

基于 VCSEL 结电压的自混合干涉位移测量

夏梵华, 王慧鹏, 夏巍, 郝辉, 郭冬梅, 王鸣*

南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210023

摘要 研究了一种新的基于激光器结电压测量的自混合干涉传感技术, 通过测量激光二极管结电压的变化来获得激光自混合干涉信号。传统的自混合干涉技术通常通过测量外置或内置光电探测器的光电流来获得激光自混合干涉信号。本文通过测量垂直腔面发射激光器的 PN 结电压来获得激光自混合干涉信号, 简化了自混合干涉系统的结构并提高了系统的可靠性。本文还评估了该系统的信噪比, 比较了激光二极管的结电压信号与内置光电探测器的光电信号, 结果发现两者一致。

关键词 测量; 自混合干涉; 垂直腔面发射激光器; 结电压; 传感技术

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.231203

Self-Mixing Interference Displacement Measurement Based on Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Junction Voltage

Xia Fanhua, Wang Huipeng, Xia Wei, Hao Hui, Guo Dongmei, Wang Ming*

Key Laboratory on Opto-Electronic Technology of Jiangsu Province, School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract This paper studied a new self-mixing interference (SMI) sensing technology based on the measurement of laser diode junction voltage. The SMI signal was obtained by measuring the variation of laser diode junction voltage. Conventional SMI technology usually employs a detection scheme that utilizes the photocurrent from an external or integrated photodiode (PD) to obtain the SMI signal. In this paper, the SMI signal was obtained by measuring the PN junction voltage of a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL), which simplifies the structure of the SMI system and improves the system reliability. The signal-to-noise ratio of the system were evaluated, and the junction voltage signal of the laser diode was compared with the photocurrent signal of integrated PD, the results were found to be consistent.

Key words measurement; self-mixing interference; vertical-cavity surface-emitting laser; junction voltage; sensing technology

OCIS codes 120.3180; 120.0280; 120.4820

1 引言

当一部分激光束在物体表面反射后重新进入激光腔时, 携带外部物体信息的反射光就会与腔内的光发生干涉, 导致其发射功率和光谱发生变化。此时激光的输出信号与传统双光束干涉类似, 因此上述现象被称为激光自混合干涉 (SMI) 效应或光反馈效应。激光自混合干涉效应被证明是激光传感和精

密测量的有力工具^[1]。基于半导体激光器的激光自混合传感技术在位移测量、振动测量、声学传感等领域被广泛应用^[2]。与其他干涉技术相比, 半导体激光自混合干涉技术具有结构简单、易准直、灵敏度高、鲁棒性好等特点。

光反馈现象不仅改变了激光发射状态, 还改变了激光光谱特性和激光器的发射功率。虽然常见的激光器都会产生光反馈现象, 但半导体激光器为芯

收稿日期: 2020-03-13; 修回日期: 2020-04-14; 录用日期: 2020-04-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51875292)

* E-mail: wangming@njnu.edu.cn

片结构,有可能在片上集成,设计成高性能的集成传感器。垂直腔面发射激光器(VCSELs)已被广泛用于通信中^[3],近年来,VCSELs开始用于基于自混合效应的传感测量中^[4-7]。VCSELs具有传统边缘发射型激光器(EELs)不具备的优点,如低阈值电流、可发射低发散度的圆形光束、单纵模工作、易于片上集成等^[8-10]。尽管EELs和VCSELs都能应用于自混合干涉传感技术中,但VCSELs凭借其垂直结构可以构成二维阵列,而二维VCSELs传感阵列可以发展成二维激光自混合干涉图像传感器。

半导体激光自混合产生的输出功率变化通常由内置光电探测器(PD)通过检测光电流进行测定,这也是传统EELs采集光信号的常用方法。这种方法需要内置PD的激光二极管或在光路中外置PD。本文通过直接测量VCSEL的PN结电压来获得激光自混合干涉信号。此外,本文将VCSEL激光二极管(LD)作为光源和传感元件,无需使用内置或外置PD,简化了干涉传感系统的结构。

2 半导体激光器自混合干涉

2.1 自混合干涉的基本原理

激光从半导体激光器中射出,一部分光经目标反射后返回激光器腔内,并与激光器腔内的原始光混合,形成激光自混合效应。忽略外腔的多次反射,激光频率 ν 和出射光强 I 可表示为

$$\nu_0 - \nu = \frac{C}{2\pi t} \sin(2\pi\nu t + \arctan \alpha), \quad (1)$$

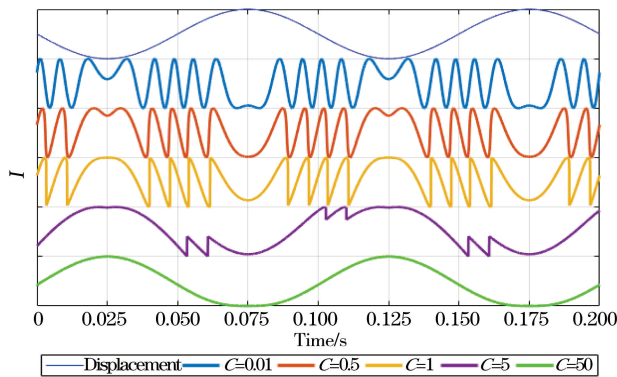


图1 不同反馈水平下自混合干涉信号强度的仿真结果

Fig. 1 Simulation of self-mixing interference signals under various feedback levels

2.3 VCSELs的自混合干涉方法

VCSELs的谐振腔通常由两个分布布拉格反射器(DBR)和DBR之间的有源层组成^[11]。DBR的反射率高,有源层薄,因而腔长较短。VCSELs对光反馈的灵敏度与EELs类似^[12]。将VCSELs用作自混

$$I = I_0 [1 + m \cos \varphi] = I_0 [1 + m \cos(2\pi\nu t)] = I_0 \left[1 + m \cos \left(4\pi \frac{\nu}{c} L \right) \right], \quad (2)$$

式中: ν_0 和 I_0 分别为无光反馈时的激光频率和光强; C 为外部光反馈强度系数; t 为时间; α 为线宽展宽因子; m 为自混合干涉的条纹可见度; φ 为自混合信号的相位; L 为外腔长度; c 为光速。外部光反馈强度系数 C 可定义为

$$C = \frac{t_L}{t_D} \zeta \sqrt{1 + \alpha^2}, \quad (3)$$

式中: ζ 为耦合系数; t_L 和 t_D 分别为光在外腔和内腔中的往返时间。

2.2 自混合位移传感

自混合位移传感技术用于测量激光器与目标之间的距离变化。激光发射功率 P 可描述为

$$P = P_0 [1 + m \cos(2\pi\nu t)], \quad (4)$$

式中: P_0 为无光反馈时激光器的光功率。

在激光自混合干涉中,外部光反馈强度系数 C 是非常重要的参数。自混合干涉信号的形状取决于反馈状态,即由外部光反馈强度系数 C 确定。当 $C < 0.1$ 时,光反馈水平非常弱,此时的自混合信号几乎呈现为正弦波的形状;当 $0.1 \leq C < 1$ (弱反馈状态)时,信号条纹发生倾斜,自混合信号波形呈现为锯齿状;当 $C \geq 1$ (强反馈状态)时,锯齿状条纹逐渐消失,自混合信号的波形几乎与外腔的波形相同。不同反馈系数下的自混合干涉信号强度的仿真结果如图1所示。

合干涉传感器的光源有以下两个优点:外1)与传统EELs相比,VCSELs具有阈值电流低、部效率高的特点,因此它们的功耗非常低,这一特点使得VCSELs具有优于其他半导体激光器的寿命,其寿命可达到 10^5 h;2)相比传统的EELs,VCSELs对温度的敏感性低^[13],

无需提供额外的温控装置,因此具有良好的稳定性。

与传统 EELs 的结构不同,VCSELs 通常在激光二极管的旁边内置一个 PD,并将 TO(transistor outline)封装的窗口玻璃作为反射面(如图 2 所示),检测光功率。在这种情况下,内置 PD 的探测效率较低,灵敏度不高。为了解决这一问题,人们经常采用的办法是增大内置 PD 的接收面积,但这会相应增大探测器的电容,减小频带。这些问题给二维 VCSELs 阵列用作位移或速度传感器带来了难度^[14]。鉴于以上原因,用 VCSELs 的 PN 结电压代替 PD 光电流来获得激光自混合干涉信号的做法,具有重要价值。

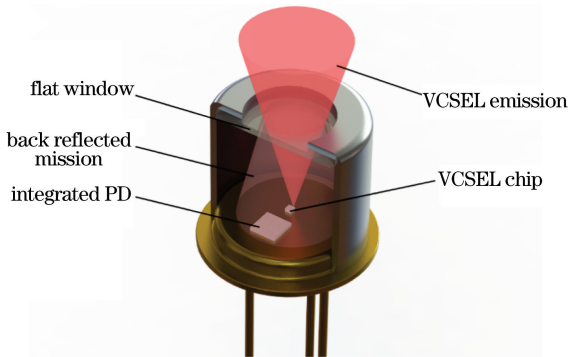


图 2 集成有 PD 的 TO 封装的 VCSEL 结构示意图
Fig. 2 Structure diagram of TO packaged VCSEL with photodiode integrated

2.4 实验系统

本实验中使用的 VCSEL 是 HFE4093-332 型激光二极管,其阈值电流仅约为 1.5 mA,输出功率为 1 mW,工作波长为 850 nm。该二极管采用 TO-46 封装,带有玻璃窗,有一个内置 PD。该二极管内置 PD 的工作方式如图 2 所示,PD 接收的反射光功率比例预计为发射功率的 8%。本文通过比较 VCSEL 中的 LD 结电压信号与内置 PD 的光电流信号来研究 VCSEL 传感器的可行性。

图 3 展示了同时采集内置 PD 光电流信号和 LD 结电压信号的位移测量实验装置图。VCSEL 安装在光学隔振平台的固定底座上,由精密恒流源驱动出光。反射镜被固定在压电陶瓷(PZT)表面,激光经准直后入射至反射镜,部分光反射回 VCSEL 中,产生激光自混合干涉效应。在放大电路中,内置 PD 采集激光的功率变化产生成比例的光电流,光电流通过一个跨阻放大器进行放大(该放大器在 100 kHz 带宽下的增益系数为 100 kV/A)。激光二极管结电压信号中包括驱动 LD 的偏置电压和自混合干涉产生的电压波动,电压信号通过一个低噪声前置放大器进行放大(该放大器同时具有隔直流和滤波功能,其放大增益设置为 80 dB)。采集的光电流信号和结电压信号在示波器上实时显示。

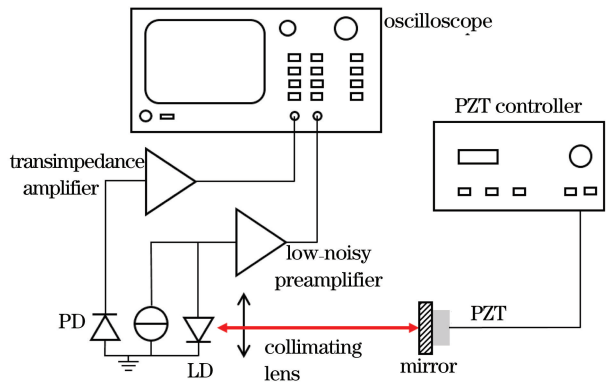


图 3 PD 光电流和 LD 结电压的位移测量实验装置图
Fig. 3 Experimental device for displacement measurement of photodiode photocurrent and laser diode junction voltage

3 结果分析

3.1 信噪比分析

在实验中可以发现,内置 PD 上采集的光电流信号的信噪比相对于 LD 结电压采集的信号的信噪比更高。图 4 展示了低信噪比时两者的结果(通道 1

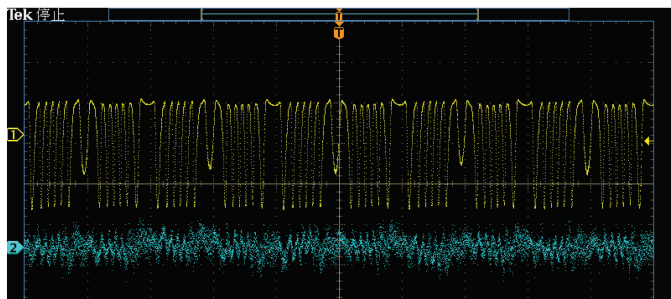


图 4 低信噪比时内置 PD 光电流与 LD 结电压的自混合信号图

Fig. 4 Image of self-mixing interference signals of integrated photodiode photocurrent and laser diode junction voltage with low signal-to-noise ratio

为 PD 信号,通道 2 为 LD 结电压信号)。在光路准直、光反馈等都最理想的情况下,本研究小组发现 LD 上的偏置电流会显著影响结电压信号的质量。因此,本文比较了不同偏置电流下 PD 信号与 LD 结电压信号的结果,自混合信号的信噪比与 VCSEL 上偏置电流之间的关系如图 5 所示,图中横坐标为偏置电流与阈值电流之比。在偏置电流从阈值电流逐渐上升到 6 倍阈值电流过程中,PD 采集得到的自混合信号的信噪比一直维持在较高水平上,但随着电流增加有下降的趋势;LD 采集的自混合信号的总体信噪比均较 PD 采集的低。在 4 倍阈值电流以下时,LD 采集的结电压信号的信噪比低于 PD 采集的光电信号的信号;当偏置电流达到 4~6 倍阈值电流时,LD 采集的结电压信号的信噪比接近于 PD 采集的光电信号的信噪比。

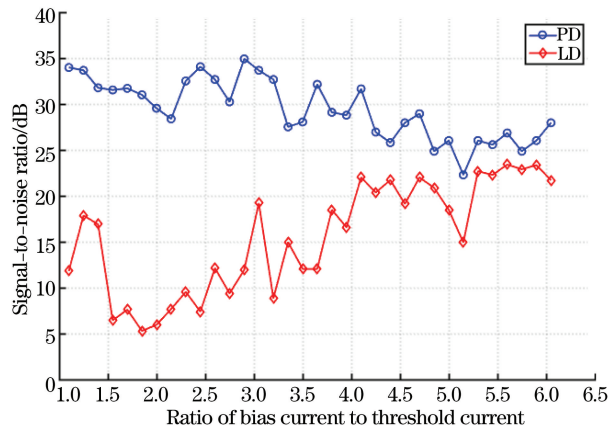


图 5 不同偏置电流水平下自混合干涉信号的信噪比对比
Fig. 5 Comparison of signal-to-noise ratio of self-mixing interference signals under different bias current levels

3.2 测量结果分析

在位移测量实验中,本文将驱动电流调节至 5.5 倍阈值电流,控制压电陶瓷进行峰峰值分别为 $2.5\ \mu\text{m}$ 和 $5.0\ \mu\text{m}$ 的正弦运动。同时采集内置 PD 光电流和 LD 结电压上的信号,结果如图 6 及表 1 所示。在 PD 光电流和 LD 结电压上都观察到了经典的锯齿状自混合信号,且该信号的强度处于弱反馈与中等反馈之间。从图 6 中可以看出,PD 上光电流信号的信噪比高于 VCSEL 上 LD 结电压信号的信噪比,但 PD 光电流和 LD 结电压信号图中均可清晰地分辨条纹的数量,且两者条纹数均符合理论预期。这表明,VCSEL 的 LD 结电压与内置 PD 光电流在位移传感实验中具有相近的性能。

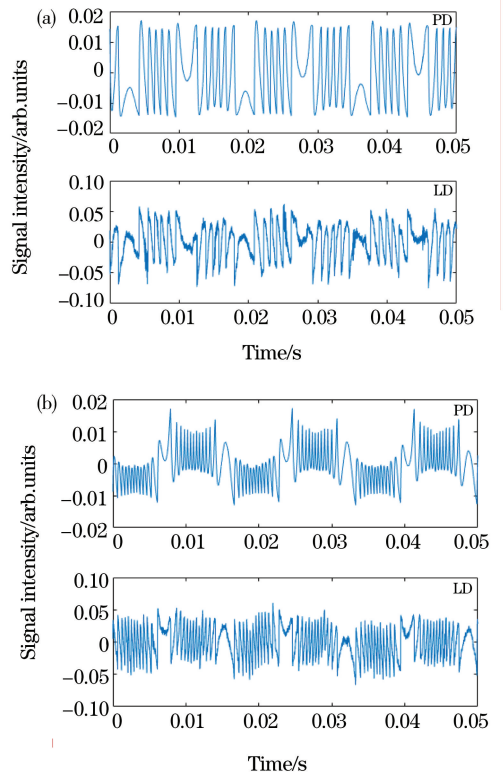


图 6 位移实验中内置 PD 光电流与 LD 结电压的自混合信号对比图。(a) $2.5\ \mu\text{m}$;(b) $5.0\ \mu\text{m}$
Fig. 6 Comparison of self-mixing interference signals of integrated photodiode and laser diode junction voltage in displacement experiment.
(a) $2.5\ \mu\text{m}$; (b) $5.0\ \mu\text{m}$

表 1 位移实验测量结果

Table 1 Measurement results of displacement experiment

Motion distance of PZT $D/\mu\text{m}$	Number of stripes	
	Theoretical value	Experimental value
2.5	5.9	6
5.0	11.8	12

4 结 论

本文提出了一种基于探测并放大 VCSEL LD 结电压信号的自混合干涉传感技术。以激光自混合位移传感为例,通过测试比较 VCSEL 内置 PD 的光电流与 LD 的结电压信号,本文得到如下结论:在适当的电流下,LD 结电压信号与 PD 光电流信号具有相近的信噪比,两种实现方式得到的信号波形在处理后具有同相的相位与相同的条纹数。因此,在自混合干涉位移或距离测量传感中,可以使用 LD 结电压方法代替常规 PD 光电流方法。需要说明的是,使用 LD 结电压的传感系统具有更简单的结构,

可能会发展成二维激光自混合干涉图像传感器,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Mao W, Zhang S L, Zhang L Q, et al. Optical feedback effect and the optical feedback interferometry for sensing application [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 16-22, 26.
毛威, 张书练, 张连清, 等. 激光回馈效应及其传感应用研究的进展[J]. *光学技术*, 2007, 33(1): 16-22, 26.
- [2] Donati S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(3): 393-417.
- [3] Szweda R. VCSEL applications diversify as technology matures[J]. *III-Vs Review*, 2006, 19(1): 34-38.
- [4] Tucker J R, Lim Y L, Zvyagin A V, et al. A massively parallel imaging system based on the self-mixing effect in a vertical-cavity surface-emitting laser array[C]//*Northern Optics*, April 23, 2006, Bergen, Norway. New York: IEEE Press, 2006: 41-45.
- [5] Lim Y L, Kliese R, Bertling K, et al. Self-mixing flow sensor using a monolithic VCSEL array with parallel readout[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11720-11727.
- [6] Zhu B, Wang B G, Shao L. System on sensing technology utilizing self-mixing effect of VCSEL[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(8): 104-106, 110.
朱波, 王宝光, 邵磊. 单模 VCSEL 的自混合传感测振系统[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(8): 104-106, 110.
- [7] Hao H, Wang M, Guo D M, et al. Self-mixing interference effect of VCSEL and the application on microdisplacement measurement[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7844: 78440Y.
- [8] Li Y J, Zong N, Peng Q J. Characteristics and progress of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050006.
李玉娇, 宗楠, 彭钦军. 垂直腔面发射半导体激光器的特性及其研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 050006.
- [9] Chen S L, Zhang X, Jiang J, et al. VCSEL side-pumped all solid-state lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1001001.
陈思露, 张鑫, 蒋静, 等. VCSEL 侧面抽运的全固态激光器[J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1001001.
- [10] Liu F H, Gong X, Zhang Y N, et al. Research progress on 808 nm VCSEL-array-pumped solid-state lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 120001.
刘芳华, 龚鑫, 张雅楠, 等. 808 nm 垂直腔面发射激光器阵列抽运的全固态激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 120001.
- [11] Larsson A. Advances in VCSELs for communication and sensing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(6): 1552-1567.
- [12] Xu J. Research on velocimeter and range finder utilizing self-mixing effect in single-mode VCSEL and three dimensional imaging[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006: 29-32.
徐军. 单模 VCSEL 自混合测速、测距及三维图像技术的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- [13] Perchoux J, Bosch T. Multimode VCSELs for self-mixing velocity measurements [C] // *Sensors*, 2007 IEEE. October 28-31, 2007, Atlanta, GA, USA. New York: IEEE Press, 2007: 419-422.
- [14] Tucker J R, Lim Y L, Bertling K, et al. Fluid flow rate measurement using the change in laser junction voltage due to the self-mixing effect [C] // *2006 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices*. December 6-8, 2006, Perth, WA, Australia. New York: IEEE Press, 2006: 192-195.