

基于光纤光栅的 1310 nm 波段窄线宽混合集成外腔 半导体激光器

梁虹^{1,2}, 魏芳^{1*}, 孙延光¹, 孙广伟¹, 蔡海文^{1,2**}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 利用单角度面半导体增益芯片及光纤布拉格光栅, 研制了 1310 nm 波段的窄线宽混合集成外腔半导体激光器(ECDL)。该 ECDL 集成在一个紧凑的蝶形封装结构中, 当工作温度和电流设置为 25 °C 和 280 mA 时, ECDL 的发射波长为 1309.8 nm, 3 dB 洛伦兹线宽为 18 kHz, 3 h 功率漂移量为 0.6 mW, 频率漂移量为 315 MHz。另外, 在工作温度为 25 °C 时, 激光无跳模电流调谐范围为 7 GHz, 调谐系数为 47 MHz·mA⁻¹。该 ECDL 可广泛应用于光纤传感和光纤通信等领域。

关键词 激光器; 半导体激光器; 光纤布拉格光栅; 集成光学器件; 光纤传感

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2001002

1 引言

随着现代通信网络技术的发展, 人们对通信容量的需求急剧增加, 使得超大容量长距离光纤网络传输系统成为光纤通信领域的研究热点^[1-5]。光频梳作为一种在频域上具有梳齿状频谱的光源, 能够极大地提高单根光纤的传输容量, 充分利用光纤传输的有限可用带宽, 成为光纤网络传输系统中大容量传输的理想光源。为了提高该大容量光纤通信系统的稳定性, 需要对该光纤通信系统中的光纤链路的变化情况进行监测。但是, 光频梳的频率覆盖范围比较广, 高达几十个甚至上百个 nm, 而且监测所需要采用的波长应该避开携带信息的波段, 因此, 对于目前光纤通信系统中常规部署的 1550 nm 波段的光频梳, 1550 nm 波段的激光器无法实现对该光纤通信系统中的光纤链路的监测。1310 nm 波段作为光纤通信的另一重要窗口, 可以实现较低衰减及极低色散的传输, 便成为光纤链路检测的重要通道。因此, 为了提高光纤通信系统的稳定性, 对 1310 nm 波段窄线宽激光器的研究是非常必要的。

目前, 常用的可实现 1310 nm 波段激光器的方

案主要有分布反馈式(DFB)半导体激光器^[6]、Nd:YAG 非平面环形腔(NPRO)固体激光器^[7]、光纤激光器^[8]和外腔半导体激光器(ECDL)^[9-20]。其中, DFB 半导体激光器线宽太宽, 一般在 MHz 量级; Nd:YAG NPRO 固体激光器和光纤激光器可以实现 kHz 量级的线宽, 但是受限于结构、尺寸和成本方面的限制, 在光纤通信系统中的应用前景不大; ECDL 以其线宽窄、波长控制灵活和集成化程度高的优势, 在光纤通信系统中有着广阔的应用前景。近年来, 利用硅基平面波导光栅^[9-10]、高品质因子回音壁模式谐振腔^[11-12]和 Si₃N₄ 光子集成电路微环谐振腔^[13]作为反馈元件的 ECDL 已被提出, 可用于制备 1310 nm 波段的窄线宽激光器, 但是这些反馈元件需要复杂的设计和制造过程, 成本较高。另一类利用光纤布拉格光栅(FBG)作为反馈元件的 ECDL, 具有结构简单、成本低廉的优势, 但早期文献报道的该类 ECDL 的线宽一般为几十到几百 kHz, 且均为 1550 nm 波段的激光输出^[14-15], 限制了其在光纤通信系统中的应用。近年来, 随着半导体增益芯片及 FBG 刻写工艺的不断成熟, 利用 FBG 作为反馈元件的 ECDL 性能得到了显著提升, 并且

收稿日期: 2021-01-25; **修回日期:** 2021-03-18; **录用日期:** 2021-03-29

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC2200300)、国家自然科学基金(61775225)

通信作者: *weifang@siom.ac.cn; **hwcai@siom.ac.cn

波长选择也更为灵活,基于 FBG 的 ECDL 再次成为国内外的研究热点。潘碧玮等^[16]采用多量子阱掩埋条形增益芯片和拉锥 FBG,制作了 1550 nm 波段基于 FBG 的 ECDL,实现了最小线宽为 6.4 kHz 的激光输出。Lynch 等^[17]在光敏光纤上刻写 FBG,并利用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,在 1532.83 nm 实现了线宽为 14 kHz 的激光输出。在我们以前的工作中,将 FBG 与刻有 V 型槽的陶瓷基板利用全灌胶封装工艺进行一体化封装,在 1550 nm 波段实现了最小线宽为 4.85 kHz 的激光输出^[18-20]。

本文研制了基于单角度面(SAF)半导体增益芯片和 FBG 的 1310 nm 波段混合集成 ECDL。FBG 与刻有 V 型槽的陶瓷基板利用全灌胶封装工艺进行一体化封装,提高了 FBG 的热敏性和机械稳定性,SAF 增益芯片与 FBG 之间采用 FBG 前端抛光的光纤锥形透镜耦合,FBG 后端的光纤可直接作为输出光纤,结构简单紧凑,利用 FBG 反射谱斜边负反馈作用实现了 1310 nm 波段的窄线宽激光输出^[21]。经蝶形封装后的激光器原型器件中心波长为 1309.8 nm,3 dB 洛伦兹线宽为 18 kHz,3 h 功率漂移量为 0.6 mW,频率漂移量为 315 MHz。该混合集成 ECDL 结构紧凑、性能优良、成本低廉,可广泛应用于光纤传感与光纤通信等领域。

2 激光器的设计与制作

本节描述了所研制的 1310 nm 波段混合集成 ECDL 的设计和制作过程。该混合集成 ECDL 的原理图如图 1(a)所示,由半导体增益芯片和 FBG 两部分组成。半导体增益芯片采用索雷博公司的 SAF 增益芯片(SAF1144C, Thorlabs, 美国),该芯片长度为 2 mm,可在 1290~1340 nm 的波长范围内提供增益。SAF 增益芯片使用几何技术将脊型波导弯曲,使入射光非垂直入射到芯片端面上,并且在该端面上配合使用增透膜来获得超低反射率($\leq 0.01\%$),将芯片的内腔模式的影响降到最低;芯片的另一端面镀有 $\geq 90\%$ 反射率的高反膜。FBG 的栅区长度为 10 mm,峰值反射率为 60%。将 FBG 前端抛光成锥形光纤透镜,SAF 增益芯片与 FBG 之间采用锥形光纤透镜耦合,耦合效率约为 50%;整个谐振腔可以理解为从增益芯片背面到 FBG 等效反射中心的这部分光路,经折算后的总光程大约为 15 mm。FBG 反射谱斜边负反馈作用实现窄线宽激光输出的原理如图 1(b)所示。本文所研制的

激光器的起振点是在 FBG 反射谱的斜边处,而不是在峰值处。当激光的出射波长往短波方向移动时,FBG 的反射率增加,对应腔内光子数增加,增益芯片的折射率增加,从而又使腔纵模往长波方向移动。这种类似稳频的负反馈效果,可以大大减小输出激光的线宽。

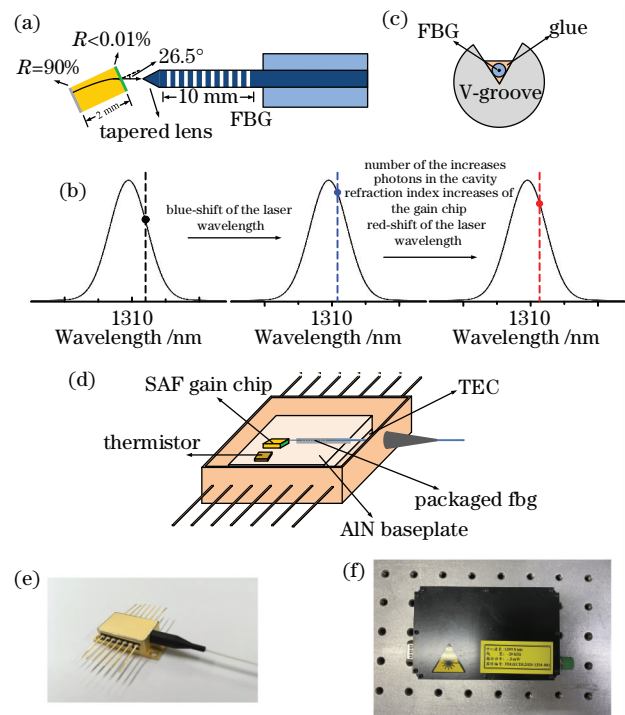


图 1 原理图。(a) ECDL 的原理图;(b) FBG 光学负反馈作用的原理;(c) V 型槽基板封装 FBG 的结构图;(d) ECDL 的整体结构图;(e) 蝶形封装后的 ECDL;(f) 1310 nm 激光器模块

Fig. 1 Schematic diagrams. (a) Schematic diagram of ECDL; (b) principle of FBG optical negative feedback; (c) structure diagram of FBG packaged with V-groove substrate; (d) overall structure diagram of ECDL; (e) ECDL with butterfly package; (f) 1310 nm ECDL module

如图 1(c)所示,FBG 采用 V 型微槽结构衬底进行封装,V 型槽是通过机械切割方式加工在衬底上表面,一般是正三角形,边长约为 0.3 mm。FBG 被放置在 V 型槽中自然伸直,通过 V 型槽灌注胶水,使 FBG 与 V 型槽基板融为一体,提高了 FBG 的机械强度和稳定度。另外,由于 V 型槽具有对称的几何结构,因此,胶水固化过程中所产生的对称应力对 FBG 的光谱产生的影响很小。更重要的是,FBG 本身的热膨胀系数被基板的热膨胀系数所取代,提高了 FBG 的热敏性和激光的调谐范围^[19]。造成这种现象的原因是:

基于 FBG 的 ECDL 的热调谐范围主要取决于 FBG 的热敏性,而封装 FBG 的 V 型槽材料的热膨胀系数(氧化锆陶瓷为 $10.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)与 FBG 的热膨胀系数(石英约为 $5.6 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$)差异较大,会使 FBG 在温度变化时受到额外的拉力,这相当于增加了 FBG 的热膨胀系数,因此激光的调谐范围也得以扩大。

图 1(d)显示了该基于 FBG 的 1310 nm 波段混合集成 ECDL 的整体结构图,增益芯片及热敏电阻被焊接在镀金氮化铝陶瓷底板上,该底板利用金属焊接的方式固定于热电冷却器(TEC)的上表面,通过 TEC 对氮化铝陶瓷底板进行温控。激光谐振腔的集成是通过精密调整封装后的 FBG 的位置来实现的。利用光学环氧胶将调整好位置的 FBG 固定于镀金氮化铝陶瓷底板上,然后,采用平行缝焊技术完成对整个管壳的气密性封装,如图 1(e)所示, ECDL 被集成在了一个标准的 14 引脚蝶形封装结

构中。FBG 的后端熔接到光纤隔离器上,采用 FC/APC 光纤端口进行光输出。最终, ECDL 及其驱动板被集成在如图 1(f)所示的模块中投入使用。这种封装工艺及结构大大提高了 ECDL 在恶劣的环境条件下的稳定性及可靠性。

3 激光器的性能及应用

图 2 所示为所研制的 1310 nm 波段混合集成 ECDL 的功率-电流(PI)特性曲线和输出光谱。如图 2(a)所示,该 ECDL 的阈值电流为 100 mA;当工作电流为 440 mA 时, ECDL 可获得 17.62 mW 的最大输出功率。PI 曲线中的转折点对应 ECDL 腔纵模的跳变,造成该现象的原因是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。图 2(b)为 ECDL 工作温度设置为 25 °C 时,不同工作电流下的光谱仪(AQ6317C, Yokogawa, 日本)测试的光谱,激光器为单纵模运转,波长约为 1309.8 nm。

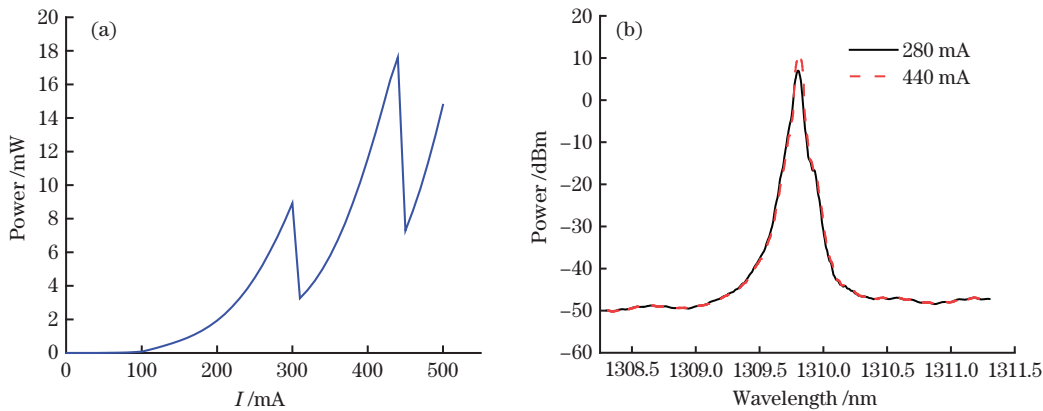


图 2 1310 nm ECDL 特性。(a)功率-电流曲线;(b)输出光谱

Fig. 2 Characteristics of the 1310 nm ECDL. (a) PI curve; (b) output spectrum

实验中,将所研制的 1310 nm 波段 ECDL 的工作温度设定在 25 °C,采用波长计(721A Laser Spectrum Analyzer, Bristol, 美国)对工作电流在 100~500 mA 之间变化的 ECDL 的频率进行测量,得到如图 3 所示的电流调谐特性图。其中,实线代表电流逐渐升高,虚线代表电流逐渐降低,与 PI 特性曲线的表现一致, ECDL 的电流调谐过程中存在迟滞效应及跳模现象;该 ECDL 在波长 1310 nm 附近可获得 7 GHz 的调谐范围, $47 \text{ MHz} \cdot \text{mA}^{-1}$ 的调谐系数。其中,迟滞效应主要来源于半导体增益芯片内的载流子密度与折射率之间的相互依赖关系和 FBG 的反馈作用^[22]。

实验中,采用光纤延时自外差技术测量所研制的 1310 nm 波段 ECDL 的线宽,测试中将 100 km 的单模光纤作为延时臂,并且为了消除直流噪声对

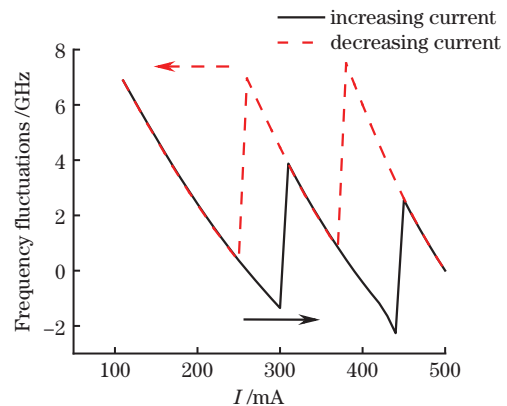


图 3 1310 nm ECDL 的电流调谐特性

Fig. 3 Current tuning characteristic of the 1310 nm ECDL 测试结果的影响,利用声光移频器对拍频信号做了 320 MHz 的移频处理,所得到的拍频信号由光电探测器进行探测后输入频谱仪(N9030B, Keysight, 美

国)获得线宽。图 4(a)为 ECDL 工作温度为 25 °C、工作电流为 280 mA 时的自外差拍频结果,其中,20 dB 线宽约为 360 kHz,对应 3 dB 洛伦兹线宽为 18 kHz。图 4(b)为 ECDL 工作在 25 °C 时,不同电流下的 3 dB 洛伦兹线宽测量结果;ECDL 的线宽随

着工作电流的增加而减小,但是,在工作电流为 300 mA 和 450 mA 附近处 ECDL 的线宽会突然增大,然后,随着工作电流的增加 ECDL 的线宽会再次减小,ECDL 的线宽发生突变的区域与图 2(a)和图 3 中所示的发生跳模的区域相对应。

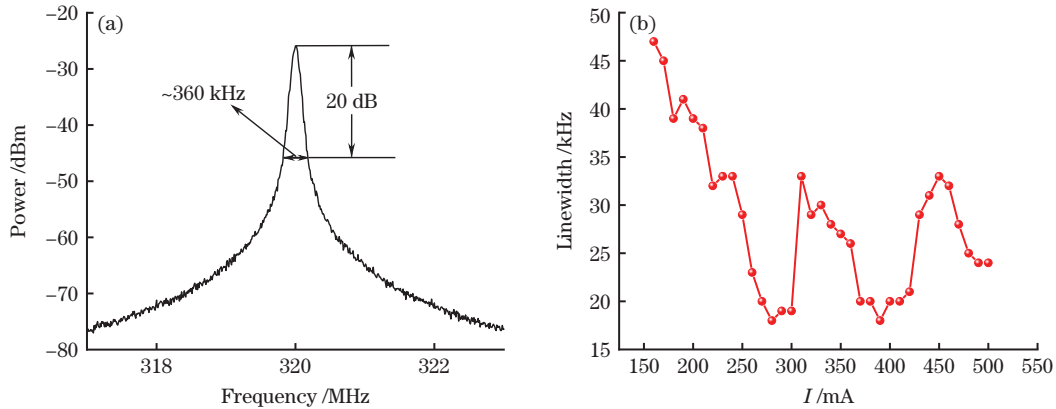


图 4 1310 nm ECDL 的线宽。(a)线宽测试结果;(b)不同工作电流下的线宽测试结果

Fig. 4 Linewidth of 1310 nm ECDL. (a) Spectrum diagram of measured linewidth; (b) measured linewidth under different operating currents

实验中,采用波长计及光功率计(PM100USB, Thorlabs,美国)分别对 ECDL 的频率及功率稳定度进行测量,将激光器的工作温度和电流分别设置在 25 °C 和 280 mA,测得 3 h 的频率及功率稳定度如图 5 所示,频率漂移量约为 315 MHz,功率漂移量约为 0.6 mW。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。

的输出端发生干涉,该干涉信号的相位为激光经两臂传输后的相位差。光纤传感系统的信号臂在外部扰动的作用下,其传输的光波相位会发生变化,导致干涉信号的相位发生变化,干涉信号经光电探测器后由光信号转换为电信号,通过示波器(DSOX6004A,Keysight,美国)检测电信号的强度变化,就得到相应的光信号的相位变化,获得外部扰动的信息,从而实现光纤监测的功能。该光纤传感系统的监测距离取决于激光器的相干长度,超过这个长度,干涉条纹将开始变得难以分辨,导致测量精度下降。激光器的相干长度 L_c 可表示为

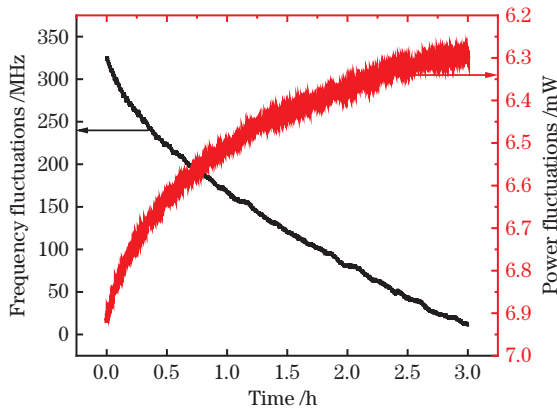


图 5 1310 nm 外腔半导体激光器的频率稳定度及功率稳定度

Fig. 5 Frequency and power stability of the 1310 nm external cavity semiconductor laser

为了验证所研制的 1310 nm ECDL 对光纤链路的监测能力,我们将其应用于如图 6 所示的光纤传感系统中。ECDL 输出的单频激光经 2×2 耦合器分束后分别进入干涉仪的两臂(其一为信号臂,另一为参考臂),而后被法拉第旋转镜反射,在耦合器

的相干长度 L_c 可表示为

$$L_c = \frac{c}{2\pi\Delta\nu}, \quad (1)$$

式中: $\Delta\nu$ 表示激光器的线宽。也就是说,对于该光纤传感系统,激光器的线宽需要小于 238 kHz。而我们所研制的 ECDL 线宽可达到 18 kHz,充分满足了该光纤传感系统对激光器线宽的要求。实验中,在光纤末端通过压电陶瓷(PZT)施加一个频率

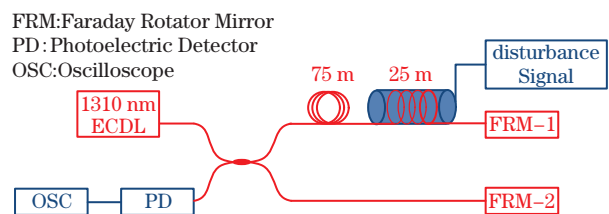


图 6 压电陶瓷扰动实验的装置图

Fig. 6 Schematic diagram of piezoelectric ceramic transducer disturbance experiment

为 200 Hz 的正弦扰动,如图 7 所示,第一列为信号臂受不同扰动幅度作用后传感系统得到的干涉信号;该干涉信号经过希尔伯特变换解调后可以

还原出光纤形变量,如图 7 第二列所示。因此,我们所研制的 1310 nm ECDL 可用于对光纤链路的监测。

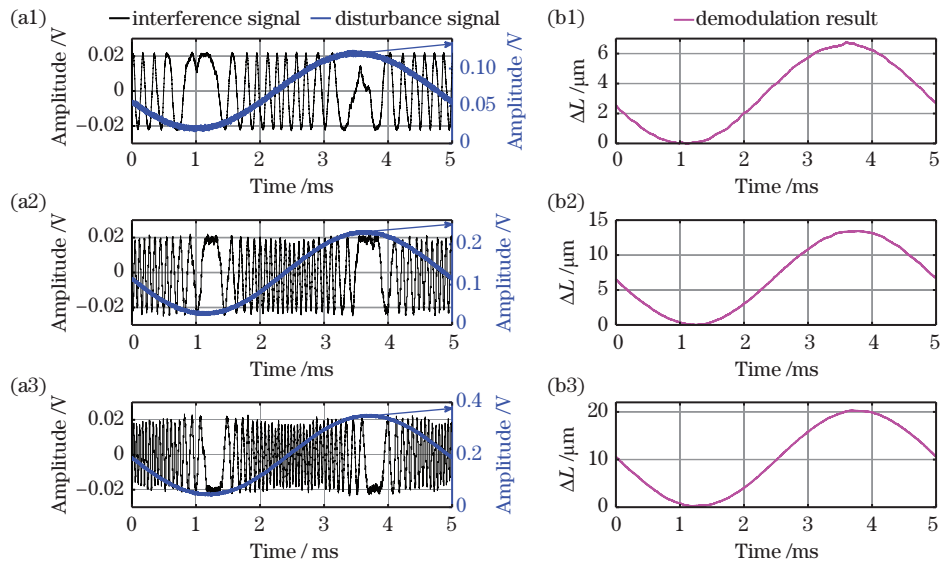


图 7 不同扰动信号的幅压下电陶瓷扰动实验的结果。(a1)(b1) 50 mV;(a2)(b2) 100 mV;(a3)(b3) 150 mV

Fig. 7 Results of piezoelectric ceramic disturbance experiments under different disturbance signal amplitudes.

(a1)(b1) 50 mV; (a2)(b2) 100 mV; (a3)(b3) 150 mV

4 结 论

本文研制了 1310 nm 波段的蝶形封装窄线宽混合集成 ECDL。该 ECDL 利用 SAF 增益芯片提供增益,将 FBG 作为选频元件,具有波长选择灵活、结构简单、成本低廉的优势;在工作温度为 25 °C 时,激光无跳模电流调谐范围为 7 GHz,调谐系数为 47 MHz·mA⁻¹;在工作温度为 25 °C、工作电流为 280 mA 时,中心波长为 1309.8 nm,3 dB 洛伦兹线宽为 18 kHz,3 h 功率漂移量为 0.6 mW,频率漂移量为 315 MHz。该 ECDL 可应用于应变、振动传感测量等领域。

参 考 文 献

- [1] Morton P A, Morton M J. High-power, ultra-low noise hybrid lasers for microwave photonics and optical sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(21): 5048-5057.
- [2] Zhao Y M, Li Y, Huang W P. Narrow-linewidth distributed feedback moiré-grating laser for high-speed optical communications [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(12): 3666-3672.
- [3] 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.
- [4] Ip E, Lau A P T, Barros D J F, et al. Coherent detection in optical fiber systems [J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 753-791.
- [5] Li W P, Kong M, Shi J T, et al. Generation of multiple path wireless and wireline signals based on a single optical modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1906001.
李韦萍, 孔森, 石俊婷, 等. 基于单个光调制器产生多路无线和有线信号[J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1906001.
- [6] Lu D, Yang Q L, Wang H, et al. Review of semiconductor distributed feedback lasers in the optical communication band [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701001.
陆丹, 杨秋露, 王皓, 等. 通信波段半导体分布反馈激光器[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701001.
- [7] Kane T J, Byer R L. Monolithic, unidirectional single-mode Nd: YAG ring laser [J]. *Optics Letters*, 1985, 10(2): 65-67.
- [8] Yang C S, Cen X, Xu S H, et al. Research progress of single-frequency fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0114002.
杨昌盛, 岑旭, 徐善辉, 等. 单频光纤激光器研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0114002.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Liang W, Ilchenko V S, Eliyahu D, et al. Ultralow noise miniature external cavity semiconductor laser [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7371.
- [12] Ilchenko V S, Dale E, Liang W, et al. Compact tunable kHz-linewidth semiconductor laser stabilized with a whispering-gallery mode microresonator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7913: 79131G.
- [13] Lin Y, Browning C, Timens R B, et al. Characterization of hybrid InP-TriPleX photonic integrated tunable lasers based on silicon nitride ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$) microring resonators for optical coherent system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 1-8.
- [14] Bird D M, Armitage J R, Kashyap R, et al. Narrow line semiconductor laser using fibre grating [J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(13): 1115-1116.
- [15] Morton P A, Mizrahi V, Tanbun-Ek T, et al. Stable single mode hybrid laser with high power and narrow linewidth [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(20): 2634-2636.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Zhang L, Fang W, Wang D, et al. V-groove-based compact FBG package for thermal tuning and mechanical stability [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(4): 1-5.
- [19] Zhang L, Wei F, Sun G W, et al. Thermal tunable narrow linewidth external cavity laser with thermal enhanced FBG [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(4): 385-388.
- [20] 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.
- 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.
- [21] Aoyama K, Yoshioka R, Yokota N, et al. Optical negative feedback for linewidth reduction of semiconductor lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(4): 340-343.
- [22] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.

A 1310 nm Band Narrow Linewidth Hybrid Integrated External Cavity Semiconductor Laser Based on Fiber Bragg Gratings

Liang Hong^{1,2}, Wei Fang¹, Sun Yanguang¹, Sun Guangwei¹, Cai Haiwen^{1,2*}

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective With the development of modern communication network technology, people's demand for communication capacity has increased dramatically, making the ultra-large capacity and long-distance optical fiber network transmission system a research hotspot in the field of optical fiber communication. As a light source with a comb-shaped spectrum in the frequency domain, the optical frequency comb can significantly increase the transmission capacity of a single optical fiber, make full use of the limited available bandwidth of optical fiber transmission, and become an ideal light source for large-capacity transmission in optical fiber network transmission systems. To improve the stability of large-capacity optical fiber communication system, it is necessary to examine the changes of the optical fiber link in the optical fiber communication system. However, the frequency coverage of

the optical frequency comb is relatively wide, about dozens or even hundreds of nm, and the wavelengths needed for monitoring should avoid the band that carries information. Therefore, for a 1550 nm band optical frequency comb conventionally deployed in the current optical fiber communication system, a 1550 nm band laser cannot realize the monitoring of the optical fiber link in the optical fiber communication system. As another essential window of optical fiber communication, a 1310 nm band can realize the transmission with low attenuation and dispersion and has become an essential channel for optical fiber link detection. Therefore, it is necessary to study 1310 nm band narrow linewidth laser to improve the stability of the optical fiber communication system.

Methods In this study, we have developed a 1310 nm band hybrid integrated external cavity diode laser based on the single angle facet semiconductor gain chip and fiber Bragg grating. First, the design and fabrication theory of the external cavity diode laser is presented. The fiber Bragg grating and ceramic substrate with V-groove are packaged by full-glue packaging process, which improves the fiber Bragg grating's thermal sensitivity and mechanical stability. Then, the single angle facet semiconductor gain chip and fiber Bragg grating are coupled with a fiber-tapered lens polished at the front of the fiber Bragg grating. The fiber at the back of the fiber Bragg grating can be used directly as the output fiber. The narrow linewidth laser output is realized by the negative feedback of the sloping edge of the fiber Bragg grating reflection spectrum. The performance of the obtained external cavity diode laser is tested through experiment. Finally, our fabricated external cavity diode laser is applied in an optical fiber sensing system.

Results and Discussions Our fabricated external cavity diode laser in the 1310 nm band uses the single angle facet semiconductor gain chip to provide gain and fiber Bragg grating as the frequency-selective element. It has the advantages of flexible wavelength selection, simple structure, and low cost. The performance of the fabricated external cavity diode laser is tested. At the operating temperature of 25 °C and operating current of 280 mA, the external cavity diode laser center wavelength is 1309.8 nm (Fig. 2), and 3 dB Lorentz linewidth is 18 kHz (Fig. 4). Moreover, under this operating temperature and current, the power and frequency fluctuation of the external cavity diode laser in 3 h is 0.6 mW and 315 MHz (Fig. 5). Additionally, the tuning characteristics of the external cavity diode laser are measured. When the external cavity diode laser operates at 25 °C, the laser mode-hopping free current tuning range is 7 GHz, and the tuning coefficient is 47 MHz·mA⁻¹ (Fig. 3).

Conclusions A narrow linewidth hybrid integrated external cavity diode laser at the 1310 nm band is developed using a single angle facet semiconductor gain chip and fiber Bragg grating. The external cavity diode laser is integrated in a compact butterfly package. When the external cavity diode laser operating temperature and current are set to 25 °C and 280 mA, we obtain a wavelength, 3 dB Lorentz linewidth, power fluctuation, and frequency fluctuation of 1309.8 nm, 18 kHz, 0.6 mW, and 315 MHz, respectively, for 3 hours. Additionally, the laser mode-hopping free current tuning range is 7 GHz, and the tuning coefficient is 47 MHz·mA⁻¹ with an operating temperature of 25 °C. The external cavity diode laser can be used in fiber sensing and communication.

Key words lasers; semiconductor lasers; fiber Bragg gratings; integrated optics devices; fiber optics sensors

OCIS codes 140.3570; 140.5960; 060.3735; 130.3120; 060.2370