020,15(3):174-179.
- [3] Okoshi T. Recent advances in coherent optical fiber communication systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(1): 44-52.
- [4] Cranch G A, Foster S, Kirkendall C K. Fiber laser strain sensors: Enabling a new generation of miniaturized high performance sensors [C]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7503: 750352.
- [5] Ma L N, Hu Z L, Liang X, *et al.* Relaxation oscillation in Er^{3+} -doped and $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ co-doped fiber grating lasers [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(10): 1979-1985.
- [6] Xiao Y, Li C, Xu S H, *et al.* Simultaneously suppressing low-frequency and relaxation oscillation intensity noise in a DBR single-frequency phosphate fiber laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(6): 064205.
- [7] Feng Z, Li C, Xu S, *et al.* Suppression of the low frequency intensity noise of a single-frequency Yb^{3+} -doped phosphate fiber laser at 1083 nm [J]. *Laser Physics*, 2014, 24(6): 065106.
- [8] McCoy A D, Fu L B, Ibsen M, *et al.* Intensity noise suppression in fibre DFB laser using gain saturated SOA [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(2): 107-109.
- [9] Ralph T C, Huntington E H, Harb C C, *et al.* Understanding and controlling laser intensity noise [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1999, 31(5): 583-598.
- [10] Ball G A, Morey W W, Hull-Allen G, *et al.* Low noise single frequency linear fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(18): 1623.
- [11] Zhang J, Ma H L, Wang R L, *et al.* Suppression of intensity noise of LD-pumped single-frequency ring Nd:YVO₄ lasers by opto-electronic feedback [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(9): 1031-1035.
张靖,马红亮,王润林,等.光电负反馈抑制全固化单频激光器的强度噪声[J].光学学报,2001,21(9):1031-1035.

- [12] Liang X, Wang Y X, Qiu Q, *et al.* Intensity noise properties and suppression of nonplanar ring oscillator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1202006.
梁旭, 王云祥, 邱琪, 等. 非平面环形腔激光器的强度噪声及其抑制 [J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202006.
- [13] Zhang F, Zhu J, Wang H, *et al.* Intensity noise of erbium doped fiber laser at low frequency suppression through optoelectronic feedback [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(3): 311-315.
张飞, 朱军, 汪辉, 等. 光电反馈抑制掺铒光纤激光器的低频强度噪声 [J]. 量子电子学报, 2012, 29(3): 311-315.
- [14] Yao B, Chen Q F, Chen Y J, *et al.* 280 mHz linewidth DBR fiber laser based on PDH frequency stabilization with ultrastable cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501014.
姚波, 陈群峰, 陈雨君, 等. 基于超稳腔 PDH 稳频的 280 mHz 线宽 DBR 光纤激光器 [J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501014.
- [15] Wang P P, Chang J, Zhu C G, *et al.* The relative intensity noise and relaxation oscillation characteristics of a distributed-feedback fiber laser [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(9): 095108.