

分布反馈半导体激光注入锁定及其 光纤传感应用

周会娟 陈默 姚琼 孟洲

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 选用普通商用带尾纤的分布反馈式(DFB)半导体激光器作从激光器,测试了 DFB 半导体激光注入锁定的基本特性,如不同注入光功率下的锁定带宽、模式频谱、相位噪声及输出光功率,证明了相干光注入锁定具有极大改善从激光器频谱纯度同时不影响其输出光功率的特性;锁定后的从激光器可看作一个窄带、可调谐的光滤波器,并能提供一定的功率增益,滤波器的中心波长和带宽完全由注入光信号决定。将 DFB 半导体激光注入锁定技术应用于基于微波电光移频的布里渊光纤传感,实现了具有布里渊频移的单频信号提取放大,解决了直流工作点漂移带来的光强波动问题。

关键词 激光技术;光纤传感;窄带光滤波器;激光注入锁定;分布反馈式半导体激光器;布里渊光纤传感

中图分类号 TP212.14;TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0705002

Characteristics of Distributed Feedback Semiconductor Laser Injection Locking and Applications to Optical Fiber Sensing

Zhou Huijuan Chen Mo Yao Qiong Meng Zhou

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A standard commercialized fiber-pigtailed distributed feedback (DFB) laser is chosen as the slave laser to construct the master-slave laser injection locking experimental system. The basic characteristics of the slave laser at different injection powers are measured and compared, such as the stable locking range, mode spectra, phase noises and output optical powers, which prove that the laser injection locking can greatly improve the spectral purity of the slave laser while almost not affect its output optical power. The locked slave laser acts like a narrow tunable optical filter and affords some power amplification as well. Moreover, the central frequency and bandwidth of the filter are completely decided by the input injection. Then, the DFB laser injection locking technology is used to extract and amplify the single frequency of Brillouin shift in Brillouin optical fiber sensing system based on electro-optic microwave modulation. Furthermore, the drift of the direct current operation point is resolved as well.

Key words laser technique; optical-fiber sensing; narrow-bandwidth optical filter; laser injection locking; distributed feedback semiconductor laser; Brillouin optical fiber sensing

OCIS codes 140.3520; 140.3490; 140.5960; 060.2370

1 引言

近年来,随着光纤技术的发展,许多光通信中的成熟技术也逐渐应用到了光纤传感领域。激光注入

锁定技术就是其中的一种。从 20 世纪 80 年代早期开始已有大量关于半导体激光注入锁定的研究报告^[1-4]。分布反馈式(DFB)半导体激光器因其优良

收稿日期: 2011-01-12; 收到修改稿日期: 2011-02-25

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20104307110020)资助课题。

作者简介: 周会娟(1985—),女,博士研究生,主要从事基于布里渊散射的分布式光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: songlzhou@163.com

导师简介: 孟洲(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤器件、光纤传感以及光纤激光器等方面的研究。

E-mail: zhousong6806@163.com(通信联系人)

的单纵模特性能够在弱注入锁定时获得一个对称分布的稳定锁定范围,因此DFB激光注入锁定技术在其他领域不断开拓新的应用,例如用于产生纯粹的调幅(AM)、调频(FM)等调制信号,以及产生用于布里渊光纤传感的斯托克斯光等^[5~7]。已有的关于DFB半导体激光器注入锁定的研究报道大多从光通信的应用需求出发,注重于提高激光器的调制带宽以及强注入锁定时激光器表现的双稳态、四波混频、混沌等非线性效应^[8~10]。

本文从光纤传感需求的角度出发,选用普通商用带尾纤的DFB半导体激光器作为从激光器(SL),搭建了主从式激光注入锁定实验系统,测试得到了注入锁定的基本特性,如稳定锁频范围、模式频谱、相位噪声、输出功率等,指出DFB半导体激光注入锁定具有窄带滤波特性。将其应用于基于微波电光移频的布里渊时域反射技术(BOTDR),实现了1阶边带信号提取,解决了铌酸锂电光强度调制器(EOIM)移频带来的多边带和直流工作点漂移的问

题,说明该技术在光纤传感、微波光子学等领域具有广阔的应用前景。

2 实验系统

实验系统结构如图1所示。两个标准商用带尾纤的DFB半导体激光器分别用作主激光器和从激光器,其中主激光器选用频谱特性较好的外腔式DFB半导体激光器(RIOTM),线宽为3 kHz,波长固定为1549.310 nm;从激光器(JDSUTM)线宽约为5 MHz,通过调节驱动电流和温度改变频率,其内置隔离器隔离度约为26 dB。两个光隔离器分别用来防止反射光反馈进入主激光器和从激光器。虚线之后的系统采用全保偏结构以保证注入光与从激光器腔内的偏振态匹配。一个3 dB耦合器将注入光分成两路,其中一路用来监控注入光功率的变化,另外一路经环形器注入从激光器。扫描法布里-珀罗干涉仪(SFPI)(自由频谱范围约为1.5 GHz,精细度为200)用来测量激光器频谱。

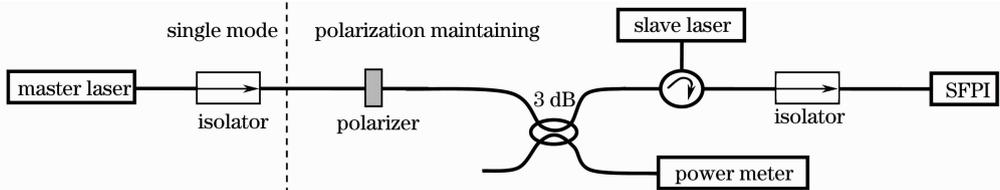


图1 DFB半导体激光注入锁定实验系统结构图

Fig. 1 Experimental setup for injection locking of DFB laser

3 DFB 半导体激光注入锁定的基本特性

3.1 锁频范围

主激光器光频与自由运转(即无光注入)的从激光器光频的差值定义为频率失谐量。在某一注入光功率下,产生注入锁定所允许的最大频率失谐量定义为锁定带宽,正负失谐量对应的锁定带宽之和即为该注入光功率下的稳定锁频范围。从激光器在不同外部注入光功率(实际注入光功率需考虑激光器内置隔离器损耗和激光器与光纤的耦合效率)时的锁定带宽如图2所示。图中实线表示理论模拟值,离散点表示实测值,可见随注入光功率的增加,锁频范围随之增加,并且锁频范围关于主激光器频率对称,这正是在弱光注入锁定时DFB半导体激光器特有的^[5]。由图可知在最大外部注入光功率2.8 mW时(限于主激光器输出功率有限),锁频范围约为200 MHz。文献^[5]指出,对于普通商用带尾纤的

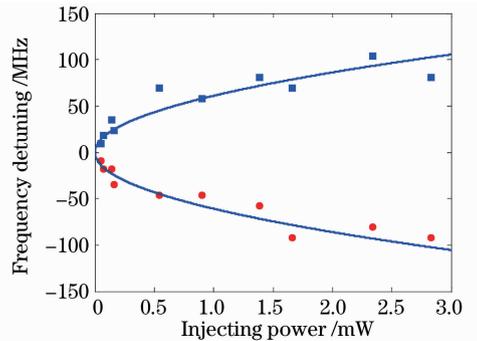


图2 锁定带宽随外部注入光功率的变化

Fig. 2 Stable locking bandwidth against the external injecting power

DFB 半导体激光器,当注入光功率比(实际注入光功率和从激光器腔内辐射光功率之比)为 10^{-5} 量级(弱注入锁定)时,对应的稳定锁频范围为0.5~1 GHz,考虑到其内置隔离器约30 dB的隔离度和光纤与激光器芯片的耦合效率,经由隔离器泄露的注入光功率正好满足这一量级。因此增大注入光功

率,锁频范围还可增大。

3.2 频谱特性

使用 SFPI 测试激光器的频谱,如图 3 所示。图中横坐标为时间(实际对应频率),纵坐标为幅度。主激光器具有极好的单纵模特性如图 3(a)所示。

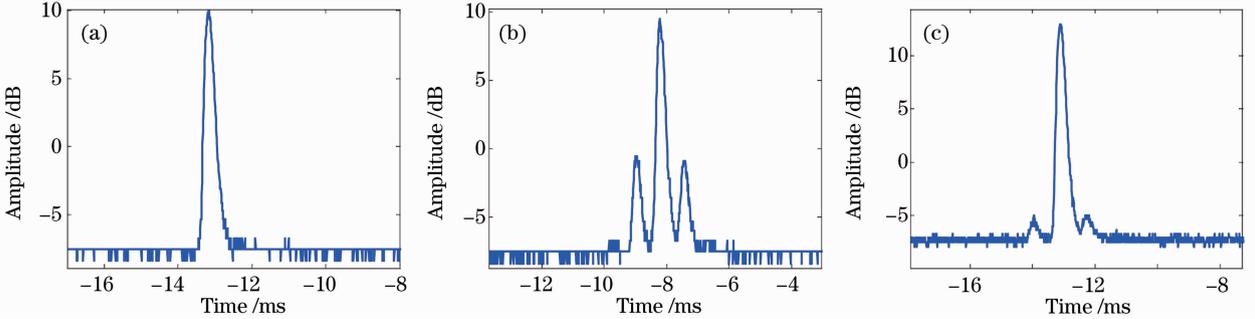


图 3 激光器的模式频谱。(a)主激光器;(b)自由运转的从激光器;(c)稳定锁定后的从激光器

Fig. 3 Spectra of laser mode. (a) Master laser; (b) free-running slave laser; (c) stable-locked slave laser

3.3 相位噪声

相位噪声可以表征激光器的线宽和频率抖动,在许多光纤传感系统中,这是衡量光源性能的一个重要指标。利用 1 m 光程差的迈克耳孙干涉仪测试激光器的相位噪声。主激光器以及处于不同状态的从激光器的相位噪声频谱对比如图 4 所示。由图可知,主激光器因其优良的单纵模特性,在 1 kHz 处相位噪声达到了 -110 dB(0 dB 相当于 $1 \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$),而自由运转的从激光器相位噪声高于 -80 dB,这主要由其小的边模抑制比导致。在注入光功率 0.527 mW 时,稳定锁定的从激光器相位噪声降低了约 10 dB,而注入光功率 2.238 mW 时,被锁定的从激光器相位噪声降低了约 15 dB,可见随着注入光功率的增大,从激光器的相位噪声谱级不断降低,这与 3.2 节从激光器锁定前后边模抑制比的改善一致。由 3.1 节对锁频范围的分析,注入光功率还有增大的余地,因此进一步增大注入光功率,从激光器的相位噪声谱级将逐渐接近主激光器的相位噪声水平。

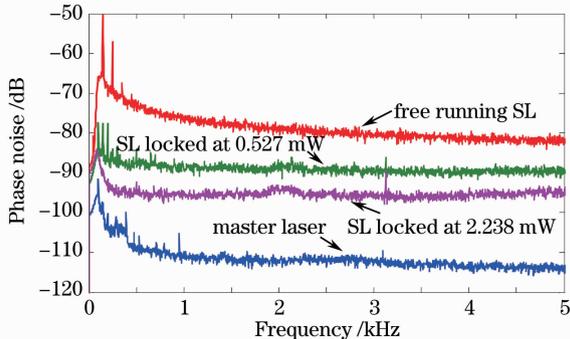


图 4 激光器的相位噪声对比

Fig. 4 Phase noises of the lasers

自由运转的从激光器频谱如图 3(b)所示,在主模的两侧对称分布着两个较大的边模。一旦从激光器被主激光器注入锁定,主模增大,边模降低,边模抑制比增大约 10 dB,频谱纯度得到较大改善,如图 3(c)所示。

图中相位噪声谱级中的尖峰和低频的线谱是由测试系统本身和外界环境引入的。

3.4 输出光功率

光纤传感系统中,光源的另一重要指标是输出光功率。图 5 给出了从激光器在自由运转时和注入光功率分别为 1 mW 和 2.6 mW 时输出光功率随其驱动电流的变化,由图可知 3 种情况下从激光器的输出光功率基本相同。因此,半导体激光注入锁定的另一个重要性能是:在弱注入锁定时(注入光功率比约为 10^{-5}),从激光器的输出光功率主要由其驱动电流决定,几乎不受注入光的影响。

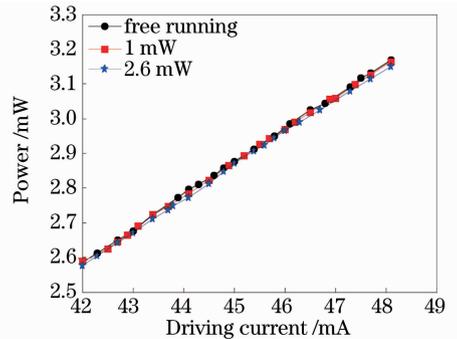


图 5 自由运转和有光注入时从激光器的输出光功率随其驱动电流的变化

Fig. 5 Output power of the slave laser of free running and with optical injection

3.5 讨论

综上所述,DFB 半导体激光器的相干光注入锁定过程可以有效地控制和改善从激光器的模式频谱结构,抑制其相位噪声,提高光的相干性,还保持了原有的输出光功率。利用这一特点,将一个频谱特

性较好的激光器注入锁定一个或多个大功率的激光器,从而解决高相干和高功率不可兼得的矛盾,用于大规模的光纤传感系统,满足其对高功率和高相干光源的应用需求。

另一方面,由于从激光器只能在一定的锁频范围(数百兆赫兹)内实现对主激光器的锁定,得到与主激光器频率一致的激光输出,因此被锁定的从激光器可看作一个窄带可调谐光滤波器,滤波器中心波长和带宽(数百兆赫兹)由注入光频率和光功率决定,同时提供一定的功率增益。基于此,可将该技术应用于 EOIM 微波调制后的单边带信号提取。

4 DFB 半导体激光注入锁定在布里渊光纤传感中的应用

在基于微波电光移频的布里渊分布式光纤传感系统中,EOIM 被用来进行光波移频,以获得具有布里渊频移(1550 nm 处 11 GHz)的参考光或斯托克斯光^[11~14],入射光经 EOIM 移频 11 GHz 后的光谱如图 6 所示。若将移频后的多波长光波直接用作相干检测布里渊光时域反射计(BOTDR)的参考光,参考光中的多种频率成分与后向散射光的拍频信号,尤其同频的瑞利散射光与 0 阶光的拍频信号将落在探测器带宽以内,作为噪声叠加在信号上,势必降低系统信噪比。另外,由于 EOIM 内部采用马赫-曾德尔干涉仪结构,必须进行必要的直流工作点控制才能降低 1 阶光波强度的波动,但稳定的工作点控制较难实现。以上两点限制了系统的传感精度。

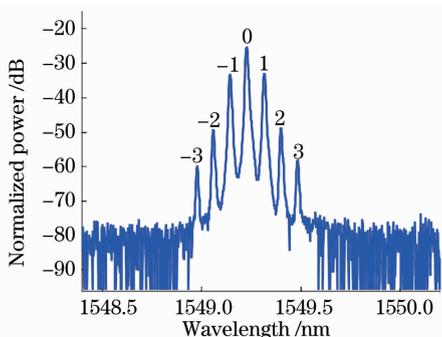


图 6 经 EOIM 移频 11 GHz 后的光谱
Fig. 6 Optical spectrum of the EOIM with 11 GHz-microwave modulation

利用激光注入锁定技术可以较好地解决以上两个问题。将图 6 所示的光波代替图 1 中的主激光器注入锁定从激光器,这时注入锁定的从激光器类似于一个窄带、可调谐的光滤波器,通过调节从激光器的驱动电流改变从激光器的输出光频率,从而实现

对 EOIM 输出光波的单边带信号提取。

图 7 是从激光器锁定到不同频率时对应的输出光谱。由图可知,1)从激光器不仅可以稳定地锁定在最大的 0 阶光频成分,还可以稳定地锁定在比 0 阶光小约 10 dB 的 1 阶或 -1 阶光频处;2)锁定后的从激光器输出光谱中只有对应的某一单频成分,注入光中的其他频率成分被极大地抑制,抑制比约为 40 dB;3)锁定后从激光器输出功率相同,与锁定频率和该频率分量的输入光强无关。因此即使外界环境变化(EOIM 的直流工作点漂移)导致其注入光强波动,只要不改变从激光器驱动电流,其输出功率也将保持恒定,稳定锁定状态可以持续 1 h 以上。

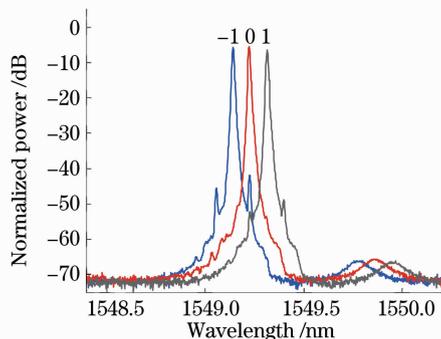


图 7 稳定锁定的从激光器输出光谱

Fig. 7 Optical spectra of stable-locked slave lasers

利用 DFB 半导体激光注入锁定技术的窄带滤波特性,不仅将具有布里渊频移的 1 阶光波从多种频率成分中提取出来,在抑制其他频谱成分的同时还放大了 1 阶光波,将该光波用作相干检测 BOTDR 的参考光,不但避免了其他光频的干扰,从激光器输出光功率的稳定性也保证了系统高的信噪比,较好地解决了 EOIM 移频后的多边带和工作点漂移问题。

因此,该窄带可调谐光滤波器不仅在布里渊分布式光纤传感中有重大应用,在其他领域也有诱人的前景,如微波光子学中实现单边带选择放大、用于产生高频微波信号等^[15,16]。

5 结 论

相干光注入锁定可以极大地改善 DFB 半导体激光器的频谱纯度,如增大边模抑制比(约 10 dB)、降低相位噪声(超过 10 dB)等,并且注入光几乎不影响从激光器的输出光功率,该特性可应用于获得窄线宽和高功率兼具的光源。被锁定的从激光器可以看作一个窄带(数百兆赫兹)、可调谐的光滤波器,并且滤波器的输出频率由注入光频率决定,带宽由

注入光功率决定,同时提供一定的功率增益。基于此,将 EOIM 移频后的多频光波注入同一从激光器,不仅实现了单频信号的提取放大,极大地抑制了其他光频(约 40 dB),还间接解决了 EOIM 的直流工作点漂移问题,保证了输出光波光强的稳定,这将极大地提高基于微波光电移频的布里渊光纤传感系统的信噪比。因此,DFB 半导体激光注入锁定技术在光纤传感、微波光子学中有巨大的应用前景。

参 考 文 献

- 1 R. Lang. Injection locking properties of a semiconductor laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(6): 976~983
- 2 F. Mogensen, H. Olesen, G. Jacobsen. FM noise suppression and linewidth reduction in an injection-locked semiconductor laser [J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(16): 696~697
- 3 R. Hui, A. D' Ottavi, A. Mecozzi *et al.*. Injection locking in distributed feedback semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(6): 1688~1694
- 4 J. Troger, P.-A. Nicati, L. Thévenaz *et al.*. Novel measurement scheme for injection-locking experiments[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(1): 32~38
- 5 L. Thévenaz, S. L. Floch, D. Alasia *et al.*. Novel schemes for optical signal generation using laser injection locking with applications to Brillouin sensing[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**(8): 1519~1524
- 6 V. V. Spirin, J. Kellerman, P. L. Swart *et al.*. Intensity noise in SBS with injection locking generation of Stokes seed signal[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(18): 8328~8335
- 7 V. Spirin, M. Castro. DFB laser injection locking on Brillouin radiation for probe Stokes generation in distributed fiber optical sensing[C]. *SPIE*, 2008, **7004**: 1~4
- 8 Erwin K. Lau, Hyuk-Kee Sung, Xiaoxue Zhao *et al.*. Bandwidth enhancement by optical amplitude and phase modulation of

- injection-locked semiconductor lasers [C]. *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 2007. 241~244
- 9 Hyuk-Kee Sung, Erwin K. Lau, Ming C. Wu. Optical properties and modulation characteristics of ultra-strong injection-locked distributed feedback lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(5): 1215~1221
- 10 Atsushi Murakami. Phase locking and chaos synchronization in injection-locked semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(3): 438~447
- 11 Zhou Huijuan, Meng Zhou, Liao Yi. Frequency shift characteristics analysis of LiNbO₃ waveguide electro-optic intensity modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 901~905
周会娟, 孟 洲, 廖 毅. 铌酸锂波导电光强度调制器的移频特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 901~905
- 12 Song Muping. The technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114
宋牟平. 微波光电调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1111~1114
- 13 Marc Niklès, Luc Thévenaz, Philippe A. Robert. Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(10): 758~760
- 14 Song Muping, Zhao Bin, Zhang Xianmin. Brillouin optical time domain analysis distributed optic-fiber sensor based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1053~1056
宋牟平, 赵 斌, 章献民. 基于微波光电调制的布里渊光时域分析传感器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1053~1056
- 15 A. Loayssa, D. Benito, M. J. Garde. Applications of optical carrier Brillouin processing to microwave photonics (invited paper)[J]. *Optical Fiber Technology*, 2002, **8**(1): 24~42
- 16 Xie Shizhong, Chen Minghua, Chen Hongwei. Advance in microwave photonics [J]. *ZTE Communications*, 2009, **15**(3): 6~10
谢世钟, 陈明华, 陈宏伟. 微波光子学研究的进展[J]. *中兴通讯技术*, 2009, **15**(3): 6~10