

文章编号 1004-924X(2011)01-0023-06

基于垂直腔面发射半导体激光器的自混合测速实验

吕亮, 张可, 戴绩俊, 朱军, 甄胜来, 郝文良, 俞本立
(安徽大学 光电信息获取与控制教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)

摘要: 针对激光自混合速度传感应用, 采用新型垂直腔面发射激光器作为自混合干涉系统光源, 对采用不同散射表面类型和工作电流所获得的自混合测速实验结果进行了研究。研究表明, 黑色相纸材质的散射表面会对自混合信号产生不利影响; 选择激光器的工作电流在阈值电流 1~1.4 倍时能获得较大且稳定的自混合信号。考虑该测速系统实际应用中存在开机预热时间, 讨论了激光自混合系统的开机重复度。结果表明, 开机后 17 s 左右, 频率计计量的多普勒频率趋于准确和稳定。此研究结果可为垂直腔面发射半导体激光器自混合测速系统的光源选择和参数优化提供指导。

关键词: 光学测量; 垂直腔面发射激光器; 自混合效应; 速度测量仪

中图分类号: TN248.4; TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111901.0023

Self-mixing velocimetry based on vertical-cavity surface-emitting laser

LÜ Liang, ZHANG Ke, DAI Ji-jun, ZHU Jun, ZHEN Sheng-lai, HAO Wen-liang, YU Ben-li

(*Key Laboratory of Opto-electronic Information Acquisition and Manipulation of the Ministry of Education, Hefei 230039, China*)

Abstract: The self-mixing interference based on a Vertical-cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) was investigated. By taking a VCSEL as the source of a self-mixing interferometric system, the effect of different types of scattering surfaces and injection currents on the self-mixing signals was analyzed. It is concluded that the black and glossy photographic paper target will bring unfavorable influence on the self-mixing velocimeter and the operating currents with 1–1.4 times of the threshold currents can offer a self-mixing signal with a stable and great amplitude. For the longer preheating time, the power-up time of self-mixing velocimeter was discussed, and the results show that Doppler frequency will be stable and accurate after 17 s. The obtained results provide instructions for the parameter optimization and the choice of light source of a self-mixing velocimeter using the VCSEL.

Key words: optical measurement; Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL); self-mixing; velocimeter

收稿日期: 2010-03-26; 修订日期: 2010-07-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60940022); 安徽省教育厅重点科研计划资助项目 (No. KJ2010A019)

1 引言

1963年, King^[1]等人首次在实验中发现可动外部反射镜的反馈光会引起气体激光器的光强波动, 并且波动信号移动一个条纹对应外部反射镜半个光波波长的位移。在随后的研究中, 人们又发现当外界的散射表面将一部分出射激光反馈回谐振腔中并且达到一定强度时, 会引起激光器光功率波动甚至激发波长改变和光谱线宽展宽等变化, 这些变化会对激光器工作性能带来极其严重的不利影响, 被称之为激光自混合效应。最初, 人们总是在设法消除这种影响, 但随着研究工作的深入, 人们发现外界光反馈也可能产生提高激光器纵模的边模抑制比、调谐激光器出射光频率、压窄光谱线宽等有益影响^[2]。同时反馈光还携带了外界反馈面的速度、位移等信息, 并在自混合效应中体现出来, 利用这种特性可以实现物体运动速度、位移、振动等物理量的测量。由于激光自混合信号的特点与传统干涉类似, 这种基于激光自混合效应的现代测试技术被称之为激光自混合干涉技术。

近几年, 自混合干涉技术在速度测量^[3]、三维测量^[4]、距离测量^[5]、激光器结构参数测量^[6]等领域得到广泛应用。由于实验上最先观察到的自混合信号波动频率和多普勒频率一致, 因此, 激光自混合干涉技术在速度测量^[7-8]方面首先得到了发展。激光自混合测速技术具有精度高、噪声低、空间分辨率高、以及可实现速度矢量测量等诸多优势。此外, 激光自混合测速技术相对传统多普勒测速技术无需参考光, 光路简单且极易准直, 适用于传统多普勒测速技术较难使用的特殊场合。

20世纪90年代以来, 垂直腔面发射半导体激光器 (Vertical-cavity Surface-emitting Laser, VCSEL) 的制造技术日趋成熟, 再次促进了光通信、光电测试等领域的飞速发展。由于 VCSEL 具有阈值电流低、动态单模特性好、圆对称出射光束、调制速率和线性度高、易于集成等优点, 逐渐成为通信和传感系统的理想光源^[9-10]。目前, 基于 VCSEL 的激光自混合测速技术已受到人们的广泛关注^[11-12], 并逐步应用于诸多近距离速度传感领域, 特别是各种计算机输入设备中。但相对传统的边发射半导体激光器 (Edge Emitting La-

ser, EEL) 自混合测速系统, 该项研究可谓刚刚起步, 仍存在一些限制系统特性的关键性问题有待研究与解决。

为了进一步了解基于 VCSEL 的激光自混合测速技术的特点和现阶段存在的问题, 本文对采用 VCSEL 作光源的测速系统进行了研究, 对不同散射表面、工作电流对自混合测速信号的影响进行了分析讨论, 并研究了测速系统的开机重复度。文中的结果为进一步优化基于 VCSEL 的激光自混合测速系统参数, 深入探讨自混合信号产生机理奠定了基础。

2 激光自混合速度测量系统实验装置

激光自混合测速系统的实验装置如图 1 所示, 系统由垂直腔面发射半导体激光器、透镜、散射表面、信号发生器、放大电路、信号处理系统、示波器、频率计等组成。VCSEL 封装在固定的用于散热的金属套筒内, 准直透镜固定在套筒一端, 通过调节螺丝深度来调整准直透镜位置。整个套筒和激光器驱动检测电路安装在三维调整架上, 可调节激光器入射角度、激光器高度和入射点位置。被测表面是被直流电机驱动的转动圆盘, 实验中通过调节入射点距圆盘中心的距离实现连续速度测量。探测器使用 VCSEL 内部封装的光电二极管 (Photodiode, PD) 拾取自混合信号后送入信号处理电路, 最终得到外界待测物体的多普勒频率和方向信息, 实现速度测量和方向判别。实验系统结构简单、紧凑、易于调整且可靠性强。

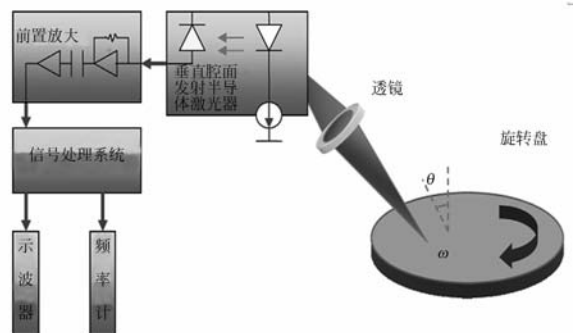


图 1 激光自混合测速系统装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of self-mixing velocimeter setup

激光自混合测速系统中激光被运动表面散射, 其中一部分散射光又经原路反馈回激光器谐

振腔,同谐振腔内的光混合并调制激光器出射光的光频率及光功率,即产生激光自混合效应。激光器内置探测器所探测的光强波动频率对应于外界物体运动引起的多普勒频移^[13]:

$$f_D = 2v \cos \theta / \lambda, \quad (1)$$

式中 v, θ, λ 分别代表物体转动的线速度、运动方向与光轴夹角和激光中心波长。通过对多普勒频率的测量,即可获得待测物体的运动速度。

3 实验结果和讨论

3.1 不同散射表面类型

为了研究不同散射表面类型对自混合测速结果所造成的影响,本文在测速实验中对不同颜色和材质的散射表面产生的自混合信号进行了研究。实验中采用 Osram 公司中心波长为 850 nm 的 VCSEL 作为激光自混合测速系统的光源,工作电流为 8.57 mA,频率计采样时间为 0.1 s。

表 1 为不同散射表面类型下自混合测速分别在顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向下的测试结果。可以发现不同散射材质和颜色的散射表面放大后均能产生 3 mV 以上的自混合信号幅度,可以满足频率计频率计数的幅度要求,即激光自混合测速系统的要求。但是由表 1 可知,黑颜色以及相纸材质的散射表面(散射特性较差)所带来的自混合信号明显弱于普通白色纸面(漫反射,散射特性较好)产生的自混合信号,这些误差将会对自混合测速带来不利影响。自混合信号的劣化不仅表现在自混合信号幅度上,而且同一速度下测量结果的均方差与测量平均值的比值也明显变大,特别是黑色相纸材料在慢速度下的测速结果的均方差相对于其它材料甚至高出一个数量级。因此,激光自混合测速系统应尽量避免采用黑颜色以及相纸材质等散射特性较差的散射表面,以优化 VCSEL 激光自混合测速系统。

表 1 不同散射表面类型下的自混合测速结果

Tab. 1 Experimental results with different types of surfaces

Surface	Velocity	Direction	Frequency	Relative Var.	Amplitude
			/kHz	/%	/mV
White Paper	Fast	CW	274.16	0.044	7.0
		CCW	274.951	0.03	
	Slow	CW	14.18	0.342	
		CCW	14.23	0.547	
White, Glossy photographic paper	Fast	CW	285.22	0.132	4.5
		CCW	281.77	0.092	
	Slow	CW	14.48	0.426	
		CCW	14.55	0.355	
Black, Glossy photographic paper	Fast	CW	276.66	0.156	3.0
		CCW	276.66	0.082	
	Slow	CW	14.09	1.016	
		CCW	13.83	1.061	

3.2 不同工作电流

理论研究表明,不同 VCSEL 工作电流下,自混合信号的幅度和多普勒频率测量都会发生变化。因此,寻找合适的 VCSEL 工作电流以达到激光自混合测速系统的最佳工作状态是自混合信号测量实验研究的主要目的。

实验中,同样采用 Osram 公司中心波长为 850 nm 的 VCSEL 作为激光自混合测速系统的光源,散射表面为普通白色打印纸。由于信号处理

系统中前置放大增益设置与表 1 不同,因此图 2 中自混合信号幅度较表 1 有大幅提高。

图 2,图 3 分别为激光自混合信号幅度和所测多普勒频率随 VCSEL 工作电流变化曲线。由图 2 可知,VCSEL 工作电流在 8~11.5 mA 时,自混合信号幅度稳定在 120 mV 附近。从图 3 可知,VCSEL 工作电流在 8~11.5 mA 时,频率值保持在 33.5 kHz 附近。这是由于所测自混合信号采取波数测量的方法进行频率计数,当自混合

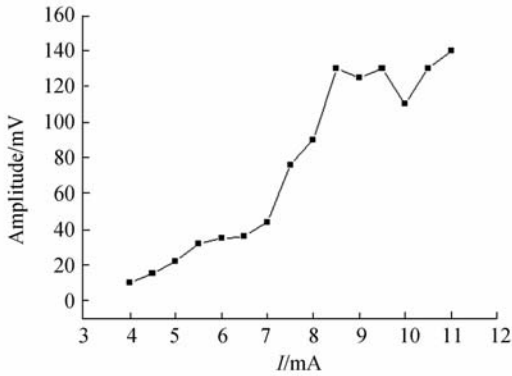


图 2 激光自混合信号幅度随 VCSEL 工作电流的变化
Fig. 2 Relationship between amplitude of self-mixing signal and VCSEL injection current

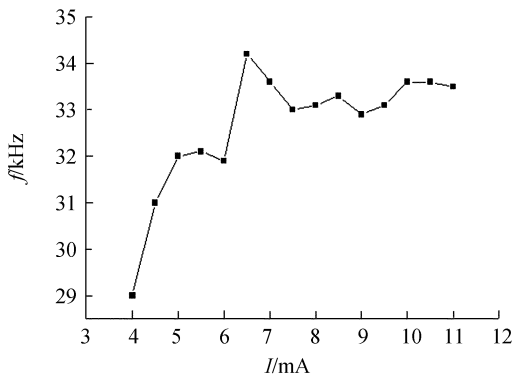


图 3 激光自混合信号多普勒频率随 VCSEL 工作电流的变化
Fig. 3 Relationship between frequency of self-mixing signal and VCSEL injection current

信号幅度较小时,波数漏计较多,所测频率较低,工作电流较大时则有可能产生跳摸现象,所测多普勒频率难以稳定。因此,激光自混合信号的幅度和多普勒频率均在 VCSEL 工作电流为 8~11.5 mA 时较为稳定(其中较小波动是受测量重复精度的影响)。实验中,同时发现自混合信号波形的不对称性也随工作电流发生变化,同样在 8~11.5 mA 时较好。

图 2,图 3 的实验结果表明,在 VCSEL 激光自混合测速系统中,将激光器的工作电流选择在阈值电流(Osram 公司 VCSEL 阈值电流为 8 mA)的 1~1.4 倍较为合适,可获得较大且稳定的自混合信号幅度以及较精确的多普勒频率计数。

3.3 开机重复度

VCSEL 激光自混合测速系统实际应用中存

在一定的开机预热时间,系统需要一定的弛豫时间才能达到稳定,从而保证测速准确度,因此有必要对自混合系统开机重复度进行研究。图 4 为两次开机状态下,频率计计量的多普勒频率与开机时间的关系(实验条件同上,其中激光器工作电流为 10 mA)。

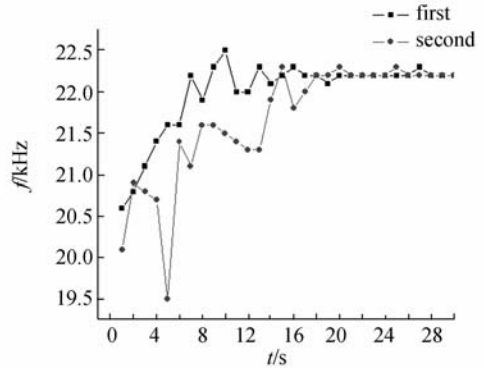


图 4 多普勒频率随开机时间的变化
Fig. 4 Relationship between power-up time and Doppler frequency

如图 4 所示,频率计针对两次开机计量的多普勒频率均在开机后 17 s 左右趋于稳定,而在此之前频率计计数变化较为剧烈,不利于多普勒频率的测量。该结果表明有必要对系统的电子学部分进行改进,以减少激光自混合测速系统的预热时间,使系统能尽快满足激光自混合测速的需要。

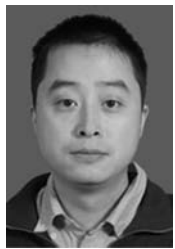
4 结 论

本文针对垂直腔面发射半导体激光器自混合测速系统采用不同表面类型和工作电流所获得的自混合测速实验结果,分析、讨论了各系统参数对激光自混合测速系统的影响。分析结果表明,黑色相纸材质的散射表面会对激光自混合信号产生不利影响;激光器的工作电流选择在阈值电流 1~1.4 倍之间工作时能获得较大且稳定的自混合信号。同时,还讨论了激光自混合系统的开机重复度,结果显示开机后 17 s 左右,频率计计量的多普勒频率趋于准确和稳定。研究结果可为垂直腔面发射半导体激光自混合测速系统的光源选择和参数优化提供指导。

参考文献:

- [1] KING P G R, STEWARD G J. Metrology with an optical maser[J]. *New. Sci.*, 1963, 17: 180-182.
- [2] RUDD M, GORNIKA E. Laser Doppler velocimeter employing the laser as a mixer-oscillator[J]. *J. Phy. E*, 1968, 1(5): 723-726.
- [3] LU L, GUI H Q, XIE J P, *et al.*. Effect of external cavity length on self-mixing signals in multilongitudinal-mode FP-LD[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(4): 568-571.
- [4] OHTOMO T, SUDO S, OTSUKAL K. Three-channel three-dimensional self-mixing thin-slice solid-state laser-Doppler measurements[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(3): 609-616.
- [5] GUO D, WANG M. Self-mixing interferometry based on a double-modulation technique for absolute distance measurement[J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(9): 1486-1491.
- [6] WEI L, XI J, YU Y, *et al.*. Linewidth enhancement factor measurement based on optical feedback self-mixing effect: a genetic algorithm approach[J]. *Opt. A, Pure Appl. Opt.*, 2009, 11(4): 1-9.
- [7] SHINOHARA S, MOCHIZUKI A, YOSHIDA H, *et al.*. Laser Doppler velocimeter using the self-mixing effect of a semiconductor laser diode[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(9): 1417-1419.
- [8] SHIMIZU E T. Directional discrimination in the self-mixing type laser Doppler velocimeter[J]. *Applied Optics* 1987, 26(21): 4541-4544.
- [9] HUANG M, ZHOUN Y, HASNAIN C. Nano electro-mechanical optoelectronic tunable VCSEL[J]. *Opt. Express*, 2009, 15(3): 1222-1227.
- [10] MANDRE S, ELSÄßER W, FISCHER I, *et al.*. Evolution from modal to spatially incoherent emission of a broad-area VCSEL[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(7): 4452-4464.
- [11] LIM Y, NIKOLIC M, BERTLING K, *et al.*. Self-mixing imaging sensor using a monolithic VCSEL array with parallel readout[J]. *Opt. Express*, 2009, 17(7): 5517-5525.
- [12] TUCKER J, RAKIC A, BRIEN C O', *et al.*. Effect of multiple transverse modes in self-mixing sensors based on vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(4): 611-619.
- [13] WANG W M, GRATAN K T V, PALMER A W, *et al.*. Self-Mixing Interference inside a single-mode diode laser for optical sensing applications[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(9): 1577-1587.

作者简介:



吕亮(1978—),男,安徽合肥人,副教授,硕士生导师,2000年于安徽大学获得硕士学位,2005年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事光纤传感和光电技术等方面的研究。E-mail: lianglu78@gmail.com.



张可(1985—),男,硕士研究生,2007年于安徽大学获学士学位,主要从事光电传感及感测系统的研究。E-mail: zhangke8596@163.com



戴绩俊(1984—),男,硕士研究生,2008年于安徽大学获得学士学位,主要从事光电传感及感测系统的研究。E-mail: djj577@163.com



朱军(1982—),男,博士研究生,讲师,2003年、2008年分别于安徽大学获得学士、硕士学位,主要从事光电传感及感测系统的研究。E-mail: oezhu@163.com



甄胜来(1977—),男,博士,2000年、2003年、2008年于安徽大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事光电传感及感测系统的研究。E-mail: slzhen@ahu.edu.cn



俞本立(1963—),男,博士,教授、博士生导师。1985年于安徽大学获得学士学位,1988年于安徽光学精密机械研究所获硕士学位,2001年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事特种光电传感及感测系统的研究。E-mail: benliyu@ahu.edu.cn



郝文良(1972—),男,博士研究生,1996年于河北师范大学获得学士学位,2007年于东北师范大学获得硕士学位,主要从事光纤传感的研究。E-mail: hwl1972@gmail.com

● 下期预告

利用激光实时频谱直接观测分子结构变化

Takayoshi Kobayashi^{1,2}

(1. University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585 Japan;
2. ICORP, JST, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi, Saitama, 332-0012 Japan)

在 RuII(TPP)(CO) 中, 利用脉宽 ≤ 5 fs 的激光脉冲超快光谱同时研究了电子松弛和振动动态。研究认为, 由 ${}^1Q_{x(1,0)}(\pi, \pi^*)$ and ${}^1Q_{x(0,0)}(\pi, \pi^*)$ 产生的信号按 ${}^1Q_{x(1,0)}(\pi, \pi^*) \rightarrow {}^1Q_{x(0,0)}(\pi, \pi^*) \rightarrow {}^3(d, \pi^*) \rightarrow {}^3(\pi, \pi^*)$ 和 ${}^1Q_{x(0,0)}(\pi, \pi^*) \rightarrow {}^3(d, \pi^*) \rightarrow {}^3(\pi, \pi^*)$ 的顺序从高能态衰减到低能态。 ${}^1Q_{x(1,0)}(\pi, \pi^*)$, ${}^1Q_{x(0,0)}(\pi, \pi^*)$, ${}^3(d, \pi^*)$, 和 ${}^3(\pi, \pi^*)$ 的电子寿命依次为 (230 ± 70) fs, $(1\ 150 \pm 260)$ fs, $(2\ 150 \pm 360)$ fs 和大于 4.8 ps。 ${}^3(d, \pi^*)$ 和 ${}^3(\pi, \pi^*)$ 的寿命估计为 $(2\ 150 \pm 360)$ fs 和大于 4.8 ps。计算动态 Stokes-shift 过程中的能量衰减率, 得到了从 ${}^1Q_{x(1,0)}(\pi, \pi^*)$ 到 ${}^1Q_{x(0,0)}(\pi, \pi^*)$ 的渡越时间为 (190 ± 40) fs, ${}^1Q_{x(1,0)}(\pi, \pi^*)$ 的寿命与该渡越时间一致性相对较好。对频谱图的分析表明, 依赖时间变化的振动光谱与自旋态变化有关, 自旋态可以通过曲线交叉点或者单态和三重态之间的势能面的圆锥交面从激发单重态中的 Franck-Condon 态变化到三重态。研究发现, 不能简单地使用单重态信号频谱的指数衰减形式和三重态振动信号频谱的指数增长形式来表示这种动态变化。相反, 振动频谱的变化伴随着复杂的动态变化。首先, 单重态振动频谱发生衰减, 然后产生不同于单重态和三重态的新的振动频谱。新的振动频谱增长和衰减后, 三重态的振动频谱开始增长。这种动态变化似乎与电子频谱的动态变化不同。这种明显差异的原因可解释为: 振动频谱的变化可以敏感地检测处于平衡点和过渡状态或者接近锥形交集状态中的单重态和三重态的结构差异。