

文章编号 2097-1842(2024)05-1035-07

# 光纤布拉格光栅长外腔反馈半导体激光器特性研究

张云豪<sup>1</sup>, 刘奎<sup>1,2</sup>, 郅江瑞<sup>1,2</sup>, 王军民<sup>1,2\*</sup>

(1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室 山西大学 光电研究所, 山西 太原 030006;  
2. 极端光学省部共建协同创新中心 山西大学, 山西 太原 030006)

**摘要:**窄线宽激光器是光谱学和精密计量学等实验的基本组成部分。由于半导体激光器对外部光学反馈十分敏感,所以可以利用光反馈的高带宽抑制半导体激光器的相位噪声,进而压窄线宽。本文采用光纤布拉格光栅作为反馈元件,搭建了长外腔反馈回路。为了降低外界环境温度起伏和气流扰动的影响,对反馈光路的光纤控温,使得1小时内最大温度起伏从0.039°C降低到0.003°C。此外,测试了反馈带宽对激光线宽的影响,尽管实验所用光纤布拉格光栅的带宽远大于自由运转的激光线宽,但仍然可以观察到激光线宽被压窄,且光纤光栅的带宽越小,激光线宽越窄。对于此现象,分析认为在反馈回路中应该存在一种负反馈机制,可以将激光线宽稳定到反馈光谱的某个斜率处,所以光纤光栅的反馈带宽越窄,反馈光谱的斜率越大,反馈越灵敏。通过调整光纤光栅的反馈功率在0~1 mW范围内改变,观察到当反射功率为0.8 mW时,光反馈将激光线宽从自由运转的100.5 kHz压窄到最窄的11.5 kHz,0.2 kHz~2 MHz范围内的相位噪声降低约20 dB。

**关键词:** 半导体激光器; 长外腔; 光反馈; 相位噪声抑制; 线宽压窄

中图分类号: O432.1+2 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0016

## Characteristics of a distributed feedback diode laser with feedback from a fiber-Bragg-grating-based long external cavity

ZHANG Yun-hao<sup>1</sup>, LIU Kui<sup>1,2</sup>, GAO Jiang-ru<sup>1,2</sup>, WANG Jun-min<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

\* Corresponding author, E-mail: wwjjmm@sxu.edu.cn

**Abstract:** Narrow linewidth lasers are the basic components of spectroscopy, precision metrology, and other experiments. Because diode lasers are very sensitive to external optical feedback, the phase noise of diode lasers, can be suppressed by using a high optical feedback bandwidth, enabling the narrowing of the linewidth. In the paper, we use fiber Bragg grating (FBG) as a feedback element and builds a long external cavity feedback loop. In order to reduce the influence of temperature fluctuation of external environment and air flow disturbance, the temperature of the optical fiber is controlled. Then, the maximum temperature fluctuation

收稿日期: 2024-01-15; 修订日期: 2024-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 11974226); 山西省基础研究计划资助项目(No. 202403021211013)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11974226); Foundation Research Program of Shanxi Province (No. 202403021211013)

tuation within 1 hour is reduced from 0.039 °C to 0.003 °C. In addition, the effect of feedback bandwidth on laser linewidth is also tested. Although the bandwidth of the FBG used in the experiment is much larger than the free-running laser linewidth, a narrowing of the laser linewidth is still observed. The smaller the FBG bandwidth, the narrower the laser linewidth. For this phenomenon, we believe that there should be a negative feedback mechanism in the feedback loop, which can stabilize the laser linewidth to a certain slope of the feedback spectrum. Therefore the narrower the feedback bandwidth of the fiber grating, the larger the slope of the feedback spectrum, and the more sensitive the feedback. In addition, by changing the feedback power of FBG in the range of 0~1 mW, it is observed that at the reflected power of 0.8 mW, the optical feedback narrows the laser linewidth from the free-running 100.5 kHz to the narrowest 11.5 kHz, and phase noise in the range of 0.2 kHz to 2 MHz is reduced by about 20 dB.

**Key words:** semiconductor laser; long external cavity; optical feedback; phase noise suppression; linewidth narrowing

## 1 引言

光反馈是指将激光器的一部分出射光反馈回激光器以改变激光器的运行状态。由于半导体激光器对反馈光很敏感<sup>[1]</sup>,因此,可以利用这个特性压窄半导体激光器的线宽。学者们相继提出一些压窄线宽的方法。其中,KAPASI D P<sup>[2]</sup>等人提出了一种闪耀光栅反馈方案,但该方案中光栅易受污染,对环境要求高。ZHAO Y<sup>[3]</sup>和刘云凤等<sup>[4]</sup>提出光学腔反馈方案,其一般使用超稳腔,难以实现频率连续调谐。RAUCH S<sup>[5]</sup>等人提出了体布拉格光栅,这种光栅虽然容易集成,但难以扩展外腔腔长。于是体积小、波长选择性好、兼容性好的光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)越来越多地被用于激光器的研制。

FBG 主要有以下几个优势:一是有良好的滤波能力,滤波后的光谱比入射光谱更窄,能有效影响到激光模式竞争;二是易于对光纤光路进行控温<sup>[6]</sup>,通过改变 FBG 的温度就可以实现频率的调谐;三是采用光纤光栅可以适当延长激光外腔,增加腔内光子寿命,从而压窄线宽。2015 年,潘碧玮等<sup>[7]</sup>采用拉锥光纤布拉格光栅,制作了 1.5 μm 波段 FBG 外腔式窄线宽半导体激光器,实测最小线宽为 6.42 kHz。2018 年,孙广伟等<sup>[8]</sup>研制了一种 1 550 nm 波段窄线宽低噪声的保偏 FBG-ECDL (external-cavity diode laser, ECDL),洛伦兹线宽为 4.85 kHz。2012 年,VLADAN VULETIĆ 小组<sup>[1]</sup>使用光纤延长了 DBR(distributed Bragg reflector,

DBR) 激光器的外腔长度,并将 DBR 激光器的洛伦兹线宽从 900 kHz 压窄到 300 Hz;2014 年,SAMUTPRAPHOOT P 等人采用相同方法,将紫外外腔半导体激光器的线宽从 200 kHz 压窄到 2 kHz<sup>[9]</sup>。

本文将 FBG 作为光学反馈元件,借助光纤光栅的滤波能力,并利用分布反馈式半导体激光器(distributed feedback laser diode, DFB-LD)的尾纤和光纤布拉格光栅(FBG)的尾纤构建了长外腔反馈光路,并进行实验验证。

## 2 光纤布拉格光栅

FBG 只对满足布拉格条件的波长产生强烈反射,其余波长的光通过 FBG 后的衰减很小。1978 年,Hill K O 等人<sup>[10]</sup>首先发现了掺锗光纤的紫外光敏特性,并展示了在光纤纤芯制作光栅的可行性。现在可采用飞秒脉冲激光直写技术或者相位掩模法,通过使光纤纤芯区折射率产生周期性调制制作 FBG,其反射中心波长 $\lambda_B$ (布拉格波长)为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

其中, $n_{\text{eff}}$ 为光纤纤芯折射率, $\Lambda$ 为光栅区域的折射率周期。图 1(彩图见期刊电子版)为反射式 FBG 示意图。其中,FBG 只反射入射光谱中很窄的一部分,其他波长成分可几乎无损耗地通过 FBG,因此,可以利用 FBG 的滤波特性进行外腔滤波光反馈。

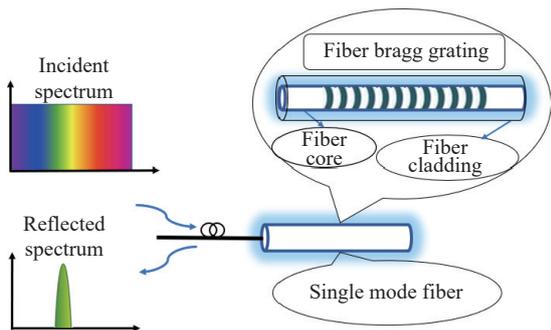


图 1 FBG 结构和测试示意图

Fig. 1 Schematic of FBG structure and test

### 3 长外腔光反馈

#### 3.1 光路搭建与控温装置

由于采用 FBG 作为反馈元件, 并且采用 DFB-LD 作为光纤输出, 导致反馈光路很长, 环境温度和气流振动的影响无法忽略, 所以需要尽可能地缩短空间光路的长度, 并对光纤部分进行控温。

光路设置如图 2 所示。其中, 第一部分为长外腔反馈光路, 使用的激光器为 1560 nm DFB-LD。反馈光路包括: DFB 激光器输出端尾纤, 长度为 1 m, 空间光路, 长为 0.3 m, FBG 反馈端光纤, 长为 1 m。图 2 中: TCB 为控温盒 (temperature-controlled box), 分别对 DFB 的尾纤和 FBG 反馈端的光纤进行控温; PM 为功率计 (power meter), 用来测量 FBG 反射的激光功率; 灰色方块 PZT 为压电陶瓷, 安装在输入耦合头 (input coupler) 的调整架上, 用来测试激光器频率的连续调谐范围。第二部分是激光相位噪声测量光路, 主要元件是一个自由光谱区为 250 MHz, 腔线宽为 120 kHz 的 FP 腔。通过将腔长锁定在 FP 腔透射峰的半高处, 可以将激光的相位噪声转换为强度噪声, 并通过腔反射场进行测量。第三部分是光纤延时声光频移自差拍法激光线宽测量光路<sup>[1]</sup>, 其中: 延时光纤 TDF (time-delay fiber) 长度为 50 km, 另一路经声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 移频 80 MHz。

图 3 是 TCB2 中两段光纤在控温和不控温两种情况下的温度起伏, 测试时间均为 1 小时。可见, 在不控温情况下, 温度曲线毛刺较多, 最大温度起伏为 0.039 °C。而在控温情况下, 光纤的温度曲线相对平滑, 最大温度起伏为 0.003 °C。这说明控温装置在一定程度上降低了光纤的温度起伏, 而且残余温度起伏可以通过调节 PID 进行优

化。接下来的实验, 都是在控温条件下完成的。

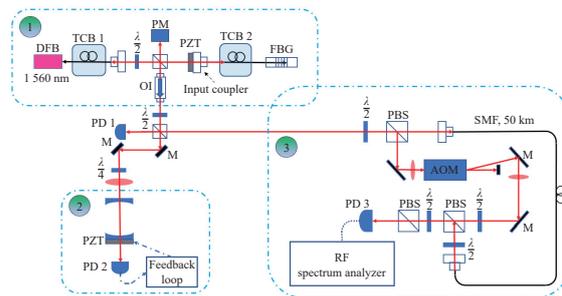


图 2 具有光反馈的完整激光系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of complete laser system with optical feedback

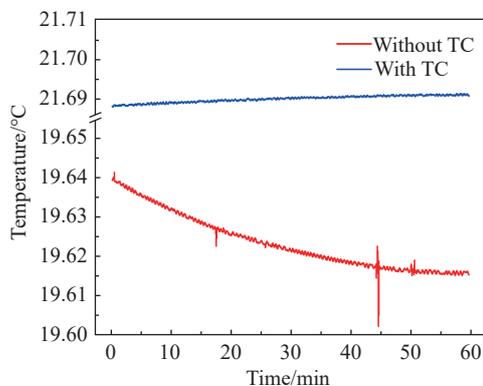


图 3 两种条件下两段光纤的温度起伏

Fig. 3 Temperature fluctuations of two optical fibers under the conditions with and without temperature control

#### 3.2 激光线宽的测量

本文采用光纤延时声光频移自差拍法测量激光线宽, 测得激光线宽从自由运转的 100.5 kHz 压窄到最窄 11.5 kHz。

由于第一个 DFB-LD 中有内置光隔离器, 会损耗反馈光, 所以之后使用无内置光隔离器的 DFB-LD 进行实验。测试用延时光纤长 50 km, 光纤长度大于待测激光相干长度的 6 倍, 满足测量激光线宽的最低需求。移频光路中采用 AOM 移频 80 MHz, 使拍频频率处的背景噪声更低, 实验所用频谱分析仪为 Agilent 公司的 E4405B, 9 kHz~13.2 GHz。

先用 Voigt 函数拟合拍频谱, 分别得到高斯成分的半高全宽  $\Delta_G$  和洛伦兹成分的半高全宽  $\Delta_L$ , 若高斯成分和洛伦兹成分均有, 则分别用拟合结果中高斯成分的半高全宽的  $1/\sqrt{2}$  计算高斯线宽, 洛伦兹成分的半高全宽的  $1/2$  计算洛伦兹线宽, 然后经下式计算得综合线宽<sup>[12]</sup>:

$$\Delta\nu = \frac{1}{2} \left( 1.069 2\Delta_L + \sqrt{0.866 39\Delta_L^2 + 4\Delta_G^2} \right). \quad (2)$$

若高斯(洛伦兹)线宽成分很少,就换用洛伦兹(高斯)函数拟合,然后拟合曲线的 3dB 带宽的  $1/\sqrt{2}$ (高斯函数拟合)或  $1/2$ (洛伦兹函数拟合),即为激光线宽。

以图 4(彩图见期刊电子版)所示的自由运转时的拍频谱为例,先用 Voigt 函数进行拟合,发现激光线宽的高斯成分相对洛伦兹成分来说极少,故只用洛伦兹函数拟合,得到激光自由运转的线宽为 100.5 kHz。

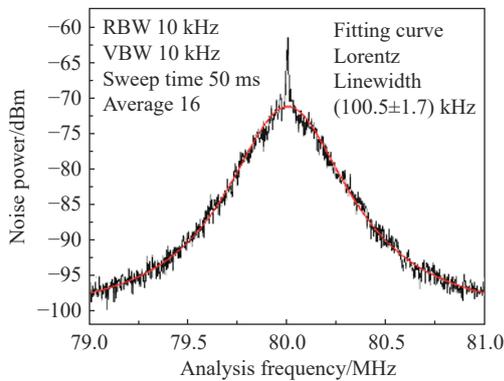


图 4 激光器自由运转的拍频谱

Fig. 4 The beat note of the laser during free-running spectrum

然后,测量了有光反馈时激光器的线宽,图 5(彩图见期刊电子版)为利用 0.130-nm 带宽的 FBG 作为反馈元件,在反射功率为 0.8 mW 时的拍频谱,由 voigt 函数拟合出高斯成分的半高全宽  $\Delta_G = (3.6 \pm 2.9)$  kHz,洛伦兹成分的半高全宽  $\Delta_L = (10.3 \pm 0.8)$  kHz,由式(2)计算出总的激光线宽为  $(11.5 \pm 3.4)$  kHz。

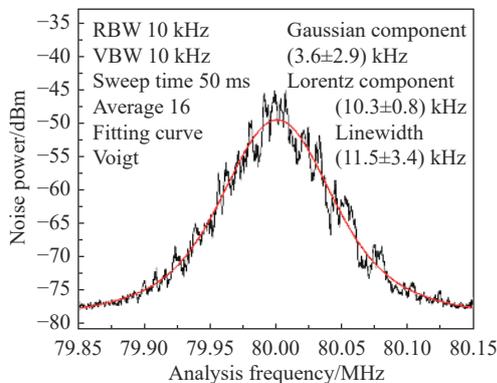


图 5 0.130-nm 带宽 FBG 在反射功率为 0.8 mW 时的拍频谱

Fig. 5 The beat note spectrum of 0.130-nm bandwidth FBG at reflected power of 0.8 mW

根据文献 [13] 知,光反馈的线宽和外腔长度之间存在以下关系:

$$\Delta\nu = \frac{v_g^2 n_{sp} h\nu (1 + \alpha^2) \ln\left(\frac{1}{R_m}\right)^2}{8\pi P_0 \eta L^2}, \quad (3)$$

其中,  $n_{sp}$  是自发辐射因子,  $h$  为普朗克常量,  $\nu$  为光子频率,  $L$  是腔长,  $P_0$  为端面功率,  $v_g$  为光子群速率,  $\eta$  为量子效率,  $R_m$  为端面反射率,  $\alpha$  为工作物质折射率的实部变化量与虚部变化量之比。若其它条件不变,激光线宽与激光腔的腔长为反比关系,故延长激光器外腔,可以在一定程度上压窄激光线宽。由此得到:

$$\frac{\Delta\nu_d}{\Delta\nu_b} = \left(\frac{D}{d}\right)^2. \quad (4)$$

虽然实验中只有一个长外腔,但通过式(4)判断 FBG 的滤波带宽是否对激光线宽压窄有贡献。取自由运转线宽  $\Delta\nu_d = 100.5$  kHz, FBG 有光反馈时的最窄线宽  $\Delta\nu_b = 11.5$  kHz,激光外腔长度  $D = 2.3$  m,估算得  $d \approx 0.778$  m,但实际上 100.5 kHz 是自由运转的线宽,没有外腔反馈。所以,从实验结果可推测,FBG 的滤波效果对激光的线宽压窄是有贡献的。

### 3.3 FBG 滤波带宽对反馈效果的影响

为了研究 FBG 滤波带宽对激光线宽压窄的贡献,使用带宽分别为 0.130 nm 和 0.195 nm 的两支 FBG 分别作为反馈元件进行对比实验,观察激光线宽随 FBG 反射功率的变化情况。发现窄带宽 FBG 的线宽压窄效果更好。

两个具有不同带宽的 FBG 各自的反射率随波长变化情况如图 6(彩图见期刊电子版),其中红线和蓝线分别表示滤波带宽为 0.195 nm 和 0.130 nm 的 FBG 反射率的拟合曲线。 $\lambda_B$  为布拉格波长,  $R_{MAX}$  为布拉格波长处的反射率。两个 FBG 都是由筱晓光子购买得到,采用掩模版法制作。以实测 0.130 nm 半高全宽、中心波长为 1560.53 nm 的 FBG 为例,卖方标注参数如下:光纤类型为 SMF 28e;中心波长为 1560.53 nm;半高全宽为 0.130 nm;透射损耗为 20.35 dB;反射率为 99.1%;FBG 总长度为 2.04 m。

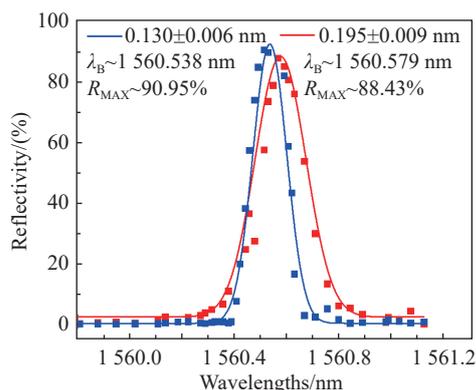


图 6 两个 FBG 的反射率随波长的变化

Fig. 6 The reflectivity of two FBGs vary with wavelength

激光线宽随两个不同带宽的 FBG 反射功率的变化情况如图 7(彩图见期刊电子版)所示, 带宽为 0.195 nm 的 FBG 的反馈效果对应红色折线, 带宽为 0.130 nm 的 FBG 的反馈效果对应蓝色折线。由此实验结果可见: (1)在测试范围内, 0.130 nm 带宽的 FBG 的反馈效果优于带宽为 0.195 nm 的 FBG, 且反馈效果基本稳定, 说明窄带宽的 FBG 的滤波效果更好; (2)0.195 nm 带宽的 FBG, 在反射功率大于 0.6 mW 后, 激光线宽反而增大。这可能是因为反馈功率越高, 由反馈光引入的外界噪声越多。

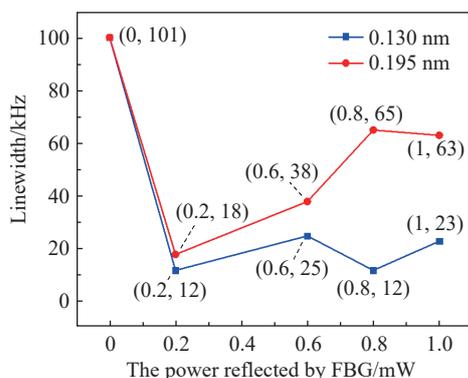


图 7 激光线宽随两个不同带宽的 FBG 的反射功率的变化情况 (0.130 nm 和 0.195 nm)

Fig. 7 The laser linewidth varies with the reflected power of two FBGs with different bandwidths (0.130 nm and 0.195 nm)

根据文献 [14] 知, FBG 的滤波带宽之所以会影响激光线宽, 可能是系统中形成了一个负反馈机制, 具体如下: (1)由于某些原因, 激光频率向高(低)频偏移; (2)滤波器反射率增大(减小); (3)反射的反馈光的电场振幅增大(减小); (4)激光腔内的光子密度增加(减少); (5)激光腔内的自发辐射

的载流子密度减小(增大); (6)通过载流子等离子体效应, 激光腔的折射率增加(减小); (7)激光频率向低(高)侧偏移。所以, 滤波器的带宽越窄, 其滤波光谱斜边的斜率就越大, 这个负反馈机制就越灵敏, 激光的线宽就越窄。

### 3.4 激光频率连续调谐范围测试

对于激光频率连续调谐范围进行测试, 本文通过扫描 FBG 处的 PZT, 观察 FP 腔的透射峰, 将三角波电压的一个上升沿或一个下降沿内扫过的自由光谱区数  $N$  与 FSR 的乘积作为激光器的频率连续调谐范围。由于 FP 腔的自由光谱区(FSR)为 250 MHz, 所以在无光反馈时, 测得激光器的频率连续调谐范围大于 2.25 GHz, 有光反馈时频率连续调谐范围约为 1.5 GHz。

### 3.5 激光相位噪声

首先, 分析了激光的相位噪声与线宽的关系, 然后使用 FP 腔将激光的相位噪声转化为强度噪声, 并用频谱分析仪进行测量, 发现激光的高频相位噪声降低了约 20 dB。

对于激光器的线宽和相位噪声之间的关系, 根据文献 [15], 激光线宽的表达式为

$$FWHM = (8 \ln(2)A)^{1/2} \quad (5)$$

其中,  $A$  为频率噪声谱密度  $S_{\delta\nu}(f)$  大于  $\beta$  分子线  $8 \ln(2)f/\pi^2$  的噪声分量面积:

$$A = \int_{1/T_0}^{\infty} H(S_{\delta\nu}(f) - 8 \ln(2)f/\pi^2) S_{\delta\nu}(f) df \quad (6)$$

其中,  $H(x)$  为单位阶梯函数, 当  $x > 0$  时, 有  $H(x) = 1$ ; 当  $x < 0$  时, 有  $H(x) = 0$ 。又因为激光线宽不能为零, 故  $H(x) = 1$ , 则

$$A = \int_{1/T_0}^{\infty} S_{\delta\nu}(f) df \quad (7)$$

由于频率是相位的微分, 相位噪声和频率噪声的谱密度函数存在以下关系:

$$S_{\nu}(f) = f^2 S_{\varphi}(f) \quad (8)$$

则有

$$FWHM = \left( 8 \ln(2) \int_{1/T_0}^{\infty} f^2 S_{\varphi}(f) df \right)^{1/2} \quad (9)$$

所以激光的相位噪声降低, 光线宽也会变窄。

相位噪声的测量方法<sup>[16]</sup>如下: 慢扫描 FP 腔, 当腔长扫过 FP 腔的透射峰时, 相位噪声会向强

度噪声转化,在腔长处于 FP 腔透射峰的半高处时,FP 腔反射场的相位噪声最大程度地转化为强度噪声。

图 8(彩图见期刊电子版)是分析频率为 1 MHz 处,激光相位噪声向强度噪声转化的曲线,红色折线和蓝色折线的 M 型部分分别代表 FBG 无反射光和 FBG 反射光为 1 mW 时,激光相位噪声向强度噪声的转化过程。可见,在 M 的峰顶处,FP 腔反射场的相位噪声最大程度地转化为强度噪声。对比两个曲线的峰值,可以发现激光的相位噪声降低了约 20 dB。

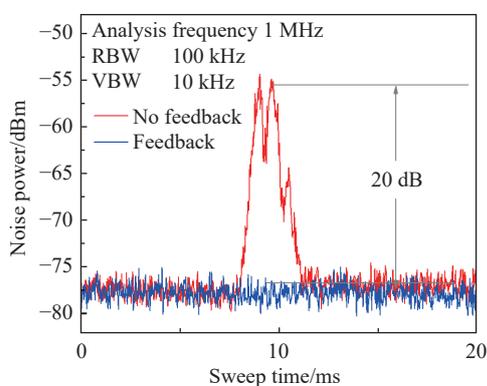


图 8 相位噪声向强度噪声转化的曲线

Fig. 8 Curve of phase noise conversion to intensity noise

分别测量 FBG 无反射光,以及反射光功率分别为 0.2、0.6 及 1 mW 时,0~2 MHz 分析频率范围内的相位噪声,如图 9(彩图见期刊电子版)所示。在 PD1 前挡光时测量了电子学噪声。可见,光反馈对频率高于 200 kHz 的相位噪声有明显的抑制效果,相对于无光反馈时,相位噪声降低了约 20 dB。

#### 参考文献:

- [1] LIN Q, VAN CAMP M A, ZHANG H, *et al.* Long-external-cavity distributed Bragg reflector laser with subkilohertz intrinsic linewidth[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1989-1991.
- [2] KAPASI D P, EICHHOLZ J, MCRAE T, *et al.* Tunable narrow-linewidth laser at 2  $\mu\text{m}$  wavelength for gravitational wave detector research[J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3280-3288.
- [3] ZHAO Y, LI Y, WANG Q, *et al.* 100-Hz linewidth diode laser with external optical feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(20): 1795-1798.
- [4] 刘云凤, 梁伟. 自注入锁定外腔超窄线宽半导体激光[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1715001.  
LIU Y F, LIANG W. Compact narrow linewidth external cavity semiconductor laser realized by self-injection locking to Fabry-Perot cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1715001. (in Chinese).
- [5] RAUCH S, SACHER J. Compact Bragg grating stabilized ridge waveguide laser module with a power of 380 mW at 780 nm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1737-1740.
- [6] KONG J, LUCIVERO V G, JIMÉNEZ-MARTÍNEZ R, *et al.* Long-term laser frequency stabilization using fiber

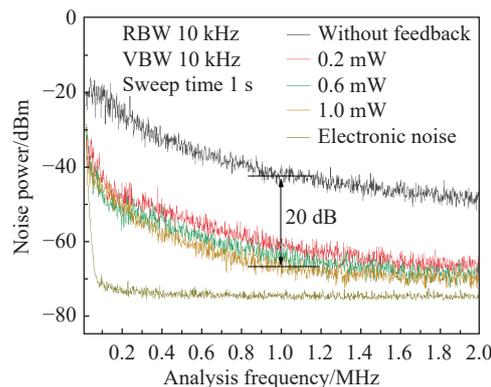


图 9 激光位相噪声功率的频域分布

Fig. 9 Frequency domain distribution of laser phase noise power

## 4 结 论

为了降低激光相位噪声,压窄激光线宽,本文采用 FBG 作为滤波反馈元件,搭建了长外腔光反馈系统,相较于传统光纤激光器成本更低,结构更简单,而且外腔长度和滤波元件可以根据具体需求进行更改,扩展性强。本实验将 0.2~2 MHz 分析频率范围的激光相位噪声降低了约 20 dB,将激光线宽从自由运转的约 100.5 kHz 压窄到约 11.5 kHz。由于激光高频相位噪声被光反馈明显抑制,而激光的低频相位噪声仍然较高,所以进一步压窄线宽的主要方向是降低激光的低频相位噪声。这可以通过稳定反馈光相位实现,例如提高控温装置的控温精度、将反馈光的相位稳定到外部参考标准上、使用滤波带宽更窄的滤波器等。频率连续调谐方面,可以通过改善光纤控温和设计电子学反馈回路来优化。

- interferometers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(7): 073104.
- [7] 潘碧玮, 余力强, 陆丹, 等. 20 kHz 窄线宽光纤光栅外腔半导体激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0502007.  
PAN B W, YU L Q, LU D, *et al.*. 20 kHz narrow linewidth Fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0502007. (in Chinese).
- [8] 孙广伟, 魏芳, 张丽, 等. 基于保偏光纤光栅的低噪声外腔半导体激光器[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0601004.  
SUN G W, WEI F, ZHANG L, *et al.*. Low-noise external cavity semiconductor lasers based on polarization-maintaining fiber Bragg gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0601004. (in Chinese).
- [9] SAMUTPRAPHOOT P, WEBER S, LIN Q, *et al.*. Passive intrinsic-linewidth narrowing of ultraviolet extended-cavity diode laser by weak optical feedback[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11592-11599.
- [10] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [11] 白建东, 王杰英, 王军民. 基于光纤延时声光频移自差拍法快速测量激光线宽[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 061407.  
BAI J D, WANG J Y, WANG J M. Rapid measurement of laser linewidth based on Fiber-Delayed AOM-shifted self-heterodyne scheme[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061407. (in Chinese).
- [12] 尹增谦, 武臣, 宫琬钰, 等. Voigt 线型函数及其最大值的研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(12): 123301.  
YIN Z Q, WU CH, GONG W Y, *et al.*. Voigt profile function and its maximum[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(12): 123301. (in Chinese).
- [13] HENRY C. Phase noise in semiconductor lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(3): 298-311.
- [14] AOYAMA K, YOKOTA N, YASAKA H. Strategy of optical negative feedback for narrow linewidth semiconductor lasers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 21159-21169.
- [15] 齐翔羽. 窄线宽半导体激光器相频噪声和线宽特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.  
QI X Y. *Research on phase-frequency noise and linewidth characteristics of narrow linewidth semiconductor laser*[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese).
- [16] 张云, 张天才, 李廷鱼, 等. 法布里-珀罗腔对相位噪声测量的影响[J]. *光学学报*, 2000, 20(4): 465-471.  
ZHANG Y, ZHANG T C, LI T Y, *et al.*. Phase noise measurement by F-P cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(4): 465-471. (in Chinese).

#### 作者简介:



张云豪(1997—), 男, 山西长子人, 2019年于太原师范学院获得学士学位, 现为山西大学光学专业硕博连读研究生, 主要从事激光技术、量子精密测量方面的研究。E-mail: [202312607033@email.sxu.edu.cn](mailto:202312607033@email.sxu.edu.cn)



王军民(1967—), 男, 山西河曲人, 理学博士, 教授, 博士生导师, 1992年、1999年于山西大学光学专业分别获得理学硕士学位、理学博士学位。目前主要从事量子光学、量子技术、量子精密测量、量子增强光泵原子磁强计、激光技术等方面的研究工作。E-mail: [wjjmm@sxu.edu.cn](mailto:wjjmm@sxu.edu.cn)