

20 kHz 窄线宽光纤光栅外腔半导体激光器

潘碧玮¹ 余力强¹ 陆 丹¹ 李林森² 张莉萌¹ 李召松¹ 苏 辉² 赵玲娟¹

¹中国科学院半导体研究所材料重点实验室, 北京 100086

²中国科学院福建物质结构研究所, 福建 350002

摘要 采用多量子阱掩埋条形(BRS)增益芯片和拉锥光纤布拉格光栅(FBG), 制作了1.5 μm 波段FBG外腔式窄线宽半导体激光器。封装后器件实现了全电流范围内稳定单模窄线宽激光输出。30~250 mA 驱动电流下线宽小于15.48 kHz, 实测最小线宽为6.42 kHz, 频率稳定度为 $7.2 \times 10^{-8}/s$, 边模抑制比大于40 dB, 最大出纤功率大于10 mW。这种集成窄线宽激光器性能优异, 且制作成本低, 工艺简单, 适于批量生产, 可应用于400 Gb/s 相干通信系统的发射源与接收机本振源。

关键词 激光器; 半导体激光器; 相干通信; 集成光学器件; 光纤布拉格光栅

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0502007

20 kHz Narrow Linewidth Fiber Bragg Grating External Cavity Semiconductor Laser

Pan Biwei¹ Yu Liqiang¹ Lu Dan¹ Li Linsen² Zhang Limeng¹ Li Zhaosong¹
Su Hui² Zhao Lingjuan¹

¹Key Laboratory of Semiconductor Materials Science Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Science, Beijing 100083, China

²Fujian Institute of Research on Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract A buried ridge stripe (BRS) gain chip integrated with a fiber Bragg grating external cavity is fabricated for stable, single mode narrow-linewidth semiconductor laser with wavelength of 1.5 μm. The laser can realize single longitudinal mode output with the side-mode suppression ratio over 40 dB in the bias current tuning from 30 mA to 250 mA. The largest output power from fiber pigtail is larger than 10 mW. In the current tuning range, the linewidth is below 15.48 kHz and a minimum linewidth of 6.75 kHz is achieved. By using the beating-frequency method, the measured frequency fluctuation is $7.2 \times 10^{-8}/s$. This compact and low cost narrow linewidth laser can be used as the optical source and the local oscillation source in the future 400 Gb/s communication systems.

Key words lasers; semiconductor lasers; coherent communications; integrated optics devices; fiber Bragg gratings

OCIS code 140.5960, 130.3120, 060.3735, 060.1660

1 引 言

随着互联网通信的迅猛发展,人们对通信容量的需求急剧增加,单信道通信容量已经开始向400 Gb/s迈进。为了提高通信速率和频谱效率,需要采用新型调制格式和相干探测系统。而高阶调制格式对发射源和本振源激光器的线宽和频率稳定性提出了更加严格的要求。激光器的线宽会影响信号的相位噪声特性,频率不稳定会导致信号的频率漂移^[1],这两者对接收机的灵敏度具有重要影响。400 Gb/s的相干通信系统对于

收稿日期: 2014-11-28; 收到修改稿日期: 2015-01-04

基金项目: 国家863计划(2013AA014202)、国家自然科学基金(61201103,61335009, 61274045,61205031)

作者简介: 潘碧玮(1990—),男,博士研究生,主要从事InP基半导体激光器与窄线宽激光器等方面的研究。

E-mail: panbiwei@semi.ac.cn

导师简介: 赵玲娟(1964—),女,研究员,博士生导师,主要从事InP基光子集成技术,光信息处理技术等方面的研究。

E-mail: ljzhao@semi.ac.cn

激光器线宽的要求一般在 100 kHz 以下^[2],而目前光纤通信系统中常规部署的 1.5 μm 及 1.3 μm 波段的分布反馈(DFB)半导体激光器的线宽一般在 1~10 MHz 量级,无法满足高阶调制格式相干接收的要求。因此,实现低成本、可批量生产、频率稳定的窄线宽光源成为了下一代光纤通信系统需要迫切解决的问题。另外,波长范围在 0.78~1.5 μm 波段的窄线宽激光器在相干测距系统^[3],相控阵雷达系统^[4],光纤传感系统^[5],气体检测^[6]及原子钟^[7-8]方面均有潜在的应用价值。

目前,国内外对窄线宽激光器的研究主要集中在光纤激光器,DFB 布拉格反射镜激光器(DBR)和外腔半导体激光器。其中,光纤激光器可以实现较窄的线宽(<2 kHz)及很高的输出功率(>200 mW)^[9]。但是,受限于体积、结构和量产化方面的限制,在光发射机和接收机方面的应用前景不大^[10-11]。对于 DFB/DBR 结构的半导体激光器,通过优化器件结构,以及一些外部线宽压缩手段,可以使线宽控制在千赫兹数量级^[12-13],但与此同时,也增加了工艺和系统的复杂程度,难以大规模生产和应用。基于光纤光栅的外腔半导体激光器(FBG-ECL)以其波长精确控制,窄线宽,低功耗,工作稳定,结构简单和便于大规模生产的优势,在通信领域具有广泛的应用前景^[14-15],可应用于高速相干通信系统的发射源和接收机本振源。

国外开展 FBG-ECL 的相关研究较早。在 1991 年,英国电信实验室利用法布里-珀罗(FP)激光器与光纤光栅外腔集成,获得 50 kHz 窄线宽激光输出^[16]。1994 年,美国的 AT&T 贝尔实验室通过改进的 FBG 外腔与 FP 激光器混合集成的方案实现了窄线宽(400 kHz),高功率(27.3 mW),高边模抑制比(56 dB)的单模激光输出。在此基础之上,2002 年,日本 NTT 公司实现了可以在 -5 °C~45 °C 稳定单模工作的 FBG 外腔激光器^[17]。2011 年,美国的林肯实验室改进了实验方案,采用平板耦合光波导技术,使一个大功率的半导体光放大器与一个窄带的光纤光栅外腔集成,获得了高功率(370 mW),窄线宽(1.75 kHz)的激光输出^[18],但其阈值电流较大,约为 1 A,制作工艺相对复杂。国内中科院半导体所^[19],上海光机所^[20],西南大学^[21]等机构均有关于 FBG 外腔窄线宽激光器方面的报道。但是,目前国内利用半导体增益芯片和 FBG 外腔集成的方案均未能实现小于 20 kHz 的单模窄线宽输出,也没有频率稳定性方面的报道。

本研究采用掩埋条形(BRS)增益芯片和光纤光栅外腔混合集成的方案,成功实现了线宽小于 20 kHz 的稳定单模激光输出。器件结构设计如图 1(a)所示,采用 BRS 制作方案设计制作了增益芯片,以降低光限制因子、提高载流子注入效率、改善远场对称性;采用拉锥光纤布拉格光栅构成激光器的外腔,以实现单模稳定的窄线宽激光输出。封装后器件实现了全电流范围内单模工作,边模抑制比大于 40 dB,最大输出功率为 10 mW。利用延时自拍法测得全电流范围内线宽小于 15.48 kHz,最小线宽为 6.42 kHz;利用拍频法测得频率稳定度为 7.2×10⁻⁸/s。

2 器件设计与制作

在强反馈下,外腔半导体激光器的线宽 $\Delta\nu$ 可由下式表示^[22-23]:

$$\Delta\nu = \frac{\Gamma v_g^2 h \nu g n_{sp} a_m (1 + \alpha^2)}{8\pi P_0} \frac{1}{\left[1 + \frac{\tau_{ex}}{\tau_m} \left(1 - \frac{r_2}{r_3} \right) \right]^2},$$

式中 Γ 为光限制因子, v_g 为群速度, ν 为激光器激励模式频率, g 为模式增益, a_m 为镜面损耗, n_{sp} 为自发辐射系数, α 为线宽增强因子, P_0 为输出功率, τ_{ex} 为光子在外腔中的往返渡越时间, τ_m 为光子在有源区中的往返渡越时间, r_2 为靠近外腔激光端器端面的反射率, r_3 为外腔后端面的反射率。可以看出,外腔半导体激光器的线宽由以上一些参数决定。为了减小线宽,采用多量子阱掩埋条形结构制作了增益芯片。这种增益芯片与普通的脊波导半导体增益芯片相比,掩埋条形结构可以有效提高载流子注入效率,减小光限制因子 Γ ;还可以改善光斑质量,提高增益芯片与外腔的耦合效率,使激光器更容易满足强反馈条件。此外,增益芯片在与光纤光栅耦合端镀有增透膜,这样可以增加激光器与光纤的耦合效率,抑制激光器本身的 FP 模式;在另一端镀有高反膜,这样可以减小镜面损耗 a_m ,提高输出功率。

图 1(b)为掩埋条形增益芯片的结构示意图。器件尺寸为 500 μm×250 μm。制备该增益芯片的工艺包括两次金属有机化学气相外延(MOVPE)。第一次外延为材料结构外延:在 N 型掺杂的 InP 衬底上生长多层薄膜

材料体系,主要包括多量子阱有源区和上下限制层。采用反应离子刻蚀(RIE)工艺刻蚀深脊波导,然后进行第二次MOVPE外延:生长 p^+-InP 和 $p^+-InGaAs$ 作为金属接触层。在脊波导两旁进行 He^+ 注入,形成高阻区。最后进行P电极和N电极的制作,完成器件制备。这种BRS工艺相比于传统的掩埋异质结激光器工艺简单,成品率高。集成外腔为刻有均匀光栅的单模拉锥光纤。完成蝶形封装的器件如图1(c)所示。

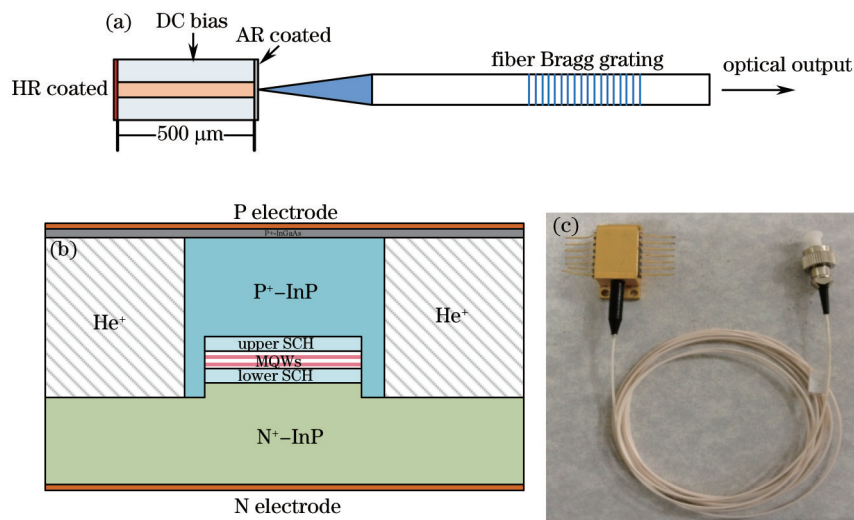


图1 (a) 集成FBG外腔激光器器件结构图; (b) 掩埋条形增益芯片结构图; (c) 封装后器件照片
Fig.1 (a) Schematic of integrated FBG external cavity device; (b) schematic of buried ridge gain chip; (c) photography of butterfly packaged device

3 器件性能分析

图2(a)为测试得到的FBG外腔激光器由光纤耦合输出的功率-电流特性曲线,激光器的阈值电流为15 mA,在250 mA时,可获得最大出纤光功率达10.8 mW。图中扭折点对应模式跳变点,起源于半导体增益芯片腔内的残余FP腔模式与光纤光栅外腔模式之间竞争导致的非线性作用^[24],这也是电流调谐时,外腔FBG半导体激光器普遍存在的现象。通过匹配电流和温度,可以实现激光器全范围单模工作。图2(b)是电流从30 mA变化到250 mA时,叠加的光谱测试结果,从图中可以看出,激光器的输出波长稳定,全电流范围边模抑制比大于40 dB。

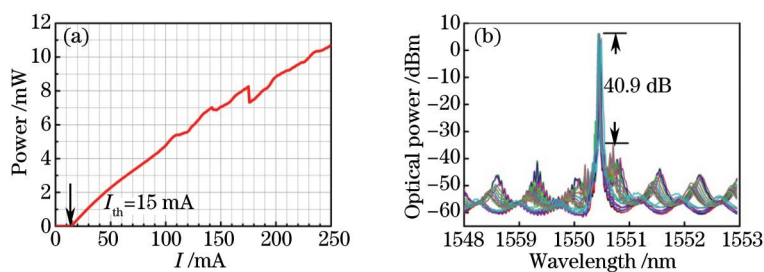


图2 (a) 器件功率-电流曲线; (b) 器件光谱测试结果

Fig.2 (a) Power-current characteristic of the device; (b) output spectrum of the device

实验中,采用延时自外差的方法测试了激光器的线宽。测试中采用25 km单模光纤作为延时臂,假设激光器的线型为洛伦兹型,可以满足最小2.6 kHz的线宽测量^[25]。采用声光移频器(AOM)对拍频信号做了70 MHz的频移,以排除直流噪声对测试结果的影响。图3(a)为器件线宽最小时(190 mA)自外差拍频结果。由洛伦兹曲线拟合,可得到线宽为6.42 kHz。图3(b)为不同驱动电流条件下的激光器线宽测试结果。可以看出,全电流范围内,激光器的线宽小于15.48 kHz。

实验中,采用拍频法测量了激光器的频率稳定性。通过理论计算证明^[26],两个同批次的激光器拍频的频率稳定性和激光器自身的频率稳定性之间存在以下关系:

$$S_{\text{laser}} = \frac{1}{\sqrt{2}} S_{\text{beating}}$$

式中 S_{laser} 代表激光器的频率稳定性, S_{beating} 代表拍频的频率稳定性。由此,可通过测试拍频的频率稳定性得到激光器自身的频率稳定性。测试中,通过频谱仪每隔 1 s 捕捉一次拍频信号的频率,可以得到 500 s 内拍频信号频率随时间的变化曲线如图 4 所示。由此,计算艾伦方差可以得到激光器的频率稳定度为 $7.2 \times 10^{-8}/\text{s}$,该频率稳定度与市售国外产品处于同一量级^[21]。

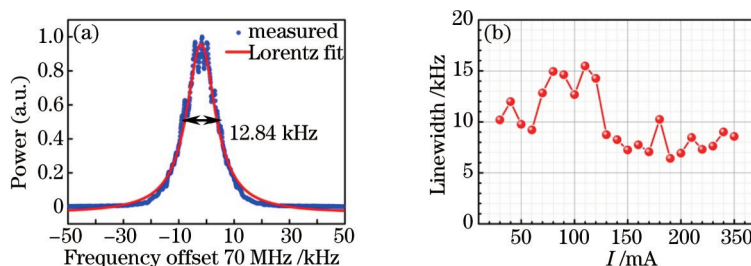


图 3 (a) 线宽测试结果及拟合曲线; (b) 不同驱动电流下线宽测试结果

Fig.3 (a) Measured spectrum and Lorentz fitting curve; (b) measured linewidth as a function of bias currents

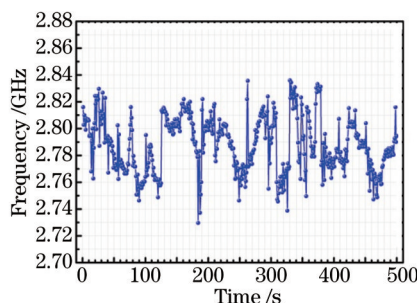


图 4 拍频频率随时间变化曲线

Fig.4 Measured beating-frequency fluctuation versus time

5 结 论

采用半导体增益芯片与光纤光栅外腔混合集成的方案,成功实现了稳定单模窄线宽的激光输出。半导体增益芯片采用掩埋条形技术,有效降低了阈值电流,提高了输出功率。封装后器件实现了全电流范围(30~250 mA)内稳定单模窄线宽激光输出,边模抑制比大于 40 dB,最大出纤功率大于 10 mW。利用延时自外差方法,测得全电流范围内线宽小于 15.48 kHz,实测最小线宽为 6.42 kHz;利用拍频法,测得激光器的频率度为 $7.2 \times 10^{-8}/\text{s}$ 。这种集成窄线宽激光器性能优异,且制作成本低,工艺简单,有利于批量生产。

参 考 文 献

- 1 Zhang D, Zhao J, Yang Q, *et al.*. Compact MEMS external cavity tunable laser with ultra-narrow linewidth for coherent detection[J]. *Opt Express*, 2012, 20(18): 19670-19682.
- 2 Seimetz M. Laser linewidth limitations for optical systems with high-order modulation employing feed forward digital carrier phase estimation[C]. *Optical Fiber Communication Conference, OSA*, 2014: OTuM2.
- 3 Dale E, Liang W, Eliyahu D, *et al.*. Ultra-narrow line tunable semiconductor lasers for coherent LIDAR applications[C]. *Imaging Systems and Appcigation, OSA*, 2014: JTu2C. 3.
- 4 Zhuang L, Roeloffzen C G H, Meijerink A, *et al.*. Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas part II: experimental prototype[J]. *J Light Technol*, 2010, 28(1): 19-31.
- 5 Yam S P, Brodzeli Z, Wade S A, *et al.*. Use of first-order diffraction wavelengths corresponding to dual-grating periodicities in a single fibre Bragg grating for simultaneous temperature and strain measurement[J]. *Meas Sci Technol*, 2009, 20(3): 034008.
- 6 Chen Xiao, Sui Qingmei, Miao Fei, *et al.*. Multi-component gas high accuracy detection based on photoacoustic spectrometry and ultra-narrow linewidth laser[J]. *J Optoelectronics Laser*, 2011, 22(11): 1679-1682.

- 陈 霄,隋青美,苗 飞,等.基于超窄线宽激光器的多气体光声光谱检测研究[J].光电子·激光,2011,22(11):1679-1682.
- 7 Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, *et al.*. Making optical atomic clocks more stable with 10-16 level laser stabilization[J]. Nat Photon, 2011, 5(3): 158-161.
- 8 Yu Hong. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Measuring Technology and Instrument[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2008.
于 泓.用于新型 Rb 原子钟的 780 nm 单模窄线宽可调谐外腔半导体激光器的研制[D].中国科学院国家授时中心,2008.
- 9 Spiegelberg, Geng C, Hu J, *et al.*. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm[J]. J Light Technol, 2004, 22(1): 57-62.
- 10 Song Rui, Chen Shengping, Hou Jing, *et al.*. All-fiber pulsed laser with narrow line width[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502002.
宋 锐,陈胜平,侯 静,等.全光纤窄线宽脉冲激光器[J].中国激光,2011,38(5):0502002.
- 11 Xue Dong, Lou Qihong, Zhou Jun, *et al.*. New developments of narrow linewidth fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(5): 31-35.
薛 冬,楼祺洪,周 军,等.窄线宽光纤激光器进展[J].激光与光电子学进展,2004,41(5):31-35.
- 12 Kobayashi G, Kiyota K, Kimoto T, *et al.*. Narrow linewidth tunable light source integrated with distributed reflector laser array[C]. Optical Fiber Communication, OSA, 2014: Tu2H. 2.
- 13 Yu L, Lu D, Pan B, *et al.*. Widely-tunable narrow-linewidth lasers using self-injection DBR lasers[J]. IEEE Photonics Technol Lett, 2015, 27(1): 50-53.
- 14 Mikhailov V, Bayvel P, Wyatt B, *et al.*. Fibre grating laser-based RZ pulse source for 40 Gbit/s OTDM transmission systems[J]. Electron Lett, 2001, 37(14): 909-910.
- 15 Timofeev F N, Kostko I A, Bayvel P, *et al.*. 10 Gbit/s directly modulated, high temperature-stability external fibre grating laser for dense WDM networks[J]. Electron Lett, 1999, 35(20): 1737-1739.
- 16 Bird D, Armitage J, Kashyap R, *et al.*. Narrow line semiconductor laser using fibre grating[J]. Electron Lett, 1991, 27(13): 1115-1116.
- 17 Sato T, Yamaoto F, Tsuji K, *et al.*. An uncooled external cavity diode laser for coarse-WDM access network systems[J]. IEEE Photonics Technol Lett, 2002, 14(7): 1001-1003.
- 18 Loh W, O'Donnell F J, Plant, *et al.*. Packaged, high-power, narrow-linewidth slab-coupled optical waveguide external cavity laser (SCOWECL)[J]. IEEE Photonics Technol Lett, 2011, 23(14): 974-976.
- 19 Zhou Kaiming, Hu Xiongwei, Liu Haitao, *et al.*. Fiber grating external cavity semiconductor lasers with narrow linewidth high MSR[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(4): 478-481.
周凯明,胡雄伟,刘海涛,等.高边模抑制比窄线宽的光纤光栅外腔半导体激光器[J].光子学报,2001,30(4):478-481.
- 20 Geng Jianxin, Cao Gendi, Luo Ying, *et al.*. Experimental study of a fiber grating external-cavity semiconductor laser[J]. Chinese J Laser, 2000, 27(6): 488-492.
耿健新,曹根娣,罗 颖,等.光纤光栅外腔半导体激光器的实验研究[J].中国激光,2000,27(6):488-492.
- 21 Li Songbai, Xia Guangqiong, Deng Tao, *et al.*. Studying on mode suppression ratio of fiber grating external cavity semiconductor laser[J]. Laser Journal, 2006, 27(5): 20-21.
李松柏,夏光琼,邓 涛,等.光纤光栅外腔半导体激光器的模式抑制比研究[J].激光杂志,2006,27(5):20-21.
- 22 Henry C H. Theory of the linewidth of semiconductor lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1982, 18(2): 259-264.
- 23 Chai Yanjie, Zhang Hanyi, Zhou Bingkun. Line width performance and lysis of semiconductor lasers with strong feed back external cavity[J]. Chinese Journal of Semiconductor, 1995, 16(12): 885-889.
柴燕杰,张汉一,周炳琨.强反馈外腔半导体激光器线宽特性研究[J].半导体学报,1995,16(12):885-889.
- 24 Campbell R, Armitage J, Sherlock G, *et al.*. Wavelength stable uncooled fibre grating semiconductor laser for use in an all optical WDM access network[J]. Electron Lett, 1996, 32(2): 119-120.
- 25 Gallion P B, Debarge G. Quantum phase noise and field correlation in single frequency semiconductor laser systems[J]. IEEE J Quantum Electron, 1984,20(4): 343-349.
- 26 Liu Tao, Ma Xiurong, Zhang Shuanggen, *et al.*. Measurement of frequency stability of two independent lasers with the same model [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0408006.
刘 涛,马秀荣,张双根,等.两台同类型号独立激光器频率稳定度的测量[J].中国激光,2012,39(4):0408006.

栏目编辑:宋梅梅