

文章编号: 0253-2239(2007)06-1044-5

石英波片偏光干涉谱的研究*

冯伟伟¹ 林礼煌¹ 陈立刚²

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)
(² 中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感实验室, 合肥 230031)

摘要: 根据石英晶体双折射率的色散特性,对石英波片的偏光干涉谱进行了理论分析和数值模拟,提出了一种石英波片延迟量和厚度的偏光干涉标定法。即由偏光干涉谱,可以得出石英波片在 200~2000 nm 宽光谱范围内的延迟量;通过对长波段的偏光干涉谱极值波长的精确判断,可以准确地计算出该石英波片的厚度。利用 Lambda 900 紫外-可见-近红外分光光度计对一片石英波片的偏光干涉谱进行了测量。在波长精度为 0.1 nm 的情况下,测量的厚度精度为 0.1 μm 。误差分析结果表明,通过提高光谱的最小分辨力及选择较长的光谱波段进行测量计算,可以有效地降低误差。

关键词: 光学器件; 偏光干涉量度学; 石英波片; 双折射率色散; 延迟量; 厚度测量

中图分类号: O436 文献标识码: A

Polarized-Light Interference Spectrum of Quartz Wave Plate

Feng Weiwei¹ Lin Lihuang¹ Chen Ligang²

¹ State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800
² Remote Sensing Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

Abstract: According to the birefringence dispersion character of a quartz crystal, the theoretical analysis and numerical simulation about the polarization interference spectrum are given, and then a systematic way of measuring the phase retardation and thickness of the quartz wave plate, which is based on the principle of polarization interferometry, is put forward. With the polarization interference spectrum, the phase retardation of quartz wave plates can be determined at a wide spectral range from 200~2000 nm. Through accurate judgment of extreme points of the polarization interference spectrum at long-wave band, the physical thickness of the quartz wave plate can also be achieved exactly. Experimentally, the polarization interference spectrum of a quartz wave plate is measured with Lambda 900 UV/VIS/NIR spectrophotometer. Under the condition of 0.1 nm wavelength resolution, the thickness accuracy is 0.1 μm . The result of error analysis shows that the relative error can be reduced efficiently by use of spectrometers with higher spectral resolution and longer spectral band to measure and calculate.

Key words: optical device; polarization interferometry; quartz wave plate; birefringence dispersion; phase retardation; thickness measurement

1 引言

石英单轴晶体物化性能稳定,机械强度高,透射谱宽,抗损伤阈值高,是制作波片的首选材料。由于其双折射率所具有的色散特性和对温度的敏感性,使得石英波片的延迟量与波长之间有显著的依赖关系和不可忽略的温度效应。但石英波片延迟量的宽

光谱测量一直是个难点。现有的诸如补偿法、电光调制法、光学外差法、 $\lambda/4$ 波片法,以及传统的通过旋转检偏器,分时探测两正交方向上的光强,来测定波片的延迟量等方法^[1~4],都是利用波片对应的特定波长的光,来测量波片对该波长的相位延迟量,并且在实际的测量中对光源及测试系统稳定性有着很

* 国家 973 计划(2006CB806000)资助课题。

作者简介: 冯伟伟(1979—),女,山东潍坊人,博士研究生,主要从事偏光技术以及超强超短激光方面的研究。

E-mail: fww@siom.ac.cn

导师简介: 林礼煌(1942—),男,广东潮州人,研究员,主要从事超短超强激光方面的研究。E-mail: linlihuang@siom.ac.cn

收稿日期: 2006-08-28; 收到修改稿日期: 2006-11-30

高的要求,给实验者带来了诸多不便。此外,在生产过程中,在光轴准确定向的情况下,对波片厚度作无接触的准确测量与监控对石英波片的加工者是一项十分重要的工作,然而对于光学波片厚度在线测量的方法和仪器,文献和专利中很少有报道。

本文通过对石英波片的偏光干涉谱的研究,对波片的延迟量和厚度提出了一种新的测量思路。由偏光干涉谱,可以直观地确定出任意的石英波片在 200~2000 nm 光谱范围内的延迟量和该波片的厚度。实验证明,偏光干涉谱对于表征石英波片具有精确、直观,简单的优点,特别适合于石英波片的加工检测,具有实际意义。

2 偏光干涉谱测量系统及测试原理

测量系统以 Lambda 900 紫外-可见-近红外分光光度计(Perkin-Elmer Inc)为基础,在其样品室建立如图 1 所示的平行偏光干涉光路。为避免测量光强的绝对值以及消除系统光源不稳定性对测量结果的影响,系统采用双光路形式^[5,6]:信号光经反射镜 M 反射进入偏光干涉系统(虚框部分,为一个“三明治”结构,由两只平行放置的高消光比的偏振器 P₁、P₂ 和石英波片 W 组成),偏光干涉的光强信息由探测器 D₁ 接收;参考光路中放置了一只与信号光光路中规格性能相同的偏振器 P₂' ,使得参考光与信号光具有相同的偏振态,消除了因两探测器 D₁、D₂ 对入射光的偏振敏感性不同而引起的系统测量误差。首先在信号光路中不放入石英波片,对两光路的光进行预校准,即进行连续波长扫描时,两光路的光强相等,此时透射率校准为 1。然后把石英波片按图 1 所示放入信号光路中,再进行连续波长扫描,由信号处理器 PC 对探测器 D₁ 和 D₂ 的数值进行归一化处理,从而得到了石英波片的偏光干涉谱。如图 2 所示,当波长扫描精度为 0.1 nm,得到了厚度为 918 μm 的石英波片的偏光干涉谱。

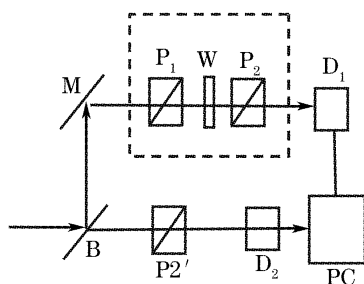


图 1 偏光干涉测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the polarization interference measuring system

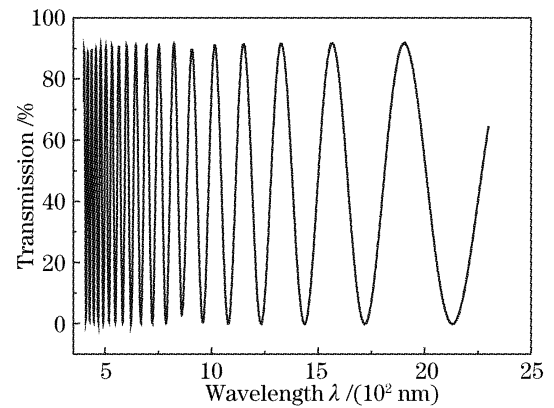


图 2 在 25 °C 下厚度约 918 μm 的石英波片的偏光干涉谱
Fig. 2 Experimental polarization interference spectrum of a 918 μm thick quartz wave plate at 25 °C

3 石英偏光干涉谱理论分析

偏光干涉系统中的石英波片,其光轴平行于通光面,与偏振器的透射方向成 θ 角,波片的通光面与入射光垂直放置。当进行波长扫描时,三明治结构的透射谱呈明显的正余弦振荡形式,这是发生了偏振干涉造成的。光强为 I_0 的初始光经过此三明治结构后的出射光强 I 为^[7]

$$I(\lambda) = I_0 \{ \cos^2[\delta(\lambda)/2] + \sin^2[\delta(\lambda)/2] \cos^2(2\theta) \}, \quad (1)$$

(1) 式中 δ 为寻常光 o 和非寻常光 e 之间的相位差,由石英晶体双折射率 $\Delta n(\lambda)$,波片的厚度 d ,和光波长 λ 决定,即

$$\delta(\lambda) = 2\pi d \Delta n(\lambda) / \lambda, \quad (2)$$

石英晶体的双折射率色散公式^[8]:

$$10^3 \Delta n(\lambda) = 8.86410 + 0.107057\lambda^{-2} + 0.0019893\lambda^{-4} - 0.17175\lambda^2 - 10^{-3} \Gamma(1 + \Gamma/900)(1.01 + 0.2\lambda^2), \quad (3)$$

(λ , μm; Γ , °C)

该色散公式同时考虑了温度效应(Γ 表示温度),与文献[9]给出的折射率图表作对比,作出了石英晶体色散曲线,发现二者在 200~2000 nm 的光谱区间符合地很好,如图 3 所示。根据(1)式~(3)式,对石英波片的偏光干涉谱进行了数值模拟,图 4 给出了波片厚度分别为 200 μm 和 700 μm 时的偏光干涉图,容易看出,厚度值大的偏光干涉谱要更稠密,同一个厚度的偏光干涉谱在短波段更稠密。根据(1)式,得出波片的延迟量,可以表示为

$$\delta(\lambda) = 2 \arcsin \{ [1 - T(\lambda)]^{1/2} / |\sin 2\theta| \}, \quad (4)$$

其中 $T(\lambda)$ 是波片的光轴与偏振器的透射方向成 θ 角度时的透射率。当 θ 分别为 $\pi/4, \pi/6, \pi/8$ 时,任

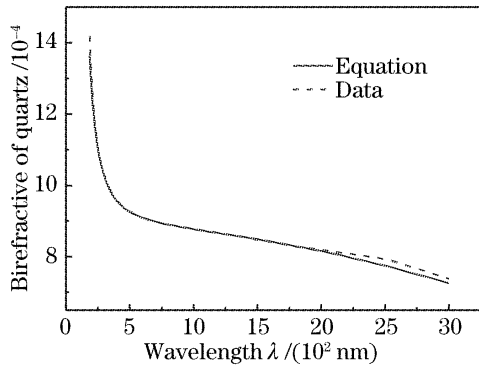


图 3 石英晶体双折射率的色散曲线

Fig. 3 Birefringence dispersion curves for quartz crystal at 25 °C

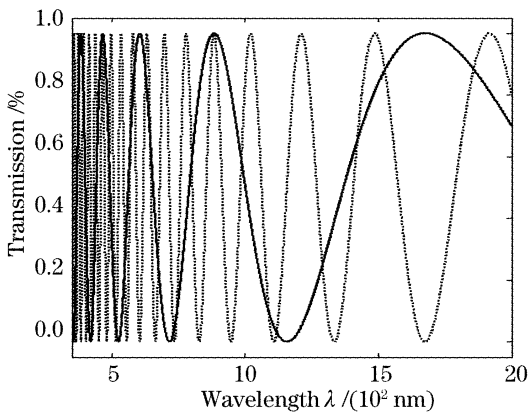


图 4 在 25 °C, $\theta = 45^\circ$ 下理论计算的偏光干涉谱, 实线 $d = 200 \mu\text{m}$, 虚线 $d = 700 \mu\text{m}$

Fig. 4 Theoretical polarization interference spectrum with solid line for $d = 200 \mu\text{m}$ and dashed line for $d = 700 \mu\text{m}$, at 25 °C, $\theta = 45^\circ$

意厚度石英波片的偏振干涉透射率与其延迟量的对应关系如图 5 所示。结合图 4 和图 5, 可以看出: 在某些分立的波长处, 透射率最大为 T_{\max} , 称这些波长为峰波长, 其对应的延迟量为 $2k\pi$ (k 为任意整数); 在另一些分立的波长处, 透射率最小 T_{\min} , 称这些波

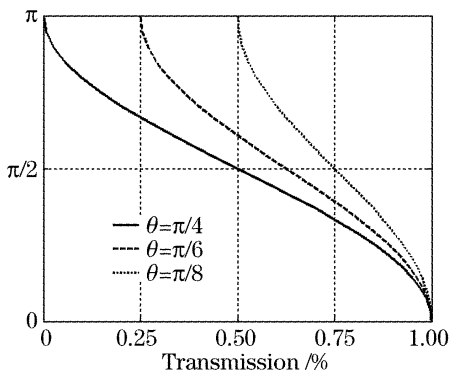


图 5 “三明治”结构的透射率与石英波片的延迟量之间的关系

Fig. 5 Relationship between the transmission of sandwiched group and the phase retardation of quartz wave plate under different α

长为谷波长, 所对应的延迟量为 $(2k + 1)\pi$; 透射率值为 $(T_{\max} - T_{\min})/2$ 所对应的波长, 称为中值波长, 所对应的延迟量为 $(2k + 1)\pi/2$ 。总之, 从测得的石英偏光干涉谱可以判断出待测石英波片在各个波长处的延迟量。图 6 理论上给出了厚度为 $700 \mu\text{m}$ 的石英波片当其光轴与偏振器透射轴成 $\pi/4$ 角度时的偏光干涉谱以及对应的延迟量。

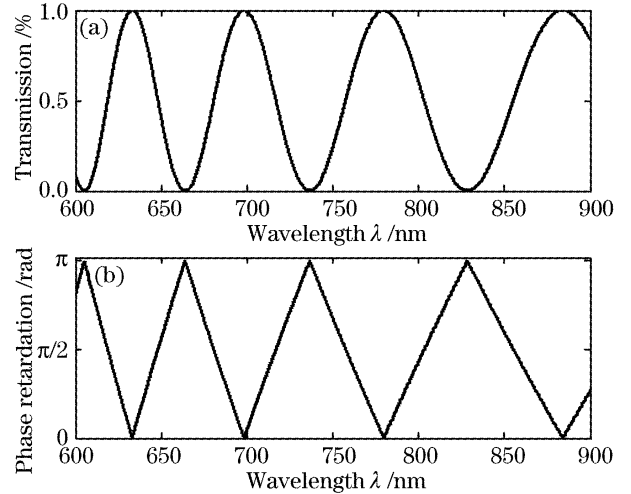


图 6 理论计算得到的 25 °C, $\theta = 45^\circ$ 下厚度为 $700 \mu\text{m}$ 的石英波片, (a) 偏光干涉谱, (b) 600~900 nm 的延迟量

Fig. 6 For a $700 \mu\text{m}$ thick quartz wave plate, (a) theoretical polarization interference spectrum, (b) theoretical phase retardation curve at 600~900 nm, at 25 °C, $\theta = 45^\circ$

偏光干涉谱不仅可以反映石英波片的延迟量信息, 同时体现了该石英波片的厚度。根据(4)式所描述的透射率与延迟量的关系这一特性, 以谷波长所对应的波片的延迟量为 π 为例, 可以得到

$$[2m(\lambda) + 1]\pi = 2\pi d\Delta n(\lambda)/\lambda, \quad (5)$$

$$(m = 0, 1, 2, \dots)$$

其中 $m(\lambda)$ 是厚度为 d 的石英波片对谷波长 λ 的级数。由于 $\Delta n(\lambda)/\lambda$ 是一个减函数, 变量 m 随着谷波长的增加以整数形式递减。即同一个波片分别对于相邻的两个谷波长而言, 波片的级数相差 1。根据此特性和(5)式, 只需确定出偏光干涉谱上的任意两个谷波长, 就可以得出该石英波片的厚度 d :

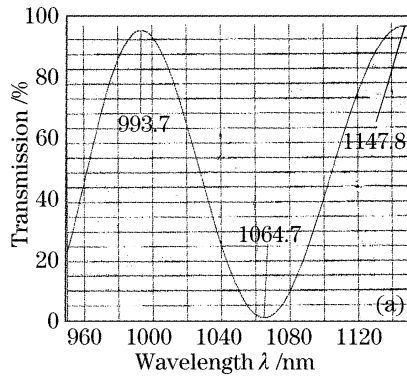
$$d = \frac{i - j}{\Delta n(\lambda_i)/\lambda_i - \Delta n(\lambda_j)/\lambda_j}, \quad (i \neq j) \quad (6)$$

其中 i, j 分别为偏光干涉谱上的第 i 个和第 j 个谷 (以某个谷为基点), λ_i 和 λ_j 是对应的谷波长。(6)式对峰波长同样适用。

4 应用及讨论

在实际的应用中, 使待测石英波片的光轴与偏

振器的透射方向的夹角为 $\pi/4$, 如此得到的偏光干涉谱的振荡幅度最大, 便于峰、谷波长的精确判定。由于石英波片的吸收使得偏光干涉系统的透射率的峰值不能严格为 1, 但这不影响峰、谷波长的判定。对一石英波片进行了偏光干涉谱的测量, 如图 7(a) 所示, 据此图我们判断出该石英波片可以在 1064.7 nm 作为半波片使用, 且通过寻峰操作, 确定出了相邻的



峰波长为 993.7 nm 和 1147.8 nm, 经过数据处理得到该石英波片的厚度 d 为 793.2 μm , 测量精度为 0.1 μm 。此波片是为 1064 nm 的半波片设计的, 设计厚度为 791.8 μm 。由此可以判定该波片与所设计的厚度存在约 1.4 μm 的微小偏差, 使得工作波长偏离了 0.7 nm, 引起延迟量绝对误差为 3.86°。

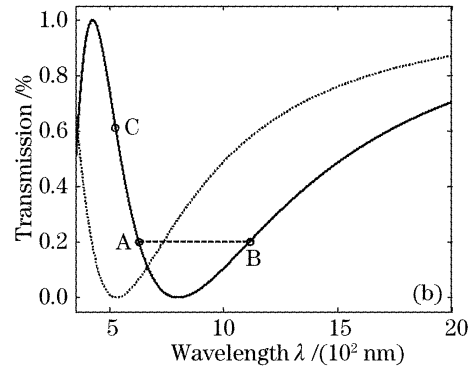


图 7 在 25 °C 下, 测得的石英波片 (a), 两片零级波片 (b) 的偏光干涉谱

Fig. 7 Experimental polarization interference spectrum of a quartz wave plate, at 25 °C (a), two zero-order quartz wave plates (b)

偏光干涉谱直接反映了延迟器件丰富的光学信息, 是标征波片特性 (延迟量、厚度等) 的有力工具, 对石英波片的加工与检测有很大实用价值。偏光干涉谱的准确度直接影响到标征延迟器件光学参量的精确度。由相对误差理论分析, 可以得出该系统的最大的相对测量误差 E_d 为

$$E_d = \frac{\Delta d}{d} = \frac{d}{\Delta m} [-f'(\lambda_i) - f'(\lambda_j)] \Delta \lambda,$$

其中 $f'(\lambda)$ 为函数 $f(\lambda) = \frac{n_e(\lambda) - n_o(\lambda)}{\lambda}$ 对波长 λ 的一阶导数。 $f'(\lambda)$ 为增函数, 因此在同样的实验条件下, 选择较长光谱波段进行测量计算, 相对误差要小一些; 同时相对误差 E_d 正比于光谱的最小分辨力 $\Delta \lambda$, 因此光谱分辨力的提高有利于减少测量的相对误差。目前 Perkin-Elmer 公司出产的分光光度计波长精度最高可以达到 0.08 nm, 可对偏光干涉谱进行精确测量。表 1 给出了对于厚度为 500 μm 的波片, 当选择相邻的峰、谷波长进行厚度测量时, 选择不同的光谱分辨力、不同的光谱段进行测量时的最大相对误差。

其次, 对装置提出了一些要求, 波片的通光面与入射光方向的不严格垂直, 会导致偏光干涉谱的一些偏差, 从而带来误差, 在误差允许的范围内, 要求夹角不能超过 1°; 石英晶体的光轴由 X 射线定向仪来确定, 系统要求样品晶轴误差不大于 3', 平行度误差不大于 5''。

表 1 不同的光谱分辨力、不同的光谱波段下的最大相对误差 ($\Delta m=1, d=500 \mu\text{m}$)

Table 1 Maximal relative error E_d at different spectral band with different spectral resolution with $\Delta m=1, d=500 \mu\text{m}$

$\Delta \lambda / \text{nm}$	0.10	0.01
E_d at 500~620 nm / (10^{-3})	3.06	0.32
E_d at 650~900 nm / (10^{-3})	1.46	0.146
E_d at 1050~1700 nm / (10^{-4})	4.80	0.48

该方法属于光谱测量方法, 适用于分光光度计等类似的装置。当波片为某波长处的零级波片, 即波片的有效厚度 (产生总延迟量 δ 所对应的厚度) 很小, 此时测得的偏光干涉谱极其稀疏, 不能提供相邻的峰或谷波长, 如图 7(b) 所示实线和虚线分别为 800 nm 和 532 nm 的零级半波片。针对这一问题理论上可以分为两种情况得以解决:

1) 当干涉曲线包含一个峰或谷。对于这一情况可以划出一条等透射率曲线, 则该曲线与偏振干涉谱曲线的交点具有相同的透射率。如图 7(b) 中的 A、B 两点处的透射率相等, 其延迟量却相差一个负号, 即 $2m\pi + \delta$ 与 $2m\pi - \delta$, 根据这一特性, 可以确定出波片的厚度。

2) 当干涉曲线不包含一个峰或谷。亦可以由 A、C 两波长处的透射率, 对应获得延迟量 $2m\pi + \delta_1$ 和 $2m\pi + \delta_2$, 由此, 可以确定出波片的厚度。

在实际的操作中, 这两种解决方法对透射率的测量精度会有很高的要求。

5 结 论

本文针对当前在加工石英波片的生产实际中提出的波片厚度测量以及波片延迟量的宽光谱测量问题,提出了一种偏光干涉标定法。综合实验结果可以看出,实验与理论符合好,测量的误差小,精度高,且考虑了温度效应。该方法尤其适用于多级波片。此外,文中所述的偏光干涉谱是在石英波片置于平行偏振器情况下获得的。对于正交偏振器的情况,用相同的方法可以获得类似的结论。

致谢 感谢上海联能光子技术有限公司郑连生、许晓霞提供的 Lambda 900 分光光度计测量数据。

参 考 文 献

- 1 Wang Wei, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. A new method of measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1121~1123 (in Chinese)
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
- 2 Zhao Pei, Wu Fuquan, Hao Dianzhong *et al.*. Measurement of the delay of the quarter-wave plate by phase modulated ellipsometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 379~382 (in Chinese)
赵 培,吴福全,郝殿中等. 1/4 波片延迟量的相位调制椭圆偏测量法[J]. 光学学报, 2006, **26**(3): 379~382
- 3 Yu-Lung Lo, Jing-Fung Lin, Sen-Yung Lee. Polariscope for simultaneous measurement of principle axis and the phase retardation by use of two phase-locked extractions[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(34): 6248~6254
- 4 Xu Wendong, Li Xishan. A new method for measuring the phase delay of wave plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(10): 1096~1101 (in Chinese)
徐文东,李锡善. 波片相位延迟量精密测量新方法[J]. 光学学报, 1994, **14**(10): 1096~1101
- 5 Zhang Dawei, Li Guohua, Song Lianke *et al.*. Study on the polarization interference spectrum of mica quarter wave plate[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, **22**(2): 195~197 (in Chinese)
张大伟,李国华,宋连科等. 云母 1/4 波片偏振干涉谱的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2002, **22**(2): 195~197
- 6 Song Lianke, Hao Dianzhong. Study of the quartz crystal's birefringence dispersion character from ultraviolet band to near infrared band[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 679~683 (in Chinese)
宋连科,郝殿中. 石英晶体折射率紫外至近红外波段色散特性实验的研究[J]. 光学技术, 2005, **31**(5): 679~683
- 7 Ye Yidong, Lü Baida, Cai Bangwei. Temporal and spatial pulse shaping of high-power laser[J]. *Laser Technology*, 1996, **20**(6): 324~328 (in Chinese)
叶一东,吕百达,蔡邦维. 强激光的时间整形和空间整形[J]. 激光技术, 1996, **20**(6): 324~328
- 8 A. E. Ennos, K. W. Opperman. Birefringence of nature quartz [J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(1): 170
- 9 V. G. Dmitriev, G. G. Gurzadyan, D. N. Nikogosyan. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 235