

文章编号: 0258-7025(2008)02-0249-05

利用迈克耳孙干涉仪测量波片相位延迟量和快轴方向

任洪亮¹ 王久扬¹ 楼立人¹ 郑 虹² 李银妹¹

(中国科学技术大学¹ 物理系, ² 天体与应用物理系实验中心, 安徽 合肥 230026)

摘要 分析了基于偏振光分量强度测量来确定波片参数的方法,指出这类方法在任意波片的测量上存在的不确定性。分析表明,波片相位延迟量与光强测量值之间存在多值函数关系,因而无法仅由线偏振分量光强测量值来确定波片相位延迟量的真正值,包括无法得到波片的级次及快轴方向。提出了把迈克耳孙干涉仪白光干涉的特征性彩虹条纹作为零光程差的定位参考标志,从而可以对光程差进行绝对测量,可以确切测量波片真正的相位延迟量和快轴方向。利用此方法对商用 1/4 波片进行了测量,实验结果表明所提出的迈克耳孙干涉仪零光程差法是行之有效的。最后还初步分析了色散对测量的影响,讨论了本方法适用的波片范围。

关键词 测量;迈克耳孙干涉仪;波片;相位延迟;快轴

中图分类号 TN 247; TH 744.3 **文献标识码** A

Measuring Phase Retardation and Fast Axis Azimuth of a Wave Plate Using Michelson Interferometer

Ren Hongliang¹ Wang Jiuyang¹ Lou Liren¹ Zheng Hong² Li Yinmei¹

(¹ Department of Physics, ² Experiment Center, Department of Astronomy and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract Based on measuring the intensity of components of polarized light, the methods for determining the parameters of a wave plate are discussed and uncertainty of measuring arbitrary wave plate is indicated by the methods. It is concluded that the real phase retardation and fast axis of a wave plate cannot be determined by this kind of methods, because the phase retardation of a wave plate is a multiple valued function of measured light intensity. A method for measuring phase retardation and fast axis of a wave plate using Michelson interferometer is brought forward, in which the rainbow fringe of the Michelson interferometer could be used as an indicator for the zero optical path difference. The method was demonstrated by measuring a commercial quarter-wave plate. The influence of the dispersion of the wave plate material on the measurement is analyzed, and the applicable scope of the method is discussed.

Key words measurement; Michelson interferometer; wave plate; phase retardation; fast axis

1 引 言

光的偏振状态是光的基本属性之一,它在很多光与物质相互作用的过程中起着关键作用,诸如在量子信息科学和量子通信技术上,在光与物质之间角动量的传递以及由此而来的光致旋转现象等研究

方面^[1]。正因为如此,光束偏振态的测定与转换是这类相关的研究和应用中一项不可缺少的基本技术,它在很多光学设备中也起着重要作用^[2~5]。波片是实现光的偏振态测量和转换的重要元件,因为其结构简单,在各种光学设备和系统中得到广泛应

收稿日期:2007-03-19; 收到修改稿日期:2007-09-17

基金项目:国家自然科学基金(10474094)和中国科学院知识创新工程(KJ CX2)资助项目。

作者简介:任洪亮(1980—),男,浙江人,博士研究生,主要从事光学测量技术和光镊在分散体系研究中的应用研究。

E-mail:liyimei@ustc.edu.cn

导师简介:李银妹(1953—),女,上海人,教授,博士生导师,主要从事微米、亚微米、纳米粒子的光学微操作与微加工装置、技术及其生命科学等应用方面的研究。E-mail:liyimei@ustc.edu.cn

用。波片对光束偏振态的测量和转换是基于光学各向异性材料对不同线偏振光分量产生不同的相位延迟来实现的,因而精确测量波片的相位延迟量和确定其快轴方向是十分必要的,一直受到人们的关注。虽然已有一些方法利用电光、磁光等效效应引入可控的相位延迟量来精确测定波片参数,但这类方法需要的设备过于复杂,人们仍在致力于寻找新的更简单实用的方法。近年来,人们提出了多种测量波片相位延迟量和确定快轴方向的方法,例如旋转波片法^[6]、相位比较法^[7]、高频相位调制法^[8]及其他方法^[9~11]。这些方法在某些情况下较好地解决了波片测量的问题,但对任意波片则由于无法测定波片级次等信息,这些方法又都存在不确定性。本文对这些方法存在的不确定性问题进行分析,提出迈克耳孙干涉仪法来消除这种不确定性,作为文献^[6~11]所述方法的补充和完善。利用该方法对波片进行了测量,可靠地确定了波片的相位延迟量的级次和快轴方向。

2 波片参数测量原理分析

在波片相位延迟量和快轴方向的测量方法中,有一类是基于对波片引起的光束偏振态改变的测量,而偏振态是通过测量待测光束的某一线偏振分量的强度来确定的。文献^[6~11]中提出的一些技术就属于这一类。但是这类基于线偏振分量强度测量的方法,在波片级次未知的一般情况下,存在不确定性,无法准确测定波片的参数,尤其是无法确定波片的快轴方向。

图 1 给出了这类方法的实验原理图。如图所示,激光束沿 z 轴传播,正交配置的起偏器和检偏器垂直光束放置,起偏器的主轴(透光轴)方向为竖直方向(x 方向),检偏器的透光轴方向为水平方向(y 方向)。待测波片置于起偏器和检偏器之间,也与光束垂直。光电探测器检测从检偏器出射的光强。在这一配置下,入射到波片上的光束为 x 方向的线偏振光。

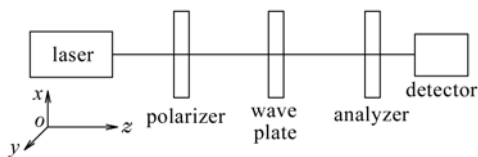


图 1 测量波片主轴方向的光路图

Fig. 1 Schematic diagram for measuring principal axis of a wave plate

设 θ 为波片某一主轴(设为主轴 1)和 x 轴的夹角, δ 为波片引起的沿主轴 1 方向偏振光的相位变化与沿主轴 2 偏振光的相位变化之差,简称为波片的相位延迟。 δ 的符号取决于哪一个主轴是快轴,若主轴 1 为快轴,则 $\delta > 0$ 。假定入射到波片上的电场矢量为 \mathbf{E}_0 ,则光强为 $I_{in} = E_0^2$,通过简单的计算^[6] 可得检偏器处的出射光强为

$$I_{out} = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2} E_0^2, \quad (1)$$

可见,如果 $\delta \neq 2k\pi (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$,波片绕光轴旋转,即改变 θ ,出射光强随 θ 周期性变化,只有在 $\theta = 0, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots$ 时光强才为零,此时待测波片的两个主轴方向分别和起偏器、检偏器的透振方向平行。这一条件常用来确定波片的主轴方向,但不能确定哪一个是快轴(或慢轴)。实验常用的情形,即 $\sin^2 2\theta = 1$ 时,光电探测器探测到的光强最大,为 $I_{out} = \sin^2 \frac{\delta}{2} E_0^2$,它与入射到波片上的光强之比为

$$R_M = I_{out}/I_{in} = \sin^2 \frac{\delta}{2} = (1 - \cos\delta)/2, \quad (2)$$

因而相位延迟为

$$\delta = 2k\pi \pm \delta_0 = 2k\pi \pm \arccos(1 - 2I_{out}/I_{in}), \quad (3)$$

式中 $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \delta_0 = \arccos(1 - 2I_{out}/I_{in})$,为波片相位延迟量的主值。如(3)式所示,波片的相位延迟 δ 是光强比的多值函数,因此对任意波片(级次和快轴方向都未知)则无法由此确定其真实延迟量(简称真值 δ),包括无法确定延迟量的级次和波片快轴方向。

为解决这一问题,本文提出了一种利用迈克耳孙干涉仪白光干涉测量波片相位延迟量和快轴方向的方法。迈克耳孙干涉仪是通过干涉条纹来测量被测对象对光程的影响。干涉条纹为相位的比较和测量提供了明确的标识,因而能确切地测量波片的真正相位延迟量,并可由此确定波片快轴方向。测量光路如图 2 所示。起偏器为竖直放置,并且其透光轴方向在竖直方向,分束器的 A 面镀膜, M'_1 为平面反射镜 1 由分束器所成在平面反射镜 2 附近的虚像,干涉仪的出射光由 CCD 采集。

对已被恰当地调整好的干涉仪, M'_1 和平面反射镜 2 间有微小楔角,它们间的交线在竖直方向。众所周知,当 M'_1 和平面反射镜 2 之间距离足够小时,可以看到定位在该空气楔层上的彩色等厚直条纹。在 M'_1 和平面反射镜 2 的交线上,对各种波长的光,

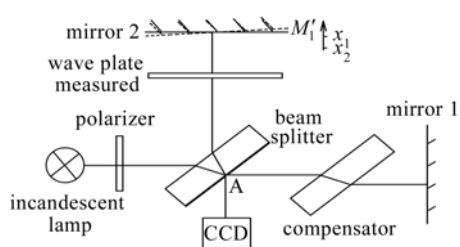


图 2 波片相位延迟测量光路

Fig. 2 Optical setup for measuring retardation of a wave plate

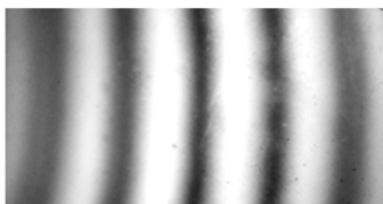


图 3 迈克耳孙干涉仪的白光干涉条纹

Fig. 3 White light interference fringe of Michelson interferometer

两臂光束的光程差为零,也就是说,两臂光束的相位差等于分束面 A 引入的反射相位损失 φ ,即 $\delta = \varphi$ 。 φ 的大小与 A 面的镀膜有关。由于 φ 通常很接近 π ,与交线相应的条纹基本是暗条纹(图 3 中央的暗条纹)。由于使用了白光源,干涉图样仅在接近上述零光程差的条件下才明晰可见。这种特征性的干涉图样,可作为判别零光程差的依据,这为实际光程差的测量提供了基础。这样的方法可以测量波片沿其两主轴方向偏振光的光程差,称为“零光程差法”。

实际测量时,先在波片未插入时将干涉仪两臂的光程差调到一致,即达到所谓的零光程差,这时 CCD 采集到的图像(如图 3 所示)为特征性的白光干涉条纹。然后将待测波片竖直放入干涉仪的平面反射镜 2 所在的一臂。假定波片的两个主轴方向已知(这可以方便地由图 1 所示方法确定),但哪一个是快轴并不知道,任意标记该两个主轴为 1 和 2,分别对应主折射率 n_1 和 n_2 。使主轴 1 方向和起偏器的透振方向平行。由于波片的折射率 n_1 大于空气的折射率,干涉仪中平面反射镜 2 所在一臂中光程增加,条纹将移动甚至消失。通过调节微动手轮使平面反射镜 2 所在一臂的光程减小,直到彩色直条纹在原地方再现。记录此时平面反射镜 2 的位置(主轴 1 对应的零光程差位置) x_1 。在这里,彩色直条纹起定位用参考标志的功能。

把待测波片绕系统光轴旋转 $\pi/2$ 角度,使主轴 2 的方向和起偏器的透振(竖直)方向平行。这时,

如果继续减小平面反射镜 2 所在一臂的光程,能使彩色直条纹在原地方再现,则主轴 2 为慢轴方向,此时平面反射镜 2 的位置即为该主轴 2 对应的零光程差位置 x_2 。但如果在这一过程中,即在减小平面反射镜 2 所在光程的过程中一直没有重现条纹,则说明波片主轴 2 是快轴。为避免来回移动时机械程差的影响,在后一种情形下,可以把平面反射镜 2 移动到一个较远的位置,从而保证在平面反射镜 2 单向移动(平面反射镜 2 所在光路光程单调减小)条件下进行测量,这样就会先测出 x_2 ,后测 x_1 。可见,依据平面反射镜 2 单向移动时 x_1 和 x_2 位置的前后关系就可明确地指出波片的快轴和慢轴。

上面的测量不仅确定了快轴的方向,而且测出了厚度为 d 的波片对沿其两主轴方向偏振光引入的光程差

$$\Delta \equiv (n_2 - n_1)d = x_1 - x_2, \quad (4)$$

考虑到常用波片都是工作在正常色散区,双折射率 $(n_2 - n_1)$ 的色散很小,对给定波片(工作波长 λ),其相位延迟量可近似表示为

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}, \quad (5)$$

这样就测得了波片真正的相位延迟量,而不仅仅是主值。

3 结果与讨论

用零光程差法对商品波片(波长 780 nm 的云母零级 1/4 波片)进行了测量,结果如表 1 所示,表中给出的是平面反射镜 2 的相对位置。测量结果表明,平均光程差为 205 nm,对 780 nm 波长而言,它相应的相位延迟为 94.6° ,其误差为 4.9%。可见在实验误差范围内,实际测量相位延迟值和厂家给出的标称值一致,并且测量得到主轴 1 为波片快轴,和厂家给出的一致。

表 1 云母 1/4 波片的测量值

Table 1 Measured values of mica quarter-wave plate

x_1 /mm	x_2 /mm	$\Delta = x_1 - x_2$ /nm
32.69650	32.69629	210
32.69693	32.69673	200
32.69640	32.69619	210
32.69555	32.69535	200
32.69528	32.69507	210
32.69585	32.69565	200

实验结果表明,本文提出的零光程差法可以测出波片真正的相位延迟量,同时确切地判断波片的快轴方向。该方法的优点是利用白光的相干长度很

短,只有干涉级次很低的条纹才清晰可见。实验可以方便地识别这种特征性的对称干涉图像,以它为零光程差的定位标志,可以对光程差进行绝对测量,不仅能可靠地确定波片的快轴方向,也使得实际相位差(真值)的测量成为可能,而单纯的光强测量无法判断快慢轴和得出相位差的真值。

用迈克耳孙干涉仪测量程差的主要误差来源有两个,一是由仪器分辨精度有限引起的,本文使用的迈克耳孙干涉仪(型号 WSM-100)反射镜位置读数的最小分度值为100 nm。可以用最小分度值二分之一(50 nm)来估计实验的测量精度;另一个是零级白光干涉条纹的重复定位的准确度。目前的技术条件可以准确判断出条纹百分之一的位移,引入的误差不到10 nm,其精度高于机械微动读数的误差。这样的精度对本文关注的如何可靠确定快轴方向及相位延迟量的级次是够用的。为了提高相位差测量的精度,可以把平面反射镜2安置在压电扫描平台上,则位置控制精度很容易达到纳米量级,相应地就会提高光程差测量精度。但是为此而构建高精度的装置不一定有必要,因为在相位差主值的测量上已有较简单成熟的方法^[6~11]。而为了解决这些方法在确定波片级次和快轴方位时的不足,本文提出的方法是切实可行的。本文提出的方法与上述方法结合可以较好地解决波片参数的测量问题。

本文利用白光干涉的零光程差法测量的是群光程差^[12]。它和波片指定波长对应的光程差(以下简称主光程差)有着概念上的差别,但色散很小时,群折射率和主折射率在量值上没有太大的差别^[13,14],相应地,群光程差和主光程差在量值上没有太大的差别。利用群折射率与相折射率的关系^[12]可以估计不同波片材料在给定光谱宽度和中心波长时,群折射率与相折射率的相对差异。例如对石英而言,在可见光范围,它小于4%。因此用迈克耳孙干涉仪白光干涉的零光程差法测量波片参数(光程差的真值、级次和快轴方位)仍然具有实际应用价值。从实际使用的角度看,色散导致不同波长光的干涉条纹相交叠,以致特征性的彩虹条纹可能不再清晰可见,这在高级次波片的测量时更突出,限制了本方法的应用范围。作为补救办法,当色散效应明显时,可以用滤光片对光源的光谱范围进行限制。

本文把迈克耳孙干涉仪白光干涉的特征性彩虹条纹作为零光程差的定位参考标尺。当材料有色散时,不同波长的条纹相互重叠,可能会导致条纹不再清晰可辨,特别是对较高级次(较厚)的波片。可以

用光谱半宽度对应的两波长(λ_1 和 λ_2)来估计本方法适用的波片最大厚度 d_m , $d_m < \lambda_1/2[n(\lambda_1) - n(\lambda_2)]$ 。波片的厚度和双折射率的大小又决定了波片的级次。一般而言,本方法适用于低级次波片的测量,具体依赖于波片材料的色散性质,例如,若用方解石、云母、石英作波片,能适用的最高级次依次递减。讨论也表明了,光源谱宽(严格说光谱分布)会影响测量,减小光源谱宽可以在一定程度上减小材料色散带来的影响。

4 结 论

分析了现有的一些基于偏振分量强度来测量波片相位延迟量和快轴方向的方法,指出了光强与波片相位延迟量之间存在多值函数关系,因而无法仅由光强测量值确定波片相位延迟量的真值,也不能识别波片的快慢轴。指出了把迈克耳孙干涉仪白光干涉的特征性彩虹条纹作为零光程差的定位参考标尺,用零光程差法可以对光程差进行绝对测量,确切测量波片真正的相位延迟量和快轴方向,并在实验上论证了该方法的可行性,也对该方法的误差和适用范围作了讨论。

致谢 感谢中国科学技术大学姚焜老师在工作中提供了很多有益的帮助。

参 考 文 献

- 1 Sun Yufen, Li Yinmei, Lou Liren. Optical rotation of crystal CaCO_3 micro-particle in optical tweezers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):315~318
孙玉芬,李银妹,楼立人. 光阱中的 CaCO_3 晶体微粒的光致旋转[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):315~318
- 2 Tian Zhaoshuo, Wang Qi, Wang Yusan et al.. Measurement of internal parameters of electrooptically Q-switched RF excited waveguide CO_2 laser using rotatable phase plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9):785~789
田兆硕,王 骐,王雨三等. 旋转波片法测量电光调 Q 射频波导 CO_2 激光器的内部参数[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9):785~789
- 3 Hu Jianming, Zeng Aijun, Wang Xiangzhao. Polarization modulation technology for a position sensor with grating imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1397~1401
胡建明,曾爱军,王向朝. 光栅成像位置传感器中的偏振调制技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1397~1401
- 4 Yang Junbo, Su Xianyu. Polarization-independent bidirectional 3×3 optical switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1279~1284
杨俊波,苏显渝. 与偏振无关的双向 3×3 光开关结构设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1279~1284
- 5 Yang Junbo, Su Xianyu. Polarization-dependent and polarization-independent 4×4 free-space optical switch [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):383~388
杨俊波,苏显渝. 与偏振相关和无关的 4×4 自由空间光开关[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):383~388

- 6 Wang Wei, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. A new method of measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12):1121~1123
王 伟,李国华,吴福全 等. 测量波片延迟量和快轴方位的新方法[J]. 中国激光, 2003, **30**(12):1121~1123
- 7 Cheng Xiaotian, Li Yingzhu, Liu Cheng *et al.*. Method for measuring the retardation of a wave plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):651~654
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
- 8 Hu Jianming, Zeng Aijun, Wang Xiangzhao. New method for measuring retardation of quarter-wave plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):659~662
胡建明,曾爱军,王向朝. 精确测量 1/4 波片相位延迟量的新方法[J]. 中国激光, 2006, **33**(5):659~662
- 9 Wang Guixia, Xu Changjie, Wang Qingsong. A new method of confirming the fast or slow axis azimuth of wave plate [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(8):699~702
汪桂霞,徐昌杰,王青松. 一种确定波片快轴方位的新方法[J]. 激光与红外, 2006, **36**(8):699~702
- 10 Yu Chunri. Determination of the phase delay angle of a wave-plate with a quarter wave-plate [J]. *Laser Technology*, 2003, **24**(4):383~384
余春日. 利用 $\lambda/4$ 波片测定任意波片的相位延迟角[J]. 激光技术, 2003, **24**(4):383~384
- 11 Yan Ming, Gao Zhishan. Phase shifting method for measuring the phase retardation of wave plates [J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2005, **16**(2):183~187
严 明,高志山. 移相法测量波片的相位延迟量[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(2):183~187
- 12 Li Hui, Xie Shusen, Lu Zukang. Dispersion, group velocity and group refractive index [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(12):1075~1079
李 晖,谢树森,陆祖康. 色散、群速与群折射率[J]. 光子学报, 1999, **28**(12):1075~1079
- 13 Gorachand Ghosh. Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **163**(2):95~102
- 14 Song Lianke, Lin Changchun, Li Hua *et al.*. Impact of discrepant dispersion relations of birefringent indexes on mica waveplate designing [J]. *Journal of Qufu Normal University*, 2001, **27**(2):44~46
宋连科,林长春,李 华 等. 云母双折射率色散关系不一致性对波片设计的影响[J]. 曲阜师范大学学报, 2001, **27**(2):44~46