

文章编号:1005-4642(2021)03-0011-05

基于共线外差干涉的波片相位延迟的测量系统

周 森^a, 张志伟^{a,b}, 杨娅洲^a

(中北大学 a. 信息与通信工程学院; b. 电子测量技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要:通过共线光外差系统对光波所携带相位信息的精密检测,以及对波片光轴在入射面内的不同方位时寻常光(即 o 光)和非常光(即 e 光)的传播特性的理解,搭建了共线光外差测量系统对波片的相位延迟进行测量. 实验结果表明该测量方法的测量精度达到 $\pm 0.5^\circ$, 并通过对光线斜入射时波片相位延迟的检测对该方法进行了验证.

关键词:相位延迟; 波片测量; 外差干涉; 光轴

中图分类号: O436.3; TN247

文献标识码: A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.03.003

波片是光轴方向平行于晶体表面的双折射晶片,作为偏振光学技术和光学系统中的重要元件,它被应用在各种研究领域. 例如,波片可以在椭圆偏法测量或相移干涉测量中对偏振光的偏振态进行调制;用在太阳磁场测量设备的偏振分析器和滤光器中,能够直接影响太阳磁场望远镜偏光系统的测量精度^[1]. 随着科技的进步,对于波片的精度要求越来越严格,所以对波片相位延迟的精密测量方法的研究具有重要意义.

波片相位延迟的测量,常见的测量方法有:电光调制法^[2]、旋光法^[3]、光谱扫描法、补偿法、光强测量法^[4]、激光频率分裂法^[5]、激光回馈法^[6-7]、相位检测法^[8]等. 以上测量方法的原理及技术都比较成熟,但有些方法的设备较为复杂且昂贵,有些方法要求对光强进行精准测量,有些方法对测量角度有着精准要求,故在实验过程中由于种种原因会引起较多的误差或由于实验器件的缺失无法进行测量. 本文设计了基于双声光外差对光斜入射情况下波片相位延迟的测量系统,利用波片光轴在入射面不同方位时 o 光(寻常光)与 e 光(非常光)的传播特性来对波片的相位延迟进行检测,该方法使用的器件都是基础器件,对光强与测量角度没有严格要求,且该方法不仅仅限于 1/4 波片,还可应用于对各种波片的测量.

1 光外差检测技术

光外差检测有别于直接检测的检测技术,是利用光的相干性对光载波所携带的信息进行检测和处理,其检测原理与微波及无线电外差检测原理相似. 光外差检测与光直接检测比较,其测量精度要高 7~8 个数量级. 光外差检测具有很多重要优点,如测量速度快、抗干扰能力强及检测灵敏度可达到量子噪声限,其噪声等效功率可达 10^{-20} W,可以检测单个光子,进行光子计数. 但光外差检测对信号光和本振光的频率稳定性、偏振状态和空间相位有着非常严格的要求.

光外差检测系统利用光波的振幅、频率和相位携带信息,2 束相干光入射到光探测器的光敏面进行混频,形成相干场,其原理如图 1 所示^[9]. 图 1 中, ν_s 为信号光束, ν_L 为参考光束. 这 2 束

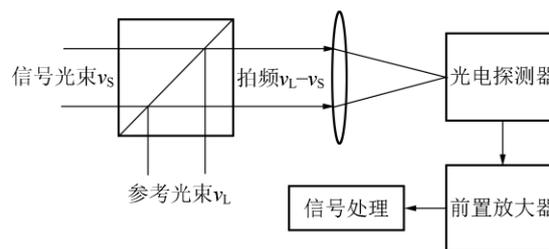


图 1 光外差测量系统原理图

收稿日期:2020-08-12; 修改日期:2020-12-09

基金项目:山西省自然科学基金资助项目(No. 201701D121060)

作者简介:周 森(1996—),男,山西临汾人,中北大学信息与通信工程学院 2018 级硕士研究生,研究方向为信号探测与处理. E-mail:291356449@qq.com

通讯作者:张志伟(1964—),男,山西运城人,中北大学信息与通信工程学院教授,博士,主要研究方向为光电检测理论与技术和信号与图像处理技术. E-mail:zhangzwei@nuc.edu.cn



平面平行的相干光,经过分光镜及聚光透镜入射到光电检测器的光敏面,在光敏面上进行叠加,形成相干光场.

2 实验原理

外差测量系统具有 2 束不同频率的光束,即参考光和信号光.传统的光外差测量系统一般由声光调制器的 0 级光和 1 级光作为参考光与信号光,而双声光外差测量系统的 2 束不同频率的光束是由 2 个驱动频率不同的声光调制器的 1 级光来提供^[10].

如图 2 所示,光源为半导体激光器(型号为 FC-630-030-SM)发出的光束经偏振分光棱镜 PBS₁ 后成为 2 束偏振光,即 p 光与 s 光,其中 p 光为 PBS₁ 的透射光,s 光为 PBS₁ 的反射光. p 光经直角棱镜 RAP₁ 反射后与 s 光分别通过声光调制器 AOM₂ 与 AOM₁,微调 AOM₂ 与 AOM₁ 使得 p 光与 s 光以布拉格角通过,此时为 1 级衍射光最强. AOM₁ 与 AOM₂ 为中国电子科技集团公司第 26 研究所生产的 TSGMN-5 型和 TSGMN-3 型声光调制器,其驱动频率分别为 80 MHz 与 110.12 MHz. 通过光阑 AD₁ 与 AD₂ 将 p 光与 s 光的 0 级衍射光遮挡,使得最强的 1 级衍射光通过. s 光的 1 级衍射光通过直角棱镜 RAP₂ 反射后与 p 光的 1 级衍射光在偏振分光棱镜 PBS₂ 处合光为 1 束正交光,这束正交光到达消偏振分光棱镜 BS 后分成 2 束正交光,一束透射,一束反射. 透射光经 RAP₃ 反射后经过检偏器 AL₁ 后在光电探测器 PD₁ 的光敏面上进行干涉,同样反射光经过 1/4 波片再经 RAP₄ 反射后

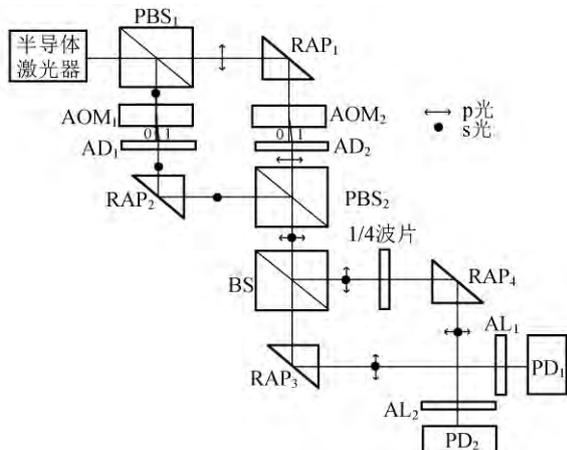


图 2 双声光外差测量系统

经检偏器 AL₂ 后在 PD₂ 的光敏面上进行干涉,两者都可转换为拍频 30 MHz 的电信号,此电信号可以通过示波器来观察,其中将 CH₁ 作为参考信号,CH₂ 为测量信号,如图 3 所示.

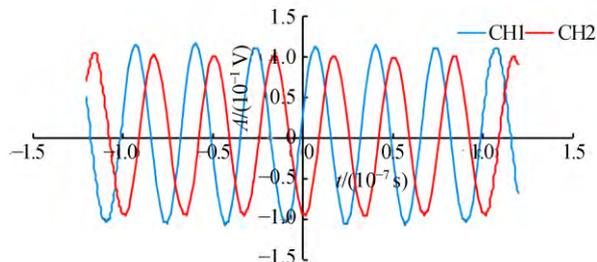


图 3 30 MHz 外差拍频信号

假设入射光经过声光调制器 AOM₁ 与 AOM₂ 后的 1 级衍射光的光强分别为 I_s 和 I_p ,由图 2 可知,经过消偏振分光棱镜 BS 后的透射光束(即参考光束)中 s 光与 p 光的电场可分别表示为^[11]

$$E_{rs} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + I_s \cos(\omega_1 t)} \cos [(\omega_0 + \omega_1)t + \varphi_1 + \varphi_{1r}], \quad (1)$$

$$E_{rp} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + I_p \cos(\omega_2 t)} \cos [(\omega_0 + \omega_2)t + \varphi_2 + \varphi_{2r}], \quad (2)$$

式中, ω_0 为激光束的角频率, ω_1 与 ω_2 为声光调制器 AOM₁ 与 AOM₂ 的 1 级衍射光的移频, φ_1 和 φ_2 为激光束在 AOM₁ 与 AOM₂ 的初相位, φ_{1r} 与 φ_{2r} 为 s 光和 p 光的 1 级衍射光从 AOM₁ 和 AOM₂ 到光电探测器 PD₁ 的相位. 参考光束的 s 光与 p 光经检偏器 AL₁ 后在 PD₁ 的光敏面上进行干涉,并转换为电信号,该电信号为^[12]

$$U_r \propto \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi + \Delta\varphi_r), \quad (3)$$

其中, $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, $\Delta\varphi_r = \varphi_{1r} - \varphi_{2r}$.

同理可得到经过 BS 的反射光束(即测量光束)的 s 光与 p 光的电场^[11]为

$$E_{ms} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + I_s \cos(\omega_1 t)} \cos [(\omega_0 + \omega_1)t + \varphi_1 + \varphi_{1m}], \quad (4)$$

$$E_{mp} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + I_p \cos(\omega_2 t)} \cos [(\omega_0 + \omega_2)t + \varphi_2 + \varphi_{2m}], \quad (5)$$

式中 φ_{1m} 和 φ_{2m} 为 s 光和 p 光的 1 级衍射光从 AOM₁ 和 AOM₂ 到光电探测器 PD₂ 的相位. 测量光束的 s 光与 p 光经检偏器 AL₂ 后在 PD₂ 的

光敏面上进行干涉,并转换为电信号,该电信号为^[12]

$$U_m \propto \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi + \Delta\varphi_m), \quad (6)$$

其中, $\Delta\varphi_m = \varphi_{1m} - \varphi_{2m}$.

为了减小误差,在测量过程中先将波片去除后将此时的状态作为初始状态,并将此时的数据记录并处理得到

$$\delta_0 = \Delta\varphi_r - \Delta\varphi_m. \quad (7)$$

将 δ_0 作为测量的初始相位,后在测量光路放置 1/4 波片,测量数据处理并计算可得到

$$\delta_n = \Delta\varphi_{rn} - \Delta\varphi_{mn}, \quad (8)$$

$$\Delta\delta_n = \delta_n - \delta_0. \quad (9)$$

$\Delta\delta_n$ 即为得到的测量结果.

3 测量方法

如图 2 所示,将波片置于双声光外差测量系统的测量光路中,由于在实验过程中不能保证光线完全以 0° 入射波片,故通过以角度 i 来对波片的相位延迟进行推论. 本设计分别从光轴垂直于入射面和光轴平行于入射面 2 个方面来对波片的相位延迟进行验证.

3.1 光轴垂直于入射面,斜入射情况

如图 4 所示,以正晶体为例,波片厚度为 d , s 光与 p 光的合光以入射角 i 从空气进入波片. 波片光轴垂直入射面,此时 o 光光矢量与 e 光光矢量在入射面内的振动方向分别为平行于入射面和垂直于入射面. 由于 p 光与 s 光分别为平行于入射面和垂直于入射面的偏振光,在此时 p 光在 e 光光矢量上并没有分量,同理 s 光在 o 光光矢量方向上也没有分量,所以由 o 光出射的偏振光为 p 光, e 光出射的偏振光为 s 光. 由惠更斯绘图法可以获得 o 光与 e 光的传播方向. 在这类的特殊情况下, o 光与 e 光的传播方向都遵循普通折射定律.

入射平面波(波面位 AA')从波片表面 A 点入射,在波片中分解为 o 光和 e 光以不同折射角传播,分别至波片的另一面 C 和 D 点出射,出射光仍与入射光平行,这里对出射点 D 在该点 o 光与 e 光的存在光程差^[13]. 故此时由 D 点出射的 s 光与 p 光存在相位差,为

$$\delta_{\perp} = \frac{360}{\lambda} (\sqrt{n_e^2 - \sin^2 i} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 i})d, \quad (10)$$

此时的 δ_{\perp} 即为式(9)中的 $\Delta\delta_n$.

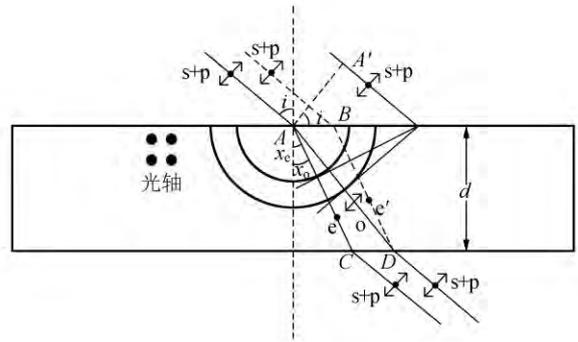


图 4 光轴垂直于入射面 s 光和 p 光在波片内的传播方向

记录不同角度下的相位差即可得到波片斜入射情况下的相位延迟.

3.2 光轴平行于入射面,斜入射情况

如图 5 所示,入射平行光从波片表面 A 点入射,经过一段时间在波片内 o 光与 e 光的波前位置,波片光轴平行入射面,此时 e 光光矢量与 o 光光矢量在入射面内的振动方向分别为平行于入射面和垂直于入射面. 由于 p 光与 s 光分别为平行于入射面和垂直于入射面的偏振光,在此时 p 光在 o 光光矢量上并没有分量,同理 s 光在 e 光光矢量方向上也没有分量,所以由 e 光出射的偏振光为 p 光, o 光出射的偏振光为 s 光. 同上可知出射点 D 在该点时 o 光与 e 光存在光程差,由惠更斯绘图法与椭圆的解析几何理论可确定 e 光在晶体中的传播方向和波法线方向,求得 e 光在晶体中传播的折射率,并得到 D 点出射的 s 光与 p 光的相位差为

$$\delta_{//} = \frac{360}{\lambda} \left(n_e n_o - n_o^2 - \frac{n_e - n_o}{n_o} \sin^2 i \right) \frac{d}{\sqrt{n_o^2 - \sin^2 i}}, \quad (11)$$

此时的 $\delta_{//}$ 即为式(9)中的 $\Delta\delta_n$.

记录不同角度下的相位差即可得到波片斜入射情况下的相位延迟.

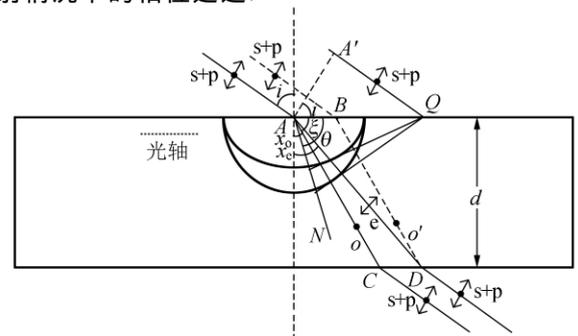


图 5 光轴平行于入射面 s 光和 p 光在波片内的传播方向

4 测量结果与误差分析

使用的半导体激光器产生激光的波长为 635 nm; 波片为石英晶体多级波片, 厚度为 0.8 mm 的 1/4 波片. 石英晶体为单轴正晶体, $v_o > v_e$, 主折射率为 $n_o = 1.5443$, $n_e = 1.5534$.

分别对波片在光轴垂直于入射面和光轴平行于入射面的情况下进行入射角为 0° 的多次检测, 通过示波器采集数据, 最后通过 Matlab 软件处理数据. 测量误差如图 6 所示.

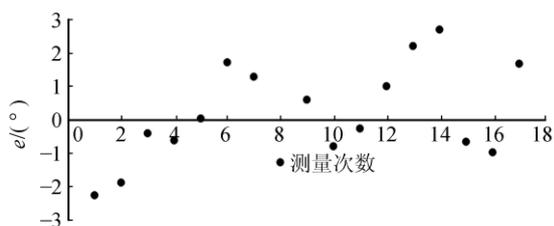


图 6 测量误差

由图 6 可知, 波片相位延迟的测量结果的误差范围在 $\pm 2.67^\circ$.

将波片置于旋转平台上, 测量波片不同角度的相位延迟. 通过对入射角在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内进行多次测量, 对该方法做进一步的验证, 通过示波器采集数据, 并对数据进行处理得到实际值. 通过理论计算, 可得到实验所用波片在 2 种情况下的 $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内相位延迟的理论数据, 如图 7~8 所示. 旋转平台为 ST201MR82B 型号的精密手动旋转平台, 台面可以 360° 旋转粗调, 可以进行 $\pm 10^\circ$ 的微细调整, 测微头驱动, 弹簧复位, 分辨率高, 无空回, 精密轴系设计, 轴系间隙可调, 稳定性好, 圆周 360° 刻划, 方便读数.

由图 7~8 可知, 实验数据与理论值基本一致, 其中光线斜入射情况下当光轴垂直于入射面时波片的相位延迟为随着入射角度的增大而增大, 光轴平行于入射面时波片的相位延迟随入射角度的增大而减小, 该结果证明了本设计可以对波片的相位延迟进行处理.

由于实验装置并不能达到理想状态, 使 s 光与 p 光的合光不能做到完美共线, 导致参考光路与测量光路的对称性不能达到理想状态, 这些都影响测量结果. 尤其是波片的放置问题, 由于在本实验中光线并不能保证完全的打在波片的中

心, 且波片的光轴也不能确保与 p 光、s 光的振动方向完全一致, 尤其是波片的放置不能保证入射角一定为 0° , 由图 7~8 也可知入射角的变化也会对波片相位延迟的测量产生影响, 如当入射角为 1° 时波片的相位延迟可增加 0.5° , 而实验时其入射角的偏转由于实验环境的影响有 $1^\circ \sim 3^\circ$ 的误差, 导致相位延迟的最大误差在 $\pm 2.37^\circ$, 故该实验的测量精度可达到 $\pm 0.5^\circ$.

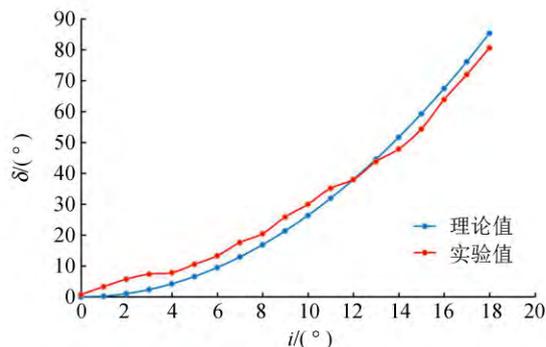


图 7 光轴垂直于入射面理论值与实验值

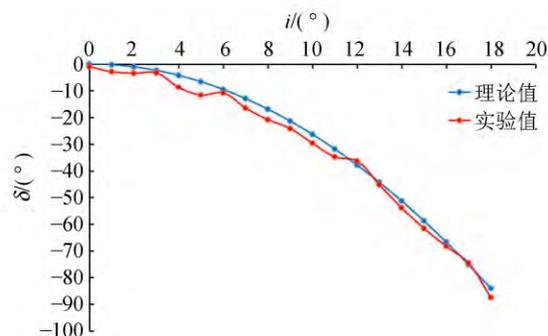


图 8 光轴平行于入射面理论值与实验值

5 结 论

基于共线光外差测量系统测量了波片相位延迟, 该方法的测量精度可达到 $\pm 0.5^\circ$. 该方法对波片的测量具有实时性, 且由于其可以分别通过对光轴垂直于入射面和光轴平行于入射面的 2 种检测来对检测结果进行验证. 在实验过程中发现当光垂直入射波片时, 对波片进行 360° 的转动, 参考信号与测量信号之间的相位差也会随之改变, 且只有当光轴在入射面的垂直位置以及平行位置时, 相位差的绝对值才会最大, 故可通过该测量方法寻找波片的光轴方向.

参考文献:

- [1] Dun Guang-tao, Qu Zhong-quan. Design of the polarimeter for the fibre arrayed solar optical telescope [J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2013, 37(1):108-118.
- [2] 李国华,宋连科,李艺,等. 波片相位延迟的精确测量[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版),1991,17(1):69-71.
- [3] 王兰,宋连科,王葱敏. 旋光法测量波片相位延迟量[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版),2007,33(4):65-67.
- [4] 张志勇,邓元勇,王东光,等. 几种波片相位延迟测量方法的比较[J]. 光学精密工程,2007,15(11):1678-1685.
- [5] 宗晓斌,朱钧,李岩,等. 基于激光频率分裂的波片相位差测量方法[J]. 激光技术,2003,27(4):293-295,306.
- [6] 刘名,张书练,刘维新. 激光回馈波片相位延迟测量的误差源及消除方法[J]. 应用光学,2008,29(6):961-966.
- [7] 李浩昊,张书练,谈宜东,等. 基于激光回馈的波片在盘相位延迟测量系统[J]. 应用光学,2011,32(5):1003-1008.
- [8] 程笑天,李银柱,刘诚,等. 波片相位延迟的测量方法[J]. 中国激光,2003,30(7):651-654.
- [9] 张志伟,曾光宇,张存林. 光电检测技术[M]. 3版. 北京:北京交通大学出版社,清华大学出版社,2004:237-253.
- [10] 张文静,孙运强. 共线外差干涉系统相位特性[J]. 光子学报,2016,45(4):105-110.
- [11] 赵洋,周挺,李达成. 外差干涉仪中声光调制器特性对测量精度的影响[J]. 光学学报,1999,19(10):1368-1374.
- [12] Zhang W J, Zhang Z W. Heterodyne interferometry method for calibration of a soleil-babinet compensator [J]. Applied Optics, 2016,55(15):4227-4231.
- [13] 戴建明,吕淑玲. 波片斜入射时延迟量的计算及实验验证[J]. 淮北煤师院学报(自然科学版),1997,18(3):29-33.

Measurement system of the wave plate phase delay based on collinear heterodyne interference

ZHOU Sen^a, ZHANG Zhi-wei^{a,b}, YANG Ya-zhou^a

(a. School of Information and Communication Engineering; b. Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Through the precise detection of the phase information by the collinear optical heterodyne system, and the understanding of the propagation characteristics of ordinary light and extraordinary light when the optical axis of the wave plate was in different directions in the incident plane, a collinear optical heterodyne measurement system was built to measure the phase delay of wave plate. The experimental results showed that the accuracy of this method was $\pm 0.5^\circ$. This method was verified by measuring the phase delay of wave plate when the light was in different incident angle.

Key words: phase retardation; wave plate measurement; heterodyne interference; optic axis

[责任编辑:郭 伟]