

文章编号: 1001-3806(2012)02-0160-05

## 基于激光回馈效应的多普勒测速技术

赵世杰<sup>1</sup> 张鹏<sup>2</sup> 张永芹<sup>1</sup> 杨玉萍<sup>1</sup> 邓勇<sup>1\*</sup>

(1. 南通大学 机械工程学院 南通 226019; 2. 清华大学 精密仪器与机械系 精密测试技术及仪器国家重点实验室 北京 100084)

**摘要:** 激光回馈现象得到了广泛的研究和关注,而多普勒测速是激光回馈研究中的一个重要分支。介绍了激光回馈多普勒测速技术的基本原理,以及3种不同类型的基于激光回馈原理的多普勒测速技术,总结了其工作原理以及优缺点,并对激光回馈多普勒测速技术的发展方向进行了探讨。

**关键词:** 激光技术;多普勒测速;激光回馈;自混合干涉;双频激光器

中图分类号: O436; TH744 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.004

### Velocity measurement techniques based on laser feedback effect

ZHAO Shi-jie<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>, ZHANG Yong-qin<sup>1</sup>, YANG Yu-ping<sup>1</sup>, DENG Yong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Laser-feedback phenomena have been extensively investigated and concerned, and Doppler velocimetry is one of the important branches of laser-feedback research fields. The basic principle of laser-feedback Doppler velocimetry was introduced. Then the structures, principle, advantages and disadvantages of three types of laser Doppler velocimetry based on feedback effect were reviewed and discussed in detail. Finally, the development of velocity measurement based on laser feedback effect was also discussed.

**Key words:** laser technique; Doppler velocimetry; laser feedback; self-mixing interference; dual-frequency laser

## 引言

激光多普勒测速技术经过了40多年的研究,其应用已遍及航空、航天、机械、能源、冶金、水文、化工和医学等领域,成为科学研究和新产品研发过程中的重要手段之一,并凭借其非接触、空间分辨率高、响应速率快、精度高、量程大等优点,继续得到了广泛的重视和研究<sup>[1]</sup>。激光多普勒效应是激光多普勒测速技术的重要理论基础,按照不同的实现手段,可以分为迈克尔逊干涉型测速仪<sup>[2]</sup>、差分混频单频激光多普勒测速仪<sup>[3]</sup>、单频激光速率干涉仪<sup>[4]</sup>、正交偏振双频激光多普勒测速仪<sup>[5-6]</sup>、HH型双频激光多普勒测速仪等<sup>[7]</sup>。

1963年, KING首次报道了激光回馈(国外也称自混合干涉: self-mixing interference)效应<sup>[8]</sup>,此后对于该效应开展了越来越多的研究<sup>[9-14]</sup>。而激光回馈现象也由最初想尽一切办法也要消除的“干扰”,变成了可以

用于多种测量领域的有用现象<sup>[15]</sup>。

1968年, RUDD首次提出了利用激光器本身作为混合-振荡器的一种激光多普勒测速仪(laser Doppler velocimetry, LDV)的方案<sup>[16]</sup>,此后基于激光回馈的多普勒测速得到了广泛的研究<sup>[17-22]</sup>,并成为激光回馈领域研究最早、内容最多的一个分支。由于只有一个测量臂,因此,激光回馈多普勒测速的结构就相对简单,而且具有非接触测量、自准直、能够判断运动方向、低成本等优点。

作者介绍了基于激光回馈效应的激光多普勒测速技术的基本原理;综述了现有的3种不同类型的激光回馈多普勒测速技术,即一般回馈测速技术、带声光调制的回馈测速技术、基于正交偏振双频激光器的回馈测速技术的原理和各自优缺点;对激光回馈测速技术改进方向进行了分析和讨论。

## 1 激光多普勒测速原理

根据多普勒频移公式,并考虑光束的往返,探测器接收到的频移量为<sup>[16]</sup>:

$$\Delta\nu = 2\mu \frac{\vec{v} \cdot \vec{k}}{\lambda} \cos(\alpha/2) \quad (1)$$

作者简介: 赵世杰(1987-),男,硕士,主要从事测试技术及仪器方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: dengy@ntu.edu.cn

收稿日期: 2011-07-26; 收到修改稿日期: 2011-08-15

式中  $\alpha$  为入射和散射方向的夹角  $\mu$  是介质折射率,  $\Delta\nu$  是频率改变量,  $\vec{v}$  是目标速度,  $\lambda$  为激光波长,  $\vec{k}$  是平行于入射和散射方向平分线的单位矢量。

一般情况下,激光回馈多普勒测速的公式可以用下式进行计算<sup>[23]</sup>:

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

式中  $\theta$  是入射激光束的轴线与速度矢量之间的夹角,  $v$  是物体的运动速度大小,  $\lambda$  为光波长。

图 1 为激光回馈多普勒测速的基本原理图。

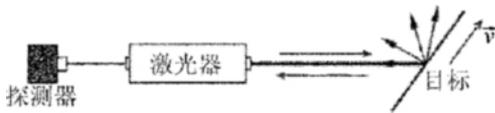


图 1 激光回馈多普勒测速原理图

激光器出射光束照射到被测物体表面,由于多普勒效应的存在,物体表面反射(或散射)的光携带了能反映物体运动速率信息的多普勒频率改变量;反射(或散射)光的一部分返回到激光腔内,与激光腔内的原始频率光形成拍频(即多普勒频移量),由探测器检测出频移量,即可由该频移量得出物体运动速度的大小。而运动的方向则是根据检测信号的波形特征或是频域特征来进行判断。

## 2 激光回馈多普勒测速类型及其分析

### 2.1 一般回馈测速

激光器出射光束经透镜会聚入射到被测物体表面,反射或散射光被移频后,附加了被测物体的运动信息;反射或散射光的一部分光进入激光器的腔内,与腔内光合成拍频,通过检测拍频可以计算出被测物体的速度大小,原理如图 2 所示。

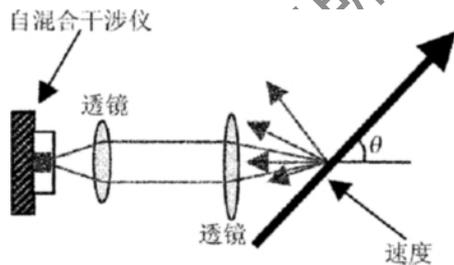


图 2 激光回馈测速原理图

研究表明,半导体激光器在一定的回馈水平下,合成的拍频信号为类锯齿波形状,如图 3 所示。根据锯齿波的倾斜方向可以确定物体运动速度的方向<sup>[20]</sup>。当被测物体向着激光器运动时,锯齿波形状就如同图 3a 所示,远离激光器运动的时候,锯齿波就如同图 3b 所示。此方式的缺点一是半导体激光器回馈多普勒测速是依靠波形的倾斜方向进行判向,对回馈水平的要求高,实际测量时拍频信号的波形难以保持锯齿形,会造成判向信息的丢失;二是测速的范围和精度有待进一步提高。

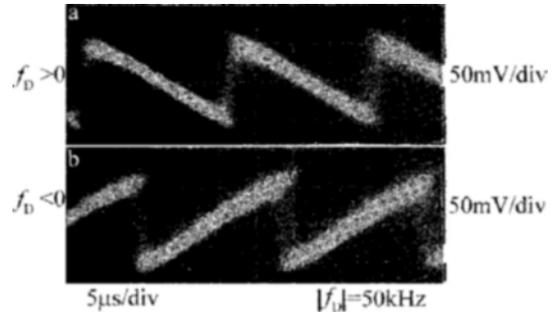


图 3 不同运动方向对应的激光回馈波形  
a- $f_D > 0$ (接近) b- $f_D < 0$ (远离)

这种类型目前研究得最多,也最成熟。所用的激光器包括了 He-Ne 激光器<sup>[16]</sup>、CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[18]</sup>、半导体激光器<sup>[22-23]</sup>、微片和固体激光器<sup>[22 24-26]</sup>、GaN 蓝光激光器<sup>[26]</sup>等;近年来,垂直腔面发射半导体激光器(vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) 的回馈多普勒测速也得到了广泛研究<sup>[27-29]</sup>,其能够显示的速率的分辨率在 5.2mm/s 与 479.9mm/s 之间,速率测量精度优于 3.1%。结构框图如图 4 所示。

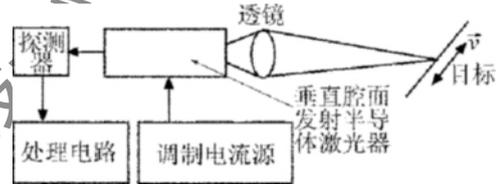


图 4 垂直腔面发射半导体激光器多普勒测速仪框图

此外,研究的方向还有信号的处理方法以及测试结构<sup>[30-31]</sup>。根据 SHINOHARA 的研究,理论上此原理的最大测量速率高达每秒几公里,对应的拍频为 1GHz,可以分辨方向的最大测速为 100m/s,对应的拍频为几百兆赫兹。实验达到的指标是在  $\theta = 85^\circ$  的情况下,能够成功分辨速度矢量大小的范围是 23mm/s ~ 23m/s,能够测量的速率范围是 0.2mm/s ~ 34m/s<sup>[13]</sup>。在参考文献 [32] 中,在使用半导体激光器时,理论上可以测量的最大速率为 5km/s,对应的拍频为 10GHz,但是受响应频率的限制只能达到 2GHz。

由(2)式可知,频移量与  $\theta$  的大小有着密切的关系,SCALISE 等人的实验<sup>[33]</sup>得到  $\theta$  在  $30^\circ \sim 90^\circ$  时可以获得拍频信号,如果角度再小,则获得的表面光功率太弱,得不到信号。在参考文献 [34] 中,通过在外腔中加入补偿镜的方法,经过实验和理论的分析,可以增大测量距离,从原来的 20cm 增加到 60cm,并且很好地改善了干涉信号的质量,输出信号的波形有了明显的规律性,振幅的波动很平缓,系统对反射物反射率要求低、抗干扰能力强。参考文献 [35] 中对激光回馈多普勒测速中入射角的影响及结构的优化进行了分析研究。仿真结果表明,入射角为  $30^\circ$  时,精度和信号幅值达到了最优的情况。激光多普勒测速跟踪精度在

10mm/s ~ 470mm/s 范围内, 优于 1.3%。在参考文献 [36] 中, 对半导体激光自混合测速系统的精度进行了分析, 实验装置如图 5 所示。

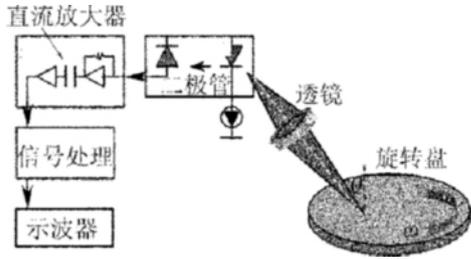


图5 激光自混合测速系统装置图

激光自混合多普勒测速系统由半导体激光器、透镜、散射表面等组成。半导体激光器前端面发出的光经透镜聚焦, 照射在运动的散射表面上。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, 同谐振腔内的光相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。其光功率的变化可以由封装在激光器尾部的光电探测器探测, 经电子学处理后可获得所需自混合信号。分析测量得到的自混合信号即可实现物体速度的测量。

图 6 为激光自混合测速结果与理论上测速速率值的相对误差, 由图中可知, 相对误差在非低速情况下基本在 1% 以内, 而低速时相对误差则在 1% 以上。因此, 所采用的半导体激光自混合测速系统在 4.06mm/s ~ 475.3mm/s 范围内具有较高的测量精度。

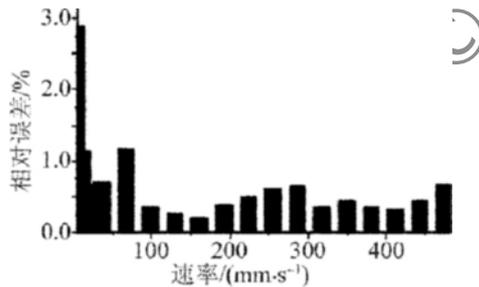


图6 自混合信号频率测量的相对误差与速率关系曲线

当测量非合作目标时, 由于物体被测表面的粗糙程度不同, 而使散射光具有随机和独立的位相, 此时回馈信号会被调制。有关散斑效应在激光回馈多普勒测速中的影响和应用, 也得到了普遍关注<sup>[37-39]</sup>。

### 2.2 带声光调制的回馈测速

OTSUKA 等人利用微片 LiNdP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> (LNP) 激光器, 在回馈外腔中增加两个声光调制器, 研究了高灵敏度自混合激光多普勒测速仪<sup>[21]</sup>, 如图 7 所示。

激光经两个声光调制器移频后由透镜聚焦入射到被测物体上, 散射光再次经两个声光调制器移频后与腔内激光形成拍频。在一定抽运水平下, 第 1 个声光调制器 (acoustooptic modulator, AOM) 的反射光的频移量比较大, 而此时 LNP 激光器不能响应比弛豫振荡

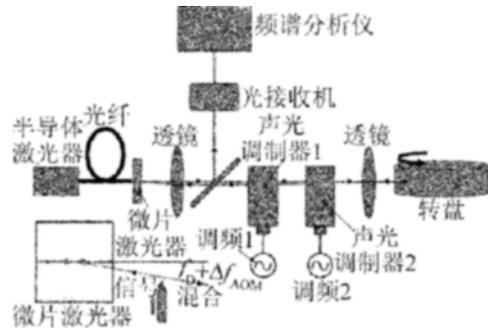


图7 LD抽运LNP激光器自混合多普勒测速仪原理

频率高很多的频率, 因此, 第 1 个声光调制器上的反射光不能形成可见的回馈。而第 2 个声光调制器的后表面反射的光对激光器可以形成回馈, 故在无被测物体或被测物体静止时, 探测器可以探测到一个拍频信号, 此拍频信号可以作为速率判向的基准。当被测物体运动时, 探测器探测的信号为两个拍频信号, 其表现为在基准信号的一侧出现另一个分量。两拍频信号的间距反映了速度的大小, 而两者间的位置关系取决于速度的方向。如图 8 所示, 图中横向频率范围为 0MHz ~ 4MHz, 纵向 1 格为 10dB; 正中央的拍频信号就为基准信号; 在图 8a 中, 速度为朝向激光器的方向, 因此在基准信号的右边出现了另一个拍频信号, 而图 8b 中的速度就是远离激光器的方向。

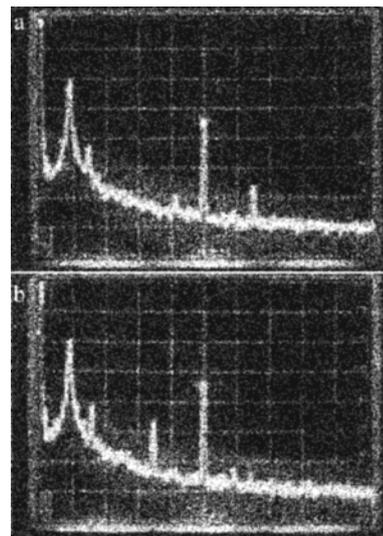


图8 自混合多普勒测速仪速度判向频谱图  
a—接近 b—远离

该系统的分辨力达到 1mm/s, 灵敏度高, 不需要高度复杂的光学和电子产品。当使用宽带声光调制器和通过增加抽运功率水平来增加 LNP 激光器的响应带宽时, 可期望获得高出一个数量级的动态范围。缺点是需要昂贵的声光调制器; 且由于多普勒频移量不能大于声光调制器的移频量, 因此测速范围受到限制。

### 2.3 基于正交偏振双频激光器的回馈测速

基于正交偏振双频激光器回馈的多普勒测速方法的基本原理如图 9<sup>[40]</sup> 所示。

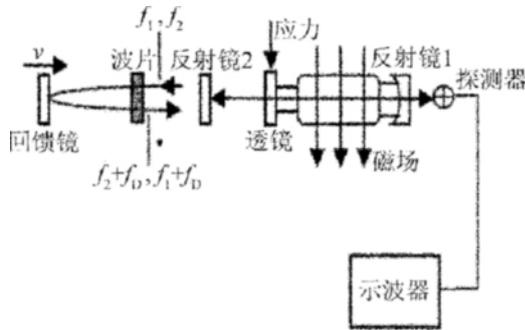


图9 基于双频激光器的激光回馈多普勒测速实验图

通过频率分裂的方法产生正交偏振激光<sup>[41]</sup>，两频率分别设为  $f_1$  和  $f_2$ ，且  $f_2 > f_1$ 。在激光器与被测物体之间放置  $\lambda/4$  波片，波片的快慢轴与正交偏振的两个频率的偏振方向分别成  $45^\circ$  夹角。这样当激光来回通过波片后，偏振方向改变  $90^\circ$ ，即两正交偏振的频率分量的偏振方向发生了互换。携带了多普勒频移量  $f_D$  的散射光返回腔内后，原始频率为  $f_1$  的光与频率  $f_2 + f_D$  的回馈光混合，它们形成的拍频  $f_{b1}$  为：

$$f_{b1} = (f_2 + f_D) - f_1 = \Delta f + f_D \quad (3)$$

式中  $\Delta f$  为正交偏振的两频率的频差。同理，原始频率为  $f_2$  的光与频率  $f_1 + f_D$  的回馈光混合，它们形成的拍频  $f_{b2}$  为：

$$f_{b2} = f_2 - (f_1 + f_D) = \Delta f - f_D \quad (4)$$

这两个拍频相对于  $\Delta f$  对称，可以由光电探测器检测。由 (3) 式和 (4) 式可知：

$$f_D = \frac{f_{b2} - f_{b1}}{2} \quad (5)$$

得到多普勒频移量后，被测物体的速率即可求得。

实验中，首先当被测物体不动时，两正交频率回馈后形成的拍频就是频差  $\Delta f$ ；当物体运动时，在  $\Delta f$  两侧将各出现一个频率，即  $f_{b1}$  和  $f_{b2}$ ，两频率的差决定了多普勒频移量的大小，也就是被测物体速度的大小；两频

率的位置关系决定了被测物体速度的方向。

此原理的好处是：(1) 与 OTSUKA 等人提出的方法相似，都是利用频域实现判向，但是结构上无需两个昂贵的声光调制器，结构更紧凑、成本更低，测程也可能提高；(2) 由于原理上是通过频域特征来判向，因此对信号波形的要求不高，更易于实现；(3) 在测量原理上，通过两个正交频率的互换，由两频率分量的差求解多普勒频移量，可以部分抵消系统误差；同时，两频率分量的差是多普勒频移量的 2 倍，在一定程度上提高了系统的分辨力；(4) 原理上与差动式多普勒测速具有类似的效果，但是只有一个测量臂，结构简单。

法国的研究小组提出了类似的测量原理，如图 10<sup>[42]</sup> 所示。他们采用在激光腔内插入一对  $\lambda/4$  波片来产生双频，并通过调整两波片快慢轴之间的夹角来调节拍频，使其接近弛豫振荡频率，以提高速率测量的动态范围。在回馈外腔加入法拉第旋转器来旋转光的偏振方向，使两个正交模式的光来回都旋转  $90^\circ$ ，用偏振片来选择一路光进行测量。他们还比较了在类似结构下的传统外差式干涉测量的效果，发现这种新结构有更好的测量动态范围。

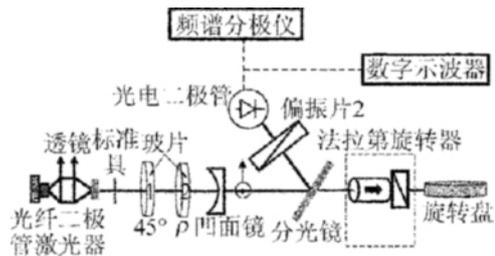


图10 双偏振 Yb:Er 玻璃激光器回馈多普勒测速实验装置图

这 3 种激光回馈多普勒测速技术的各自优缺点如表 1 所示。

表 1 3 种激光回馈多普勒测速类型的优缺点

	优点	缺点
一般回馈测速	研究比较成熟，结构简单，无需严格光学对准	对回馈水平要求高，信号处理难度大，测量液体速度不够实用
带声光调制的回馈测速	分辨力和灵敏度较高	价格昂贵，测量范围受限
基于正交偏振双频激光器的回馈测速	结构紧凑、成本更低、易于判向、分辨力高、测量范围更大	精度受频率稳定性影响，测量范围受腔结构限制

### 3 结论和展望

近几十年来，激光回馈效应的研究已经取得了丰硕成果，但是其理论和实验的研究还远远没有结束，今后还将得到不断的扩展、深入和完善。由于工业生产的实际需要，动态参量测量越来越得到大家的重视，而基于激光回馈效应的多普勒测速技术，以其结构紧凑、

成本较低、非接触测量、测量精度高、动态响应快、测量范围大等优点，在固体运动速度、液体流速测量方面，也将得到更深入的研究和发展。在各领域的普及和广泛应用，其相关研究也必然得到加强。根据前面介绍的已有的激光回馈多普勒测速技术原理以及优缺点的分析可知，目前的测速仪测速上限受到限制，无法满足测量高速运动物体运动速度的需要；测量精度还存在

提升空间,尤其在低速测量时精度不高;抗干扰能力也有待提高。因此,新型激光回馈多普勒测速技术以及高精度、大量程、抗干扰能力强、稳定性好的激光回馈多普勒测速仪必然是将来的研究重点。

## 参 考 文 献

- [1] SHEN X. Laser Doppler velocimetry and its application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1-5 (in Chinese).
- [2] BARKER L M, HOLLENBACH E. Interferometer technique for measuring the dynamic mechanical properties of materials [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1965, 36(11): 1617-1620.
- [3] SIMPSON D, SMY P R. Optical mixing of laser radiation reflected from a shock wave [J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(12): 4928-4932.
- [4] HILLIARD R L, SHEPHERD G G. Wide-angle Michelson interferometer for measuring Doppler line widths [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(3): 362-369.
- [5] NEJAD S M, OLYAEE S. Accuracy improvement by nonlinearity reduction in two-frequency laser heterodyne interferometer [C]//13th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2006: 914-917.
- [6] EOM T B, CHOI T Y, LEE K H, *et al.* A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer [J]. *Measurement Science & Technology*, 2002, 13(2): 222-225.
- [7] ZHANG Y Y, GONG K, HE Sh F, *et al.* Progress in laser Doppler velocity measurement techniques [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(11): 1157-1162 (in Chinese).
- [8] KING P G R, STEWARD G J. Metrology with an optical maser [J]. *New Science*, 1963, 17: 180-182.
- [9] LANG R, KOBAYASHI K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, QE16(3): 347-355.
- [10] SHIMIZU E T. Directional discrimination in the self-mixing type laser Doppler velocimeter [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(21): 4541-4544.
- [11] GROOT P, GALLATIN G, GARDOPEE G, *et al.* Laser feedback metrology of optical systems [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(13): 2462-2464.
- [12] PETERMANN K. Laser diode modulation and noise [M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1991: 251-256.
- [13] WANG W M, BOYLE W J O, GRATAN K T V, *et al.* Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(9): 1551-1558.
- [14] ZHU H W, YE H Y. Research and measurement of feedback strength of optical feedback self-mixing interferometry systems [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6): 847-850 (in Chinese).
- [15] ZHANG S L. Laser feedback technology and its development [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007(11): 65-71 (in Chinese).
- [16] RUDD M J. A laser Doppler velocimeter employing the laser as a mixer-oscillator [J]. *Journal of Physics*, 1968, E1(7): 723-726.
- [17] WANG W M, BOYLE W J O, GRATAN K T V, *et al.* Fiber-optic Doppler velocimeter that incorporates active optical feedback from a diode laser [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(11): 819-821.
- [18] CHURNSIDE J H. Laser Doppler velocimetry by modulating a CO<sub>2</sub> laser with backscattered light [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(1): 61-66.
- [19] ÖZDEMİR S K, TAKAMIYA S, ITO S, *et al.* Self-mixing laser speckle velocimeter for blood flow measurement [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, 49(5): 1029-1035.
- [20] SHINOHARA S, NAITO H, YOSHIDA H, *et al.* Compact and versatile self-mixing type semiconductor laser Doppler velocimeters with direction-discrimination circuit [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1989, 38(2): 574-577.
- [21] OTSUKA K, KAWAI R, ASAKAWA Y, *et al.* Highly sensitive self-mixing measurement of Brillouin scattering with a laser-diode-pumped microchip LiNdP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> laser [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(24): 1862-1864.
- [22] JENTINK H W, MUL F F M, SUICHIES H E, *et al.* Small laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a diode laser [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(2): 379-385.
- [23] 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.
- [24] KAWAI R, ASAKAWA Y, OTSUKA K. Ultrahigh-sensitivity self-mixing laser Doppler velocimetry with laser-diode-pumped microchip LiNdP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(6): 706-708.
- [25] KERVEVAN L, GILLES H, GIRARD S, *et al.* Self-mixing laser Doppler velocimetry with a dual-polarization Yb:Er glass laser [J]. *Applied Physics*, 2007, B86(1): 169-176.
- [26] KLIESE R, LIM Y L, BOSCH T, *et al.* GaN laser self-mixing velocimeter for measuring slow flows [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(6): 814-816.
- [27] GUI H Q, LÜ L, XU J, *et al.* New laser Doppler velocimetry using self-mixing effect in a vertical-cavity surface-emitting laser modulated by triangular current [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5644: 199-204.
- [28] ALBERT J, SORIANO M C, VERETTENICOFF I, *et al.* Laser Doppler velocimetry with polarization-bistable VCSELs [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 1006-1012.
- [29] PERCHOUX J, DOUGAN H E D, BONY F, *et al.* Photodiode-free Doppler velocimeter based on self-mixing effect in commercial VCSELs [C]//IEEE Sensors 2008 Conference. Lecce, Italy: IEEE, 2008: 290-293.
- [30] KOELINK M H, SLOT M, MUL F F M, *et al.* Laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser: theory [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(18): 3401-3408.
- [31] PLANTIER G, SERVAGENT N, SOURICE A, *et al.* Real-time parametric estimation of velocity using optical feedback interferometry [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, 50(4): 915-919.
- [32] ZHANG Zh Y, GAO Y, ZHAO X H, *et al.* Theoretic analysis on the maximum measurable velocity of a self-mixing laser diode velocimeter [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7382: 73821M1-73821M6.
- [33] SCALISE L, PAONE N. Laser Doppler vibrometry based on self-mixing effect [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 38(3/4): 173-184.
- [34] LIU M, ZHANG Y, SUN J Y. Study on self-mixing interference effect with compensative cavity [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(2): 206-209 (in Chinese).
- [35] HUANG W, GUI H Q, LU L, *et al.* Effect of angle of incidence on self-mixing laser Doppler velocimeter and optimization of the system [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(6): 1662-1667.

要的参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] SEGEV M, CROSIGNANI B, YARIV A, *et al.* Spatial solitons in photorefractive media [J]. *Physical Review Letters*, 1992, 68(7): 923-926.
- [2] CHRISTODOULIDES D N, CARVALHO M I. Bright, dark and gray spatial soliton states in photorefractive media [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1995, B12(9): 1628-1633.
- [3] SEGEV M, VALLEY G C, BASHAW M C, *et al.* Photovoltaic spatial solitons [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1997, B14(7): 1772-1781.
- [4] LIU J S, LU K Q. Spatial soliton wave in biased photovoltaic-photorefractive crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, 47(9): 1509-1514 (in Chinese).
- [5] ZHANG G Y, LIU J S. Self-deflection characteristics of dark photovoltaic spatial solitons in closed circuit [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(10): 1559-1561 (in Chinese).
- [6] DONG L W, MA L H, WANG H. Self-bending effect of spatial soliton in photorefractive medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1485-1489 (in Chinese).
- [7] HOU Ch F, YUAN B H, SU X D. Incoherently coupled screening-photovoltaic soliton pairs [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 49(10): 1969-1971 (in Chinese).
- [8] JI X M, WANG J L, LIU J S, *et al.* The temperature dependence of incoherently coupled bright-dark screening photovoltaic soliton pairs [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 386-389 (in Chinese).
- [9] CASTRO-CAMUS E, MAGANA L F. Prediction of the physical response for the two-photon photorefractive effect [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(13): 1129-1131.
- [10] HOU Ch F, PEI Y B, ZHOU Z X, *et al.* Spatial solitons in two-photon photorefractive media [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 71(5): 053817.
- [11] HOU Ch F, ZHANG Y, JIANG Y Y, *et al.* Photovoltaic solitons in two-photon photorefractive materials under open-circuit conditions [J]. *Optics Communications*, 2007, 273(2): 544-548.
- [12] ZHANG Y, HOU Ch F, SUN X D. Grey spatial solitons due to two-photon photorefractive effect [J]. *Chinese Physics*, 2007, 16(1): 159-164.
- [13] ZHANG Y, HOU Ch F, SUN X D. Incoherently coupled spatial soliton pairs in two-photon photorefractive media [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(6): 3261-3265 (in Chinese).
- [14] ZHANG G Y, LIU J S. Screening-photovoltaic spatial solitons in biased two-photon photovoltaic photorefractive crystals [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2009, 26(1): 113-120.
- [15] LIU J S, HAO Z H. Evolution of separate screening soliton pairs in a biased series photorefractive crystal circuit [J]. *Physical Review*, 2002, E65(6): 066601-066613.
- [16] LIU J S. Separate spatial soliton pairs and solitons interaction in unbiased series photorefractive crystal circuit [J]. *Physics Letter*, 2002, A300(2/3): 213-220.
- [17] JI X M, JIANG Q Ch, YAO J H, *et al.* Separate spatial soliton pairs in an unbiased series two-photon photorefractive crystal circuit [J]. *Optics and Laser Technology*, 2010, 42(2): 322-327.
- [18] JI X M, LIU J S. Screening soliton pairs in a biased series two-photon photorefractive crystal circuit [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(2): 2950-2956 (in Chinese).
- [19] JI X M, JIANG Q Ch, LIU J S. Separate screening-photovoltaic soliton pairs in series two-photon photorefractive crystal circuit [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2370-2376 (in Chinese).
- [36] LÜ L, DAI J J, ZHU J, *et al.* Accuracy of velocity measurement based on self-mixing laser Doppler velocimeter setup [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(6): 6-10 (in Chinese).
- [37] SHIBATA T, SHINOHARA S, IKEDA H, *et al.* Laser speckle velocimeter using self-mixing laser diode [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(2): 1398-1400.
- [38] HAN D F, WANG M, ZHOU J P. Self-mixing speckle in an erbium-doped fiber ring laser and its application to velocity sensing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(18): 1398-1400.
- [39] HAGE R H, BOSCH T, PLANTIER G, *et al.* Modeling and analysis of speckle effects for velocity measurements with self-mixing laser diode sensors [C] // IEEE Sensors Conference. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2008: 953-956.
- [40] LIU G, ZHANG Sh L. Self-mixing laser doppler velocimeter based on dual frequency lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5633: 363-370.
- [41] ZHANG Sh L. Physical characteristics of orthogonally polarized dual frequency laser by cavity tuning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011(5): 1-7 (in Chinese).
- [42] KERVEVAN L, GILLES H, GIRARD S, *et al.* Absolute distance measurement with heterodyne optical feedback on a Yb:Er glass laser [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17): 4084-4091.

(上接第 164 页)