

doi: 10.3788/gzxb20164504.0414003

共线外差干涉系统相位特性

张文静, 孙运强

(中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051)

摘 要:以单束正交线偏振光为光源,利用索列尔-巴比涅相位补偿器使相位连续变化,采用锁相放大器进行数据采集,设计了一种由光纤耦合输出的窄频半导体激光器和双声光调制器组成的共线外差干涉系统,对其相位特性进行了研究,分析了激光束漂移及光源谱线宽度对相位测量的影响.实验表明:系统的相位分辨率为 $0.3611 \mu\text{m}$,相位灵敏度为 $27.386^\circ/\text{mm}$,测量误差为 0.090 rad ;可以消除由声光调制器光强调制引起的相位误差,抑制激光束漂移引起的误差,以及减弱环境因素产生的噪声对测量结果的影响.

关键词:物理光学;共线外差干涉系统;石英晶体的双折射;相位测量;双声光调制器

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)04-0414003-6

Phase Characteristics of the Collinear Heterodyne Interferometer System

ZHANG Wei-jing, SUN Yun-qiang

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Using a pair of orthogonally linearly polarized beams as the light source, the Soleil-Babinet compensator to offer a continuous phase retardation and a lock-in amplifier as the data collector, a collinear heterodyne interferometer system was presented, which is consisted of a narrow band semiconductor laser with fiber-coupled output and two acousto-optic modulators. The phase characteristics of this system were researched and the influence of the laser beams drift, amplitude modulation and laser line width on the phase measurement was analyzed. The results show that the phase resolution is $0.3611 \mu\text{m}$, the phase sensitivity is $27.386^\circ/\text{mm}$, and the measurement error of this system is 0.090 rad . And this system we proposed can eliminate the affect of the amplitude modulation of acousto-optic modulator and the error caused by laser beam drift. Because the two beams are perfectly collinear, the noise resulting from the environment is also reduced.

Key words: Physical optics; Collinear heterodyne interferometer system; Quartz crystal birefringence; Phase measurement; Double acousto-optic modulators

OCIS Codes: 140.3535; 040.2840; 120.3180; 120.5050; 260.5430; 260.1440

0 引言

激光外差干涉技术能够利用相位比较获得较高的测量分辨率,除具有测量速度快、抗干扰能力强、检测灵敏度高的优点外,还可以利用标准射频技术来处理相位或振幅信息,从而避免了低频 $1/f$ 噪声的干扰^[1-3].因此,激光外差干涉技术具有十分广泛的应用,例如,微小振幅振动测量^[4-6,2],由表面等离子体共振引起的相位变化的测量^[7-11],非线性误差的研究^[12-14,1]以

及实时^[15]和快速测量^[16]等.

外差干涉测量技术可以利用射频技术解调测量信号的相位或者振幅变化,因此,可以简化光路设计与信号处理^[2].文献[15]研究了高性能实时外差干涉系统,该系统是在马赫-泽德干涉仪^[17]的参考光路与信号光路中分别放置驱动频率不同的两个声光调制器,从而构成了马赫-泽德型外差干涉结构.由于该类型的外差干涉结构的参考光束与测量光束具有不同的光路,因此外界环境因素所产生的噪声会影响实际测量.文献

基金项目:山西省自然科学基金(No.2012011010-1)资助

第一作者:张文静(1989-),女,博士研究生,主要研究方向为光外差通信与应用. Email:736272126@qq.com

导师:孙运强(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为现代通信技术及应用. Email:sunyunqiang@nuc.edu.cn

收稿日期:2015-10-15;录用日期:2016-01-12

<http://www.photon.ac.cn>

[7]利用共线(所有光线的几何光路均相等)外差干涉技术,研究了表面等离子体共振时,介质折射率变化所引起的 p 光与 s 光之间的相位变化,其实验装置是由 He-Ne 激光器、两个驱动频率分别为 40 MHz、40.06 MHz 的声光调制器以及两个偏振分束器等组成.因为共线外差干涉仪的参考光束与信号光束具有相同的光路,所以该类型的干涉仪可以极大地减弱外界环境噪声对测量的影响.然而,由于 He-Ne 激光器的体积大,限制了外差干涉仪的小型化,同时,利用拍频为 60 kHz 的外差干涉系统,难以实现对快速相位变化的测量^[16].

因此,本文提出利用光纤耦合输出的窄频半导体激光器和双声光调制器构成拍频为 30 MHz 的共线外差干涉系统.利用了该外差干涉测量系统参考光路与信号光路的对称性,以及单光束中正交偏振的两束光具有很好的共线性,极大地减弱了外界环境产生的噪声对测量结果的影响.同时,利用石英晶体的双折射特性对外差干涉系统的相位特性进行了研究,为研发半导体激光器为光源的高灵敏度相位调制表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)传感器提供了参考.

1 实验装置及原理

索列尔-巴比涅相位补偿器是一种相位延迟量连续可调的宽带零级相位器件,能够对振动方向互相垂直的两束线偏振光产生可控相位差,可以获得 $0 \sim 2\pi$ 之间任意的相位延迟^[18-21].本文提出的共线外差干涉系统中使用北京大恒公司的 GCO-030101 型索列尔-巴比涅相位补偿器,提供可变相位延迟,其原理结构如图 1.

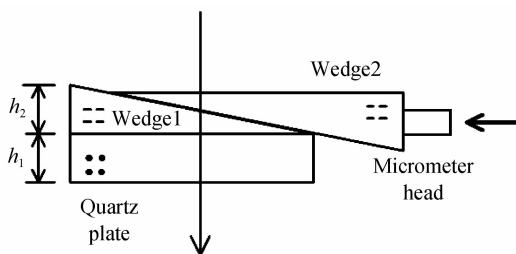


图 1 索列尔-巴比涅相位补偿器结构原理

Fig. 1 The structure of Soleil-Babinet compensator

索列尔-巴比涅相位补偿器是由两个光轴平行、劈尖顶角相等、长度不同的石英劈以及一个石英平行平面薄板组成的,石英薄板的光轴与石英劈的光轴互相垂直,且它们的光轴都与光传播方向垂直.沿如图 1 的水平方向移动上劈,可以使得光路中两个石英劈的总厚度连续变化,从而获得连续的相位延迟量.

共线外差干涉系统的实验装置主要由光源(Laser Device, LD),偏振分束器(Polarization Beam Splitter,

PBS),直角边镀有增透膜的直角棱镜(Right-Angle Prism, $RAP_1 \sim RAP_3$),两个具有不同驱动频率的声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM_1)和(AOM_2),可见光分束器(Beam Splitter, BS),两个检偏器(Analyzer, AL_1)和(AL_2),索列尔-巴比涅相位补偿器(Soleil-Babinet Compensator, SBC),两个带放大的硅光电探测器(型号 PDA10A)(Photoelectric Detector, PhD_1)和(PhD_2),两个中心频率为 30 MHz 的带通滤波器,锁相放大器(型号 SR884)以及示波器组成,其实验装置原理图如图 2.实验中,光源为光纤耦合输出的窄频半导体激光器,其波长为 633 nm,谱线宽度为 100 MHz,两个声光调制器(AOM_1)和(AOM_2)的驱动频率分别为 80 MHz 与 110.12 MHz,硅光电探测器的带宽为 180 MHz.

激光器(LD)发出的光束,通过偏振分束器(PBS)后,分成两束线偏振光:一束为 p 光,另一束为 s 光. p 光通过声光调制器(AOM_1)、s 光通过声光调制器(AOM_2)后,分别产生两个 0 级衍射光和两个 +1 级衍射光,其中两个 +1 级衍射光分别通过光纤聚焦器(Beam Focuser, BF_1)与(BF_2)之后耦合至偏振保持单模光纤(Polarization Maintaining Single-mode Fiber, PM SM-fiber).再经过光纤准直器(Beam Collimator, BC_1)与(BC_3)准直之后进入分束器(BS).通过分束器(BS)之后的水平光束与垂直光束分别经过两个直角棱镜(RAP_2)和(RAP_3)的全反射,形成对称的两束光.由图 2 可见,对称的两束光均为包含有 p 光与 s 光的合成光.垂直光束通过检偏器(AL_2)之后在光电探测器(PhD_2)的光敏面上发生干涉,并转换为拍频为 30 MHz 的电信号,本实验中,该信号作为系统的参考信号.水平光束经过相位补偿器(SBC)后携带变化的相位信

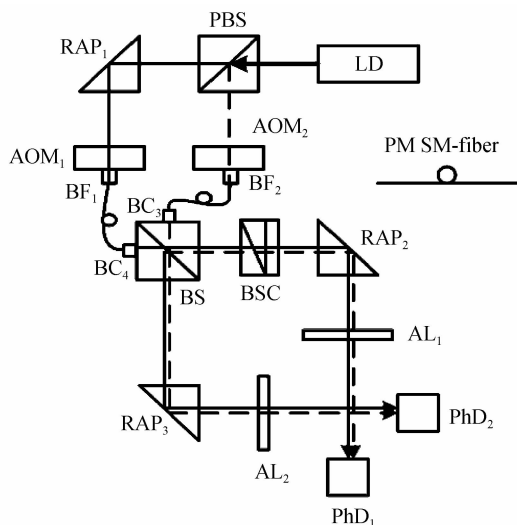


图 2 30 MHz 双声光调制器共线外差干涉系统

Fig. 2 The collinear heterodyne interferometer system with 30 MHz double acousto-optic modulators



图3 30 MHz 外差拍频信号

Fig. 3 30 MHz heterodyne beat frequency signal

息,通过检偏器(AL_1)之后在光电探测器(PhD_1)的光敏面上发生干涉,并转换为拍频为30MHz的电信号,本实验中,该信号作为系统的测量信号.测量光路中相位补偿器延迟量为0时,30 MHz拍频信号如图3,CH1通道为参考信号,CH2通道为测量信号.

从图3可以看出,参考信号与测量信号的振幅相等,两个信号之间的相位差为0,说明共线外差干涉系统的参考光路与信号光路具有较好的对称性.

假设声光调制器(AOM_1)与(AOM_2)的入射光束是一个单位振幅光束,其+1级衍射光的光强调制幅度分别为 b_p 与 b_s .由图2可以看出,通过分束器(BS)之后的垂直光束(参考光路)所包含的p光与s光的电场可分别表示为^[22]

$$E_{rp}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1+b_p \cos \omega_1 t} \cdot \cos [(\omega_0 + \omega_1)t + \phi_1 + \varphi_{1r}] \quad (1)$$

$$E_{rs}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1+b_s \cos \omega_2 t} \cdot \cos [(\omega_0 + \omega_2)t + \phi_2 + \varphi_{2r}] \quad (2)$$

式中, ω_0 为激光束的角频率, ω_1 与 ω_2 分别为声光调制器(AOM_1)和(AOM_2)的+1级衍射光的频移^[23], ϕ_1 与 ϕ_2 分别为声光调制器(AOM_1)和(AOM_2)的初始相位, φ_{1r} 与 φ_{2r} 为参考光路中,声光调制器(AOM_1)和(AOM_2)的+1级衍射光到达光电探测器(PhD_2)的相位.参考光路中的p光与s光在通过检偏器(AL_2)之后,在光电探测器(PhD_2)的光敏面上发生干涉,并转换为电信号.经过带通滤波器滤除该信号中的直流成份与频率大于30 MHz的成份后,光电探测器(PhD_2)输出的电信号可以表示为

$$I_r \propto \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi_r + \Delta\phi) \quad (3)$$

式中, $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$, $\Delta\varphi_r = \varphi_{1r} - \varphi_{2r}$, $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$.

由图2可以看出,通过分束器(BS)之后的水平光束(测量光路)所包含的p光与s光的电场可分别表示为^[22]

$$E_{mp}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1+b_p \cos \omega_1 t} \cdot \cos [(\omega_0 + \omega_1)t + \phi_1 + \varphi_{1m}] \quad (4)$$

$$E_{ms}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1+b_s \cos \omega_2 t} \cdot$$

$$\cos [(\omega_0 + \omega_2)t + \phi_2 + \varphi_{2m}] \quad (5)$$

式中, φ_{1m} 与 φ_{2m} 为测量光路中,声光调制器(AOM_1)和(AOM_2)的+1级衍射光到达光电探测器(PhD_1)的相位.测量光路中的p光与s光在通过检偏器(AL_1)之后,在光电探测器(PhD_1)的光敏面上发生干涉,并转换为电信号.经过带通滤波器滤除该信号中的直流成份与频率大于30 MHz的成份后,光电探测器(PhD_1)输出的电信号可以表示为

$$I_m \propto \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi_m + \Delta\phi) \quad (6)$$

式中, $\Delta\varphi_m = \varphi_{1m} - \varphi_{2m}$, $\Delta\varphi_m$ 的表达式为

$$\Delta\varphi_m = \frac{2\pi}{13.192} \Delta d \quad (7)$$

式中, $\Delta d = d - d_0$, d_0 与 d 分别为0延迟量与任意延迟量对应的测微丝杆位移.

2 实验结果与讨论

如图2的系统光路中,首先在直角棱镜(RAP_1)与偏振分束器(PBS)之间放置一个可调光阑,用于遮挡p光,此时,旋转检偏器(AL_1)使得光电探测器(PhD_1)输出的电信号为最小值,然后在分束器(BS)与直角棱镜(RAP_2)之间放置一个起偏器,在有光通过起偏器的状态下,旋转起偏器,当光电探测器(PhD_1)输出的电信号为最小值时,起偏器与检偏器(AL_1)处于正交状态.将索列尔-巴比涅相位补偿器放置于起偏器与直角棱镜(RAP_2)之间,使入射光线垂直通过补偿器的光学表面,此时,光电探测器(PhD_1)输出的电信号不一定为最小值.绕光线传播的方向旋转补偿器,使得光电探测器(PhD_1)输出的电信号为最小值,此时,补偿器晶轴方向与s光偏振方向重合.再将补偿器旋转 45° ,拧紧两个锁紧螺钉以防止器件转动.

当旋转补偿器 45° 之后,光电探测器(PhD_1)输出的电信号不再是最小值.调节补偿器的测微丝杆,使该信号变为最小值,此时,测微丝杆的位置 $d_0 = 5.25$ mm,即补偿器延迟量为0的位置;继续调节测微丝杆,光电探测器(PhD_1)输出的电信号逐渐变大,然后逐渐减小,直到再次为最小值,此时,测微丝杆的位置 $d_1 = 18.25$ mm,即补偿器延迟量为 λ (一个波长)的位置.确定好0和 λ 的位置之后,松开两个锁紧螺钉,再

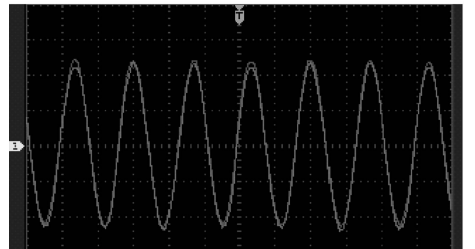

 图4 延迟量为 λ 的拍频信号

 Fig. 4 The heterodyne beat signal for retardation of λ

次将补偿器旋转 45° , 然后再次拧紧两个锁紧螺钉, 去掉遮挡 p 光的可调光阑和放置于分束器之后的起偏器, 此时, 得到延迟量为 λ 的拍频信号如图 4, CH1 通道为参考信号, CH2 通道为测量信号。

从图 4 可以看出, 当延迟量为 λ 时, 参考信号光束的振幅与测量信号光束的振幅相等, 两个信号之间的相位差为 2π 。

调节相位补偿器的测微丝杆, 测量 $0 \sim \lambda$ 之间的延迟量, 其相位延迟量与振幅变化可以通过锁相放大器 SR844 测得, 延迟量为 $\lambda/2$ 的拍频信号如图 5, CH1 通道为参考信号, CH2 通道为测量信号。

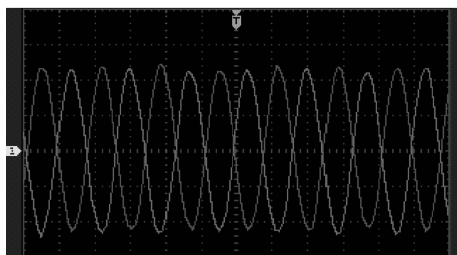


图 5 延迟量为 $\lambda/2$ 的拍频信号

Fig. 5 The heterodyne beat signal for retardation of $\lambda/2$

从图 5 可以看出, 当延迟量为 $\lambda/2$ 时, 参考信号光束与测量信号光束之间的相位差为 π , 说明共线外差干涉系统具有很好的线性相位特性。

测微丝杆的位移量和相位延迟量之间的关系曲线如图 6。

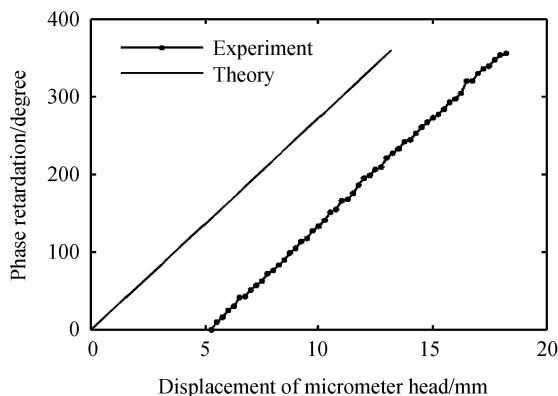


图 6 丝杆位移量和相位延迟量的关系

Fig. 6 The curve of displacement of head and phase retardation

从图 6 可以看出, 实验测得的丝杆位移量与相位延迟量的关系曲线与大恒公司产品出厂前测试的关系曲线相互平行. 实验系统的相位灵敏度为 $27.386^\circ/\text{mm}$, 与大恒公司产品出厂前测试的相位灵敏度 $27.289^\circ/\text{mm}$ 基本吻合, 证明了 30 MHz 共线外差干涉系统具有很好的线性相位特性。

在图 2 所示的共线外差干涉系统中, 测量光路和参考光路具有对称性^[13], 对称的两个光路相距较近. 因此, 环境因素产生的噪声所引起的相位就会同时出

现在式(3)与式(6)的相位中. 比较这两个光电信号的相位, 信号的初始相位以及环境噪声所引起的相位被减掉^[13,22,24]. 所以, 该系统可以极大地减弱外界环境产生的噪声对测量结果的影响, 从而提高系统测量的精确度。

3 分析

3.1 外差干涉系统的分辨率

外差干涉系统的分辨率 ($\Delta\delta_R$) 定义为: 相位补偿器测微丝杆位移量和相位延迟量的关系曲线的斜率与锁相放大器的分辨率的乘积, 其表达式为

$$\Delta\delta_R = \frac{\delta d}{\delta p} \Delta\varphi \quad (8)$$

式中, $\Delta\varphi$ 为锁相放大器的分辨率, δd 为测微丝杆的位移量, δp 为相位延迟量。

实验中所采用的锁相放大器 (SR844) 的分辨率 ($\Delta\varphi$) 为 0.01° , 在 $5.25 \text{ mm} \sim 18.25 \text{ mm}$ 的位移范围 (δd) 内旋转测微丝杆, 相位补偿器提供的相位变化 (δp) 为 $0 \sim 2\pi$ ^[19]. 因此, 系统的分辨率为 $0.3611 \mu\text{m}$ 。

3.2 声光调制器强度调制对系统的影响

在一个声光调制器中, 由于 0 级衍射光与 +1 级衍射光中具有光强调制的成分, 因此可以引起相位误差. 假设 a_0 与 a_1 分别为 0 级衍射光与 +1 级衍射光的光强调制幅度, 由 a_0 和 a_1 引起的相位误差为^[22]

$$\Delta\varphi_i = \arctan\left[\frac{2\sin\varphi}{2\cos\varphi + a_0 + a_1}\right] - \varphi \quad (9)$$

式中, φ 为测量光路光程差引起的相位. 例如, 当 $a_0 + a_1 = 0.08$ 时, 相位误差为 $\Delta\varphi_i \approx 4.6^\circ$. 在本文提出的双声光调制器构成的外差干涉系统中, 利用两个声光调制器 (AOM_1) 和 (AOM_2) 产生的 +1 级衍射光发生干涉, 其干涉信号的频谱中包含频率 $f_1, f_2, 2f_1 - f_2, f_1 - 2f_2, 2f_1, 2f_2, f_1 - f_2$ 和 $2(f_1 - f_2)$. 因为拍频项 ($f_1 - f_2$) 与两个 +1 级衍射光的光强调制幅度 b_0 与 b_s 无关, 所以, 该系统可以消除光强调制幅度所引起的相位误差^[22]。

3.3 激光束漂移对系统的影响

在一个声光调制器中激光束的漂移 (角漂移和横向漂移) 可以引起相位的变化. 假设在 Δt 的时间内, 激光束在声光调制器超声波传播方向上的位移为 x , 其对应的相位则为 $2\pi \times x/\lambda_s$ ^[22], 其中, λ_s 为超声波的波长. 例如, 当激光器的波长为 632.8 nm , 声光调制器的驱动频率为 40 MHz 时, 由激光束漂移所引起的相位变化约为 $6.32\pi \cdot \text{rad}$ (其它的参量见文献[22]). 本研究使用的两个声光调制器 (AOM_1) 和 (AOM_2) 的驱动频率分别为 80 MHz 与 110.12 MHz , 其超声波波长分别为 λ_{s1} 和 λ_{s2} , 由激光束漂移而引起的相位分别为 $2\pi \times x/\lambda_{s1}$ 和 $2\pi \times x/\lambda_{s2}$, 它们会同时出现在式(3)与式

(6)的相位中,比较这两个光电信号的相位,初始相位被减掉,同时激光束漂移所产生的相位就被抑制。

3.4 相位补偿器对系统的影响

如图1,假设石英平行平面薄板的厚度为 h_1 ,两个石英劈的总厚度为 h_2 。当 h_2 连续变化时,连续变化的相位延迟(δ)可以表示为^[18]

$$\delta = 2\pi \times B(\lambda) \times (h_1 - h_2) / \lambda \quad (10)$$

式中, λ 为入射激光束的波长, $B(\lambda)$ 为石英晶体双折射率,其表达式为^[25]

$$B(\lambda) = \frac{0.0315580}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{1469.20}} + 0.00828708 \quad (11)$$

式中, λ 的单位为 \AA 。由式(10)可以看出,影响系统测量误差的主要来源有:石英晶体双折射率的计算误差($\Delta B(\lambda)$)、测微丝杆的误差(Δh)以及激光的谱线宽度($\Delta \lambda$)。根据式(10)可以得到测量误差为^[19]

$$\Delta \delta = 2\pi \left\{ \left(\frac{\Delta h}{\lambda} \right)^2 \times \Delta B(\lambda)^2 + \left[\frac{B(\lambda)}{\lambda} \right]^2 \times \Delta \lambda^2 + \left[\frac{B(\lambda) \times \Delta h}{\lambda^2} \right]^2 \times \Delta \lambda^2 \right\}^{1/2} \quad (12)$$

实验中,石英晶体双折射率的经验公式相对误差优于 3×10^{-4} ^[25],测微丝杆的误差为0.001 mm,激光的谱线宽度为100 MHz。因此,系统的测量误差 $\Delta \delta$ 为0.090 rad。

4 结论

利用索列尔-巴比涅相位补偿器可以对振动方向互相垂直的两束线偏振光产生可控相位延迟的特点,利用锁相放大器,对由光纤耦合输出的窄频半导体激光器、双声光调制器等组成的30 MHz共线外差干涉系统的相位特性进行了研究。利用双声光调制器构建的外差干涉系统的测量光路和参考光路均包含p光与s光,这两个光路具有对称性,并且它们对称的部分相距较近。这种结构可以抑制激光束漂移引起的相位误差,可以减弱环境因素产生的共模噪声对测量结果的影响以及消除声光调制器光强调制的影响,容易实现高精度测量。采用具有数字测微计的索列尔-巴比涅相位补偿器和高消光比的检偏器,可以进一步提高测量准确度。本研究为共线外差干涉系统小型化、光纤化和快速测量相位变化以及研发半导体激光器为光源的高灵敏度相位调制SPR传感器提供了思路。

参考文献

- [1] HOU Wen-mei, WANG Jun. Subdivision and elimination of nonlinearity in heterodyne interferometers [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007, **28**(3): 210-215.
侯文玫,王俊. 外差激光干涉仪非线性误差的细分和消除[J]. 计量学报, 2007, **28**(3): 210-215.
- [2] PARK Y, CHO K. Heterodyne interferometer scheme using a double pass in an acousto-optic modulator[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(3): 331-333.
- [3] GONG Yu-liang, ZHANG Yong-zhi, LIANG Hai-yun.

Detection research of solid surface laser ultrasonic pulse using laser heterodyne method[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 1998, **20**(5): 502-506.

龚育良,张永智,梁海岩. 探测激光超声用的激光外差干涉仪[J]. 北京科技大学学报, 1998, **20**(5): 502-506.

- [4] LEIRSET E, ENGAN H, AKSNES A. Heterodyne interferometer for absolute amplitude vibration measurements with femtometer sensitivity[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(17): 19900-19921.
- [5] GAO Long, WANG Chun-hui, LI Yan-chao, et al. Fiber-coupled near-infrared laser heterodyne interferometer with fast optical scanning[J]. *Optical Society of America*, 2010, **27**(12): 2499-2504.
- [6] LUO Yun, FENG Guo-ying, LIU Jian, et al. Vehicle identification technology of laser heterodyne spectral analysis of vibration characteristics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(11): 1108001.
罗韵,冯国英,刘建,等. 激光外差振动谱提取分析的车辆表示技[J]. 中国激光, 2014, **41**(11): 1108001.
- [7] WU Chien-ming, JIAN Zhi-cheng, JOE Shen-fen, et al. High-sensitivity sensor based on surface plasmon resonance and heterodyne interferometry[J]. *Sensors and Actuators B*, 2003, **92**: 133-136.
- [8] YU Xing-long, ZHAO Le-qun, JIANG Hong, et al. Immunosensor based on optical heterodyne phase detection[J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, **76**: 199-202.
- [9] WANG Shinn-fwu, CHIU Ming-hung, LAI Chih-wen, et al. High-sensitivity small-angle sensor based on surface plasmon resonance technology and heterodyne interferometry [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(26): 6702-6707.
- [10] WANG Bin, JING Zhen-guo, PENG Wei, et al. Phase difference signal processing technology in surface plasmon resonance sensing system [j]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(6): 0608009.
王斌,荆振国,彭伟,等. 相位表面等离子体共振传感系统中的相差信号处理技术[J]. 中国激光, 2015, **42**(6): 0608009.
- [11] LI Zhi-quan, MENG Xiao-yun, PIAO Rui-qi, et al. Humidity detection based on surface plasmon resonance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(6): 0264001.
李志全,孟晓云,朴瑞琦,等. 用表面等离子体共振原理检测湿度环境[J]. 光子学报, 2015, **44**(6): 0264001.
- [12] CHEN Hong-fang, ZHONG Zhi, DING Xue-mei. The method to measure the nonlinearity in laser heterodyne interferometer [J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2010, **36**(6): 754-758.
陈洪芳,钟志,丁雪梅. 激光外差干涉非线性误差的测量方法[J]. 北京工业大学学报, 2010, **36**(6): 754-758.
- [13] WU Chien-ming, LAWALL J, DESLATTES R. Heterodyne interferometer with subatomic periodic nonlinearity [J]. *Optical Society of America*, 1999, **38**(19): 4089-4094.
- [14] HU Hai-jiang, ZHANG Cui-juan. Theoretical analysis for relations between nonlinearity errors and PBS in heterodyne interferometer [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **241**: 474-477.
- [15] MASSIE N A, NELSON R D, HOLLY S. High-performance real-time heterodyne interferometry [J]. *Applied Optics*, 1979, **18**(11): 1797-1803.
- [16] GAO Sai, YIN Chun-yong. High measurement speed dual frequency laser interferometer[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(3): 238-240.
高赛,殷纯永. 高测速双频激光干涉仪[J]. 光学技术, 2001, **27**(3): 238-240.

- [17] WANG Li, TAN Lin-qiu, XING Mei-li, *et al.* System research and simulation of new type dual-channel mach-zehnder frequency discriminator for doppler lidar wind measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 0101002.
汪丽, 谭林秋, 邢美丽, 等. 新型双通道 Mach-Zehnder 干涉仪多普勒测风激光雷达鉴频系统研究及仿真 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 0101002.
- [18] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. Cambridge: United Kingdom at the University Press, 1999:821-824.
- [19] WANG Jun, CHEN Lei, YIN Jia-yi, *et al.* A new method for calibration of the soleil-babinet compensator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(11): 3015-3019.
王军, 陈磊, 尹嘉懿, 等. 一种标定 Soleil-Babinet 补偿器的新方法 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3015-3019.
- [20] PAWTOWSKA M, OZIMEK F, FITA P, *et al.* Collinear interferometer with variable delay for carrier-envelope offset frequency measurement [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, **80**: 083101.
- [21] JACHURA M, KARPINSKI M, RADZEWICZ C, *et al.* High-visibility nonclassical interference of photon pairs generated in a multimode nonlinear waveguide [J]. *Optics Express*, 2014, **22**: 8624.
- [22] ZHAO Yang, ZHOU Ting, LI Da-cheng. Influence of characteristics of an AOM on the measurement accuracy of a heterodyne interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10): 1368-1374.
赵洋, 周挺, 李达成. 外差干涉仪中声光调制器特性对测量准确度的影响 [J]. *光学学报*, 1999, **19**(10): 1368-1374.
- [23] HE Ning, FENG Tai-qin, LIAO Xin. Quadrature demodulation in a laser-interception system based on acousto-optic frequency shifting [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(12): 1206004.
何宁, 冯太琴, 廖欣. 基于声光移频的激光侦测正交解调方法 [J]. *光子学报*, 2015, **44**(12): 1206004.
- [24] LI Hong-wei, GONG Yu-liang. Laser heterodyne interferometer for testing ultrasonic micro-vibration [J]. *Optical Technology*, 1994(5):13-16.
李红卫, 龚育良. 探测超声微振动的激光外差干涉仪 [J]. *光学技术*, 1994(5):13-16.
- [25] JIANG Tao, ZOU Hai-xing. Study on birefringence of quartz [J]. *Optical Instruments*, 1987, **9**(3):6-12.
姜涛, 邹海兴. 石英晶体双折射特性探讨 [J]. *光学仪器*, 1987, **9**(3):6-12.