

# 基于保偏光纤光栅的低噪声外腔半导体激光器

孙广伟<sup>1,2</sup>, 魏芳<sup>1\*</sup>, 张丽<sup>1,2</sup>, 陈迪俊<sup>1</sup>, 张茜<sup>1,2</sup>, 陈高庭<sup>1</sup>, 辛国锋<sup>1</sup>, 皮浩洋<sup>1</sup>,  
杨飞<sup>1</sup>, 蔡海文<sup>1</sup>, 瞿荣辉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 研制了 1550 nm 波段的窄线宽、低噪声混合集成外腔半导体激光器, 将保偏光纤布拉格光栅 (FBG) 作为反馈元件与半导体增益芯片进行耦合, 并利用 FBG 斜边处的大群时延特性将半导体激光器的线宽压窄。所得到的蝶形封装激光器原型器件实现了稳定的单纵模、单偏振激光的保偏输出, 在 1 kHz 处积分线宽为 15.9 kHz 的输出功率  $\geq 30$  mW, 洛伦兹线宽为 4.85 kHz, 本征线宽为 4.06 kHz, 相对强度噪声  $\leq -155$  dB $\cdot$ Hz<sup>-1</sup>@1 MHz, 偏振消光比  $> 25$  dB, 无跳模电流调谐范围  $\geq 8$  GHz, 无跳模温度调谐范围  $\geq 14$  GHz, 6 h 功率稳定度为 1.7%, 频率漂移量  $< 50$  MHz。

**关键词** 激光器; 外腔半导体激光器; 窄线宽; 保偏光纤布拉格光栅; 蝶形封装

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0601004

## Low-Noise External Cavity Semiconductor Lasers Based on Polarization-Maintaining Fiber Bragg Gratings

Sun Guangwei<sup>1,2</sup>, Wei Fang<sup>1</sup>, Zhang Li<sup>1,2</sup>, Chen Dijun<sup>1</sup>, Zhang Xi<sup>1,2</sup>, Chen Gaoting<sup>1</sup>,  
Xin Guofeng<sup>1</sup>, Pi Haoyang<sup>1</sup>, Yang Fei<sup>1</sup>, Cai Haiwen<sup>1</sup>, Qu Ronghui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques of Shanghai, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A narrow-linewidth, low-noise hybrid integrated external cavity laser at 1550 nm is fabricated, the polarization maintaining fiber Bragg grating (FBG) as optical feedback component is coupled with the semiconductor gain chip, and the laser linewidth is reduced by the large group delay characteristics at the sloping side of the FBG reflectance spectrum. The butterfly-packaged laser realizes a single longitudinal mode and polarization-maintaining output of the single polarization laser, including the output power  $\geq 30$  mW with integral linewidth of 15.9 kHz at 1 kHz, the Lorentz linewidth of 4.85 kHz, the intrinsic linewidth of 4.06 kHz, the relative intensity noise  $\leq -155$  dB $\cdot$ Hz<sup>-1</sup> at 1 MHz, the polarization extinction ratio  $> 25$  dB, the current tuning range without mode hopping  $\geq 8$  GHz, the temperature tuning range without mode hopping  $\geq 14$  GHz, the power stability of 1.7% within 6 h, and the frequency variations  $< 50$  MHz.

**Key words** lasers; external cavity semiconductor lasers; narrow linewidth; polarization maintaining fiber Bragg gratings; butterfly package

**OCIS codes** 140.3570; 140.3600; 140.2020

收稿日期: 2017-10-26; 收到修改稿日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61775225, 61535014, 61405218, 61405212)、中国科学院实验室创新基金(CXJJ-17S010)

作者简介: 孙广伟(1980—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事集成光学器件方面的研究。E-mail: gwsun@siom.ac.cn

导师简介: 蔡海文(1975—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光精密变频控制、光纤时频传递及光纤传感方面的研究。E-mail: hwcai@siom.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: weifang@siom.ac.cn

# 1 引 言

随着低损耗光导纤维制作技术和光纤通信技术的发展,光纤传感技术得到了长足发展。相位敏感光时域反射计( $\Phi$ -OTDR)作为最具代表性的分布式光纤传感技术,在传感探测距离、事件定位精度、环境适应性等方面具有不可替代的优势,是现阶段光纤传感技术的重点发展方向<sup>[1]</sup>。 $\Phi$ -OTDR采用的是相干检测的接收机制,可获得远高于常规 OTDR 的灵敏度和信噪比,但同时传感激光光源的线宽和频率稳定性提出了更加严格的要求。光源的噪声特性直接决定了系统的探测距离、测量精度和误差,发展稳定可靠的低噪声、窄线宽、集成化、低成本光源对目前  $\Phi$ -OTDR 技术性能的进一步提升及工程应用推广至关重要。另外,低噪声、窄线宽、集成化激光光源在空间相干激光通信、引力波探测、高精度时频传递、合成孔径雷达等高精度激光应用领域也有着迫切的需求。

近年来,低噪声、窄线宽激光器得到了迅速发展,Nd:YAG 非平面环形腔(NPRO)固体激光器<sup>[2]</sup>、单频光纤激光器<sup>[3]</sup>、外腔半导体激光器(ECDL)等集成化、窄线宽激光器相继问世,其中集成化外腔半导体激光器具有超紧凑稳定的腔结构及极低的强度噪声( $< -140 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ),并且其相频噪声可通过外腔反馈技术进行抑制,在波长范围、发光效率、可靠性、稳定性及成本方面均具有明显优势,故在光纤传感领域有着广泛的应用前景。美国 Redfern Integrated Optics 公司利用硅基平面波导光栅(PWG)及半导体增益芯片(SOA)构成混合集成外腔半导体激光器输出稳定的单纵模激光,并实现了小型化蝶形封装,所输出激光的积分线宽在 kHz 量级,目前该种激光器以其结构集成度高、稳定性好等优点在光纤传感领域得到了广泛应用<sup>[4-7]</sup>;美国的 OEwaves Inc. 将由氟化钙制成的高品质因子回音壁模式谐振腔(WGMR)与分布反馈(DFB)半导体激光芯片构成的外腔半导体激光器,利用自注入锁定技术将激光器的频率锁定在谐振腔的反射峰上实现线宽的压窄,由于回音壁模式谐振腔体积很小,易于进行商用蝶形封装,所输出激光的积分线宽为 30 Hz,而瞬时线宽可以达到毫赫兹量级<sup>[8-9]</sup>;另外,荷兰特温特大学与 Lionix International 公司最新研制的集成化 InP-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 混合外腔半导体激光器,激光增益部分为 InP 反射式半导体放大激光芯片,与基于 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 光子集成电路(PLC)微环谐振腔

的可调谐游标效应反射镜构成外腔反馈结构,可实现最低 290 Hz 的本征线宽输出,波长范围覆盖 81 nm<sup>[10]</sup>。但以上几种激光器所涉及的硅基 PWG、WGMR、PLC 窄带高反镜等反馈元件均存在制造复杂、成本较高的问题,尤其硅基 PWG 及 WGMR 在波长的选择性方面还存在限制。

除了上述类型的外腔激光器以外,还有一类研究起步较早的外腔结构为基于光纤布拉格光栅(FBG)的外腔半导体激光器,其利用光纤光栅作为反馈元件,具有结构简单、成本低廉的优势,但该类激光器早期文献报道的线宽一般停留在数十至数百 kHz 量级的水平,且均为普通单模光纤输出,保偏特性得不到保证<sup>[11-12]</sup>,限制了其在高精度激光应用领域的应用。目前,随着半导体增益芯片及特种光敏光纤制作工艺、FBG 刻写工艺的不断成熟,半导体增益芯片的性能和光栅光谱的可设计性都大幅提高,基于光纤光栅的外腔半导体激光器又重新引起了国内外研究机构的重视。中国科学院半导体研究所采用多量子阱掩埋条形增益芯片和拉锥单模光纤布拉格光栅制作的蝶形封装外腔式窄线宽半导体激光器,实现了最小线宽为 6.42 kHz 的稳定单模窄线宽激光输出<sup>[13]</sup>;英国南安普顿大学在新型的大数值孔径光敏光纤上刻写布拉格光栅,并通过火焰水解沉积工艺将其集成到硅基平板衬底上进行一体化封装,大大提高了光纤光栅的稳定性,并利用此作为反馈元件达到 14 kHz 的窄线宽激光输出,与保偏单模光纤对接耦合后实现了保偏激光输出<sup>[14]</sup>。

采用单角度面(SAF)增益芯片和保偏单模光纤光栅外腔混合集成的方案,利用增益芯片的单偏振特性通过锥透镜与保偏单模光纤光栅进行偏振耦合可直接实现激光的保偏输出,并且光纤光栅斜边处的大群时延特性可对半导体激光器的线宽进行有效的压窄。蝶形封装后的激光器原型器件实现了稳定的单纵模、单偏振、窄线宽保偏激光输出,输出功率  $\geq 30 \text{ mW}$ , 1 kHz 处的积分线宽为 15.9 kHz,洛伦兹线宽为 4.85 kHz,极限线宽为 4.06 kHz,相对强度噪声(RIN)  $\leq -155 \text{ dB/Hz}@1 \text{ MHz}$ ,偏振消光比  $> 25 \text{ dB}$ ,该集成化外腔半导体激光器具有结构紧凑、稳定性好、可靠性高等优点,可广泛应用于分布式光纤传感领域。

## 2 激光器的集成设计

基于保偏单模光纤光栅(PM-SM FBG)的集成化外腔半导体激光器器件结构如图 1(a)所示,采用

InP单角度面(SAF)脊形弯曲波导增益芯片,其长度为2 mm,后端面镀有高反膜,减小腔的损耗以降低阈值,提高了输出功率;其前端面镀增透膜,配合弯曲波导后可进一步降低芯片前端的反射率( $\leq 0.01\%$ ),将芯片的内腔模式的影响降到最低。芯片前端面发出的光通过镀有增透膜的锥形光纤透镜与后面的光纤光栅进行高效耦合,耦合效率 $>50\%$ ,从而光纤光栅与增益芯片的后端面构成激光腔的两个端面。所采用的光纤光栅利用相位掩模板法刻写在保偏单模光纤上,其栅区长度为10 mm,反射率 $>90\%$ ,反射带宽为0.2 nm,利用其反射谱斜边处的高色散特性有效提高了外腔的等效腔长即光子寿命,并对激光器的噪声进行有效抑制。所研制的外腔半导体激光器拟进行14引脚标准蝶形封装,所有封装工艺均符合于空间应用试验的标准规范。放置激光器腔主体结构的镀金底板与管壳的底部利用金属焊接的方式分别固定于热电冷却器(TEC)的上、下表面,增益芯片及热敏电阻焊接于镀金底板的上表面,使用金丝球焊机将增益芯片、热敏电阻、TEC的电极与管壳的引脚实现内部引线焊

接;光纤光栅与上表面刻有V槽的陶瓷基板利用全灌胶封装工艺进行一体化封装,其结构类似于一个再生型平面波导,不仅对光纤光栅实现热增敏,同时还保证了其机械稳定性,有利于后续与芯片的耦合,由于V槽与光纤均具有对称的几何结构,胶水固化过程中所产生的对称应力对光栅的谱形及中心波长产生影响有限,此结论已在实验过程中得到证明<sup>[15]</sup>;利用六维精密光纤耦合平台进行装调后将光纤光栅一体封装的基板由光学环氧胶固定于底板上,最后利用平行缝焊技术完成对整个管壳的气密性封装。由于半导体增益芯片一般都具有良好的偏振特性,故在耦合过程中使保偏光纤的慢轴与增益芯片输出激光的偏振方向严格对准就可得到具有高偏振消光比的窄线宽输出;光纤光栅的另一端通常需要一个保偏光纤隔离器熔接,有效避免外部的光反馈对激光器性能造成的影响。这种集成化结构及封装工艺大大提高了器件的稳定性和可靠性,并且气密性封装能有效隔绝外界声学振动引入的气流波动及温度变化带来的影响,从而降低激光器的低频噪声,封装后的原型器件如图1(b)所示。

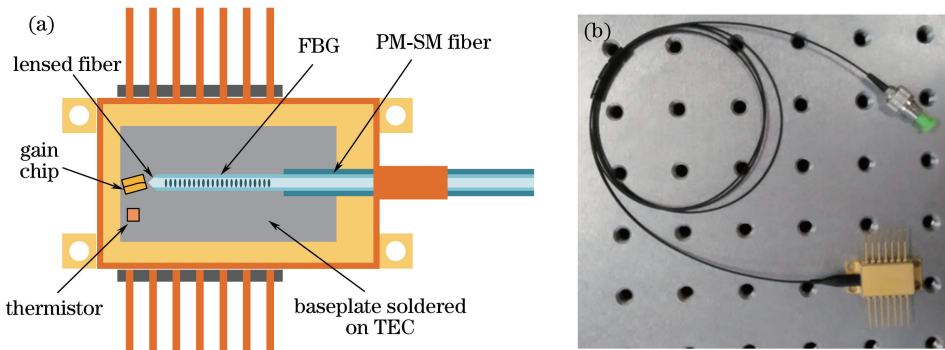


图1 (a)集成外腔激光器结构示意图;(b)蝶形封装器件

Fig. 1 (a) Schematic of integrated external cavity laser device; (b) butterfly packaged device

### 3 实验结果

研制的基于保偏光纤光栅的低噪声外腔半导体激光器原型器件由保偏光纤耦合输出后的功率-电流(PI)特性曲线如图2(a)所示,激光器的阈值电流为60 mA,而在330 mA时,可获得最大输出功率为33.4 mW。图中PI曲线的转折点对应激光器腔纵模的跳变,由光纤光栅外腔纵模随电流增加的漂移与光栅的反射谱不匹配引起。利用分辨率为0.04 pm的高精度光谱仪(AP-2041B, APEX Technologies,美国)对原型器件的光谱特性进行测试,激光器的工作温度和电流分别为24℃和

270 mA,测试结果如图2(b)所示,激光器为单纵模运转,边模抑制比 $>60$  dB,对该工作电流下输出激光的偏振特性进行测试,当输出激光为线偏振光时,其抑制比 $>25$  dB。

低噪声窄线宽激光器的频率调谐特性对于相干激光通信、合成孔径雷达等高精度应用是十分重要的特性,一般外腔激光器的频率调谐主要包括电流调谐和温度调谐两种方式<sup>[6]</sup>,图3给出了所研制的原型器件的电流及温度调谐特性。当激光器工作温度为24℃时,改变激光器的工作电流可得到激光器的电流调谐特性,电流在200~320 mA之间变化,此过程中激光器的频率由波长计(721A LASER

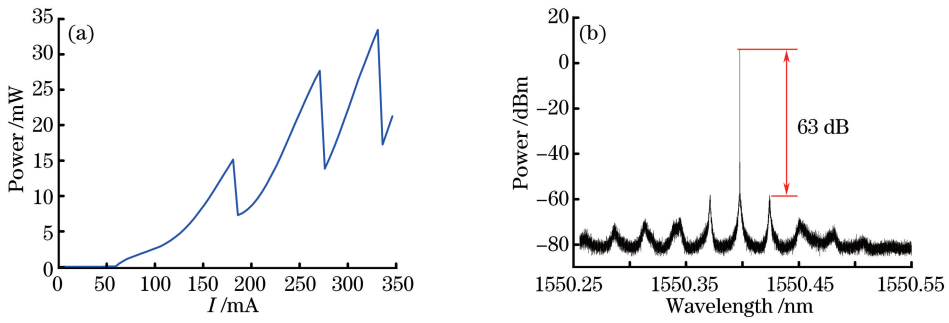


图 2 基于保偏光纤光栅的外腔半导体激光器特性。(a) PI 曲线;(b)输出光谱

Fig. 2 Characteristics of the external cavity semiconductor laser based on polarization-maintaining FBG.

(a) PI curve; (b) output spectrum

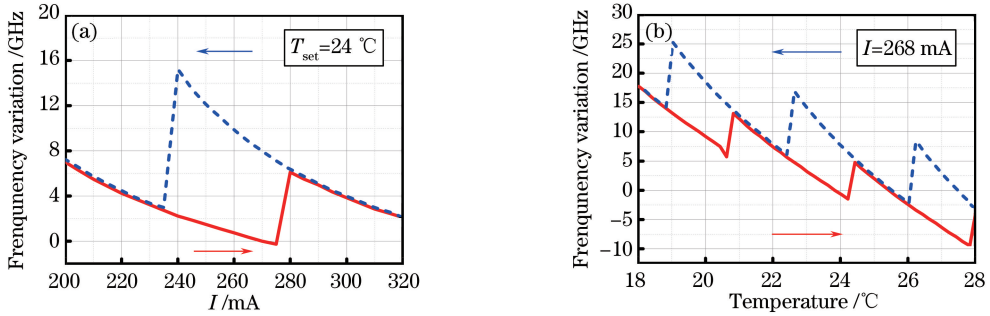


图 3 原型器件的电流和温度调谐特性。(a)频率-电流;(b)频率-温度

Fig. 3 Current and temperature tuning characteristics of the prototype device.

(a) Frequency-current; (b) frequency-temperature

SPECTRUM ANALYZER, Bristol, 美国, 绝对精度为  $\pm 0.0003\text{ nm}$  @  $1550\text{ nm}$ , 测量的分辨率为  $10\text{ MHz}$ ) 进行记录, 结果如图 3(a) 所示。其中, 实线代表电流逐渐升高, 虚线代表电流逐渐降低; 在电流变化过程中激光波长在  $1550.05\text{ nm}$  附近变化, 并且存在迟滞效应及跳模现象, 与 PI 曲线表现一致; 电流调谐过程中激光无跳模调频范围为  $8\text{ GHz}$ , 调谐系数约为  $100\text{ MHz} \cdot \text{mA}^{-1}$ 。激光器的温度调谐特性如图 3(b) 所示, 测试时的工作电流为  $268\text{ mA}$ , 工作温度在  $18\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间变化, 同样实线代表温度升高, 虚线代表温度降低, 整个温度变化过程中激光频率变化  $25\text{ GHz}$ , 无跳模连续调谐范围为  $15\text{ GHz}$ , 调谐系数约为  $4.27\text{ GHz} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

光纤光栅外腔半导体激光器的频率噪声和相位噪声是其噪声特性的代表, 会直接影响到其在相干探测方面的高精度激光应用。激光器的线宽及噪声特性有多种表征方式, 本文采用两种方式对所研制的激光器性能进行完整表征。

1) 采用光纤延时自外差方法直接测试所研制的激光器线宽, 测试中一条干涉臂采用  $20\text{ km}$  的单模光纤进行延迟, 另一条臂采用声光移频器(AOM)进

行  $160\text{ MHz}$  移频, 所获得的拍频信号由 PIN 光电探测器 (LR-12-A-M, Optilab, 美国, 带宽为  $12\text{ GHz}$ ) 接收, 进入频谱分析仪 (E4405B, Agilent, 美国, 频谱范围为  $9\text{ kHz}\sim 13.2\text{ GHz}$ ) 进行线宽测试。图 4 为激光器不同电流下的线宽测试结果, 激光器的工作温度为  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 测试电流选取 PI 曲线中段, 包括跳模刚发生时的  $190\text{ mA}$ 、稳定工作阶段的  $260\text{ mA}$  及即将跳模的  $270\text{ mA}$ 。在  $190\text{ mA}$  时, 激光器的工作波长处于光纤光栅反射谱的顶部反射率较高处, 此时经过洛伦兹拟合后得到的  $3\text{ dB}$  线宽为  $12.2\text{ kHz}$ ; 随着电流的增加激光波长发生红移, 工作波长处于反射谱的边缘靠近斜边处, 此时光纤光栅斜边处的大色散效应对激光器的线宽进行了有效的压窄, 在工作电流为  $260\text{ mA}$  处洛伦兹拟合后  $3\text{ dB}$  线宽为  $5.85\text{ kHz}$ ; 随着电流的增加线宽进一步降低, 在工作电流为  $270\text{ mA}$  时激光器的洛伦兹拟合后  $3\text{ dB}$  线宽为  $4.85\text{ kHz}$ 。随着工作状态的变化激光器的线宽也会随之改变, 但其线宽始终小于  $15\text{ kHz}$ , 最小线宽为  $4.85\text{ kHz}$ , 激光器的最小线宽工作点在光纤光栅斜边的斜率最大处。

2) 采用基于  $3\times 3$  耦合器的非平衡迈克耳孙干

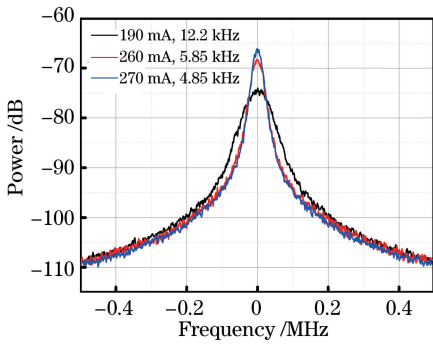


图 4 不同电流下激光器线宽测试结果

Fig. 4 Measured spectra with different working currents

涉仪的噪声测试技术分别对激光器的频率噪声及线宽进行了噪声测试<sup>[16-17]</sup>。所用的非平衡迈克耳孙干涉仪臂长差时延为 244 ns,对应的带宽为 4.1 MHz,干涉信号由高速采集卡采集后对待测激光的差分相位进行解调,处理后得到傅里叶频率为 1 MHz 范围内的归一化 1 m 瞬时频率波动功率谱密度(PSD),对工作温度为 24 °C 时不同工作电流下激光器的频率噪声进行了测试,结果如图 5 所示。对激光器的频率波动 PSD 进行分析,3 个工作状态下噪声曲线的变化趋势相同,但其大小略有不同,频率噪声谱的低频段为  $1/f$  噪声、高频段为白噪声,分别决定了激光器的积分线宽及极限线宽。其中,工作电流为 190 mA 跳模刚发生时,频率噪声最高,随着电流的增加频率噪声逐渐下降;在工作电流为 270 mA 时,频率噪声降到最低,电流继续升高会发生跳模,频率噪声增加,相较工作电流为 270 mA 时的噪声,工作电流为 190、260 mA 时频率噪声分别增加了 2.7 和 1.2 倍,与图 4 中光纤延时自外差方式的测量结果基本一致。工作电流为 270 mA 时的频率噪声谱利用  $\beta$ -算法可以得到不同测量时间(即不同积分带宽)下的积分线宽,如图 5 中的色圆点所示,线宽随着积分带宽下限的减小而增大,在积分时间为 1 ms 时所对应的积分线宽为 15.9 kHz,而积分时间为 0.2 ms 时所对应的积分线宽为 5.2 kHz(与图 4 中延时自外差方法测出来的线宽结果一致);频率噪声的白噪声极限为  $S_w = 1293 \text{ Hz}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,所对应的极限线宽为  $\Delta\nu = \pi S_w \approx 4.06 \text{ kHz}$ 。影响外腔半导体激光器线宽及噪声的主要因素有增益芯片的光限制因子及线宽增强因子、芯片/光纤光栅之间的耦合效率、光纤光栅的群时延等,故进一步提升激光器的线宽及噪声特性可以对增益芯片的结构进行改进以提高载流子的注入效率进而减小增益芯片的光限制因子,同时还可采用大数值孔径的特种光敏光纤刻写光纤光栅以提

高芯片与光纤光栅之间的耦合效率,或者对光纤光栅的反射频谱形进行特殊设计以增加光栅反射光的群时延。

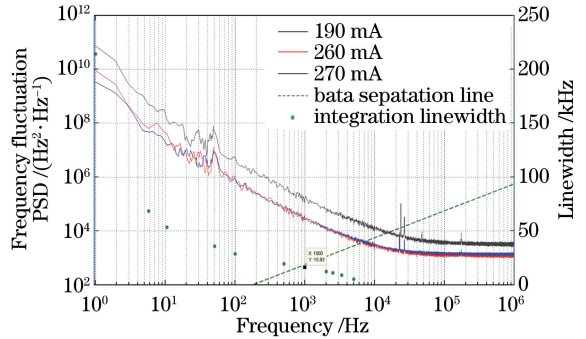


图 5 不同电流下激光器频率噪声 PSD 测试结果

Fig. 5 Measured frequency noise PSDs with different working currents

相对强度噪声(RIN)是影响激光性能的重要指标。激光器的输出光利用衰减器衰减至 1 mW,利用带宽为 1.2 GHz 的 InGaAs 光电探测器对衰减后的激光进行探测后进入频谱分析中(N9030, KEYSIGHT, 美国, 频谱范围为 3 Hz~13.6 GHz),图 6 给出了激光器的相对强度噪声,激光器在小于 1 MHz 表现出  $1/f$  噪声的特性,而大于 1 MHz 时其相对强度噪声基本不变,其值  $< -155 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,此结果接近频谱分析仪平均噪声电平测量极限。而激光器的实际 RIN 应该比  $-155 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{-1}$  更低,此值已满足大部分高精度激光应用的要求,但要获得更准确的结果,应配合外置低噪声放大器对探测器的信号进行放大后输入频谱分析仪,以去除散粒噪声及热噪声的影响。

激光器的频率及功率稳定度同样是实际应用中需要关注的重要参数,将激光器的工作温度及电流分别设置为 24 °C、270 mA,激光器的输出激光频率及功率分别由波长计(721A LASER SPECTRUM ANALYZER, Bristol, 美国)及光功率计(PM100USB, Thorlabs, 美国)进行监控,其 6 h 频率及功率稳定度如图 7 所示。6 h 频率漂移量  $< 50 \text{ MHz}$ 、功率稳定度为 1.7%,激光器的频率及功率都随时间存在周期性波动,且变化趋势基本一致,波动周期为 1 h,该周期性变化主要受到实验温度波动的影响。在整个监测过程中激光器工作稳定,没有发生跳模现象。对激光器进行整体温控或采取稳频及功率反馈补偿控制后可进一步提高其稳定性。

## 4 结 论

采用保偏光纤布拉格光栅与单角度面增益芯片

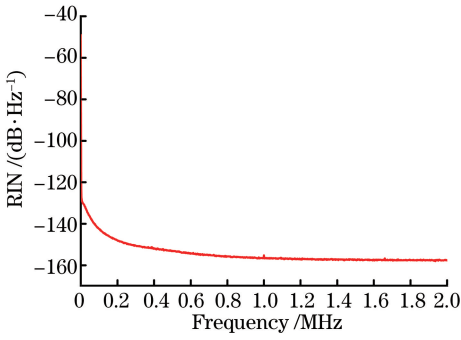


图 6 激光器 RIN 测试结果

Fig. 6 Measured RIN of laser

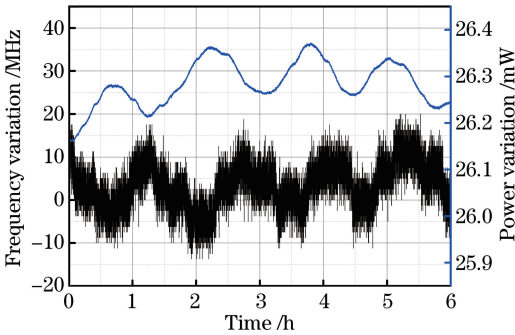


图 7 激光器频率稳定度及功率稳定度测试结果

Fig. 7 Measured frequency and power stability of laser

研制了混合集成型外腔半导体激光器, 实现了 1550 nm 波段的窄线宽、低噪声保偏激光输出。所得到的蝶形封装激光器原型器件输出功率  $\geq 30$  mW,  $RIN \leq -155$  dB/Hz@1 MHz, 偏振消光比  $> 25$  dB; 分别利用延时自外差技术及基于  $3 \times 3$  耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪的噪声测试技术对激光器的频率噪声及线宽进行了全面测试, 从频率噪声、积分线宽、洛伦兹线宽、本征线宽几个方面进行了表征, 其中 1 kHz 处的积分线宽为 15.9 kHz, 洛伦兹线宽为 4.85 kHz, 极限线宽为 4.06 kHz; 无跳模电流调谐范围  $\geq 8$  GHz, 无跳模温度调谐范围  $\geq 14$  GHz, 可满足大部分激光高精度相干探测的需求; 长期监测激光器工作状态稳定无跳模, 6 h 频率漂移量  $< 50$  MHz, 功率稳定度为 1.7%。该种混合集成型外腔半导体激光器波长选择灵活、线宽窄、噪声低, 且成本低廉、制造工艺成熟, 在分布式光纤传感、空间相干激光通信、引力波探测、高精度时频传递、合成孔径雷达等高精度激光应用领域具有巨大的应用潜力。

### 参 考 文 献

[1] Ye Q, Pan Z Q, Wang Z Y, *et al.* Progress of research and applications of phase-sensitive optical

time domain reflectometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0600001.

叶青, 潘政清, 王照勇, 等. 相位敏感光时域反射仪研究和应用进展 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0600001.

[2] Zhu R, Zhou J, Liu J Q, *et al.* Solid state tunable single-frequency laser based on non-planar ring oscillator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(11): 1102011.

朱韧, 周军, 刘继桥, 等. 可调谐单频非平面环形腔固体激光器 [J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102011.

[3] Numata K, Jeffrey R C, Jordan C. Fiber laser development for LISA [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 228: 012043.

[4] Stolpner L, Lee S, Li S, *et al.* Low noise planar external cavity laser for interferometric fiber optic sensors [C]. SPIE, 2008, 7004: 700457.

[5] Alalusi M, Brasil P, Lee S, *et al.* Low noise planar external cavity laser for interferometric fiber optic sensors [C]. SPIE, 2009, 7316: 73160X.

[6] Numata K, Camp J, Krainak M A, *et al.* Performance of planar-waveguide external cavity laser for precision measurements [J]. Optics Express, 2010, 18(22): 22781-22788.

[7] Numata K, Alalusi M, Stolpner L, *et al.* Characteristics of the single-longitudinal-mode planar-waveguide external cavity diode laser at 1064 nm [J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2101-2104.

[8] Ilchenko V S, Dale E, Liang W, *et al.* Compact tunable kHz-linewidth semiconductor laser stabilized with a whispering-gallery mode microresonator [C]. SPIE, 2011, 7913: 79131G.

[9] Dale E, Liang W, Eliyahu D, *et al.* On phase noise of self-injection locked semiconductor lasers [C]. SPIE, 2014, 8960: 89600X.

[10] Fan Y W, Oldenbeuving R M, Roeloffzen C G, *et al.* 290 Hz Intrinsic Linewidth from an Integrated Optical Chip-based Widely Tunable InP-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Hybrid Laser [C] // Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO: Applications and Technology, San Jose, California, USA, 2017: JTh5C. 9.

[11] Bartolo R E, Kirkendall C K, Kupersmidt V, *et al.* Achieving narrow linewidth low-phase noise external cavity semiconductor lasers through the reduction of  $1/f$  noise [C]. SPIE, 2006, 6133: 61330I.

[12] Loh W, O'donnell F J, Plant J J, *et al.* Packaged, high-power, narrow-linewidth slab-coupled optical waveguide external cavity laser (SCOWECL) [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(14):

- 974-976.
- [13] 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.  
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.
- [14] Lynch S G, Holmes C, Berry S A, *et al.* External cavity diode laser based upon an FBG in an integrated optical fiber platform [J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8391-8398.
- [15] Zhang L, Wei F, Sun G, *et al.* Thermal tunable narrow linewidth external cavity laser with thermal enhanced FBG [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(4): 385-388.
- [16] Xu D, Lu B, Yang F, *et al.* Narrow linewidth single-frequency laser noise measurement based on a  $3 \times 3$  fiber coupler [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0102004.  
徐丹, 卢斌, 杨飞, 等. 基于  $3 \times 3$  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): 0102004.
- [17] Xu D, Yang F, Chen D J, *et al.* Laser phase and frequency noise measurement by Michelson interferometer composed of a  $3 \times 3$  optical fiber coupler [J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22386-22393.