

一种测量双片波片补偿器中光轴偏差角度的方法

崔高增^{1,2} 刘涛^{1,3} 李国光^{1,3} 郭霞² 夏洋¹

¹ 中国科学院微电子研究所微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029
² 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124
³ 北京智朗芯光科技有限公司, 北京 100191

摘要 双片零级波片和消色差波片是双片波片贴合的补偿器, 双片波片中的光轴对准精确度影响波片的偏振调制。提出一种精密检测贴合式双片波片光轴偏差角的方法, 该方法基于旋转补偿器的直通式椭圆偏系统, 可在未知起偏器方位角和检偏器方位角相对关系的情况下, 通过波片的连续旋转测量偏差角度。探讨了偏差角度对椭圆偏振测量的影响, 具体描述了检测方法的原理及数学表达, 并通过对检测过程的模拟验证了方法的有效性。此方法对检测和提高双波片式补偿器制造精度具有参考价值。

关键词 测量; 双片波片补偿器; 光轴; 光谱椭圆偏仪; 偏差角度; 消色差

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.061201

A Method to Measure the Misalignment Angle of the Optical Axes of Biplate Compensators

Cui Gaozeng^{1,2} Liu Tao^{1,3} Li Guoguang^{1,3} Guo Xia² Xia Yang¹

¹ Key Laboratory of Microelectronics Devices and Integrated Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
² Electronic Information and Control Engineering Institute, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China
³ BeiOptics Technology Co., Ltd., Beijing 100191, China

Abstract Zero order waveplates and achromatic waveplates are biplate compensators. The misalignment angle between the axes of the two waveplates affects the phase modulation of the designed compensator. A method for measuring the misalignment angle of the optical axes is reported. The method is based on a straight-through rotating-compensator system. The measurement can be implemented without the knowledge of the relative azimuthal angle between the polarizer and analyzer. The influence of the misalignment angle on the ellipsometric measurement is analyzed. The principle and mathematical expressions are given. The validation of this method is demonstrated by the simulation of measurement process. This method is valuable for inspecting and hence for improving the accuracy of biplate compensator in manufacturing.

Key words measurement; biplate compensator; optical axis; spectroscopic ellipsometer; misalignment angle; achromatism

OCIS codes 120.2130; 120.5410; 260.2130

1 引言

波片作为偏振光技术中重要的光学器件, 可以改变光束的偏振状态, 被广泛应用于激光衰减、偏振光显微

收稿日期: 2013-01-26; **收到修改稿日期**: 2013-03-10; **网络出版日期**: 2013-05-14

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(28Y3YZ018001)资助课题。

作者简介: 崔高增(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事薄膜和关键尺寸光学测量等方面的研究。

E-mail: cuigaozeng@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 郭霞(1974—), 女, 博士, 教授, 主要从事 LED、垂直腔面发射激光器和探测器等方面的研究。

E-mail: guo@bjut.edu.cn

镜、偏振修正、光隔离器、干涉仪、偏振仪等诸多方面,特别是在集成电路和材料研究领域常用的椭圆偏振仪和光学临界尺度测量设备(OCD)中,波片是能够实现超精密尺度测量的关键器件,测量厚度分辨率可达 10^{-2} nm。对于先进的宽光谱椭圆偏振测量系统,通常利用双片波片实现光谱范围内更均匀的偏振相位调制。

对于椭圆偏振测量仪,波片延迟的优选值为 $\lambda/4$,但对于宽光谱测量,真零级波片很薄,很难制造,低级和高级波片都会造成相位延迟光谱的振荡,限制测量的灵敏度,而且真零级波片的加工和胶合限制会影响深紫外波段,因此空气隙的双片复合零级波片、消色差波片等被应用于宽光谱测量中,比如用 MgF_2 材料制造的具有从近红外到深紫外的宽光谱传输范围、不具有旋光性等优点^[1]的双片波片补偿器。但由于工艺限制,双片波片补偿器中两片晶体的快轴不是绝对地垂直,存在一定的偏差角度;在此情况下,波片的相位延迟不再是单一轴向的,正交的两个方向都会存在延迟;若仍采用传统的方法检测和标定波片相位延迟并在系统中使用,将造成椭圆偏振系统的测量偏差。对于采用双片波片的光学系统,波片光轴的偏差角度需要有效的检测和控制。

现有的文献中已经明确指出偏差角度所产生的问题及其对椭圆偏振测量系统的影响^[1,2],当前也有一些检测和标定波片相位延迟的方法^[3~5],但标定方法没有考虑光轴对准的偏差,仍将双片波片作为标准的单片波片。Boulbry 等^[6,7]提出 Dichotomous 方法检测偏差角度,该方法要求检测系统的起偏器角度和检偏器角度必须限制在 $\pi/2$,调整精度要求较高,并且没有给出具体明确的数学解释。总之,现有文献中相关分析和解决问题的方法及讨论不够完整和系统。本文提出一种基于直通式椭圆偏振系统的检测方法,通过波片旋转测量双片波片光轴对准的偏差角度。利用该方法,起偏器和检偏器可处于任意的角度关系,不需要垂直等特定关系,系统误差更小。模拟了双片波片补偿器的两快轴非绝对垂直时,对椭圆偏振仪测量厚度所产生的影响;通过数学推导,提出检测方案,并且对实验方案进行模拟,验证了方法的正确性。此方法对检测双片波片补偿器偏差角度和提高双片波片的制造精度具有参考价值。

2 双片波片光轴偏差角度对椭圆偏振仪测量的影响

双片波片通过将一个波片的快轴和另一个波片的慢轴对准以消除全波光程差,仅留下所需的光程差,通常有双片复合零级波片和消色差波片,其原理如图 1 所示。

当双片波片的光轴严格对准时,波片的光学传输矩阵表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(-C)\mathbf{J}(\delta_2)\mathbf{R}(C)\mathbf{R}(-C_1)\mathbf{J}(\delta_1)\mathbf{R}(C_1) = \\ \mathbf{R}(-C)\mathbf{J}(\delta_2 - \delta_1)\mathbf{R}(C), \end{aligned} \quad (1)$$

式中旋转矩阵 $\mathbf{R}(C) = \begin{bmatrix} \cos C & -\sin C \\ \sin C & \cos C \end{bmatrix}$, 琼斯矩阵 $\mathbf{J}(\delta) =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta) \end{bmatrix}, C \text{ 和 } C_1 \text{ 是双片波片 } \mathbf{J}(\delta_2) \text{ 和 } \mathbf{J}(\delta_1) \text{ 分别相}$$

对于方位角零点的偏差, $C_1 = C + \frac{\pi}{2}$, δ_1 和 δ_2 是波片相位

延迟量, $\delta_1 = \frac{2\pi d_1}{\lambda}(n_o - n_e)$, $\delta_2 = \frac{2\pi d_2}{\lambda}(n_o - n_e)$, d_1 和 d_2

是波片的厚度, n_o 和 n_e 是对应的折射率, $\mathbf{J}(\delta_2 - \delta_1)$ 是组合后在理想情况下双片波片的琼斯矩阵表达式。当双片波片的光轴对准存在偏差^[8]时,其原理图如图 2 所示, Δ_c 是双片波片的光轴偏差角度。

波片的光学矩阵为

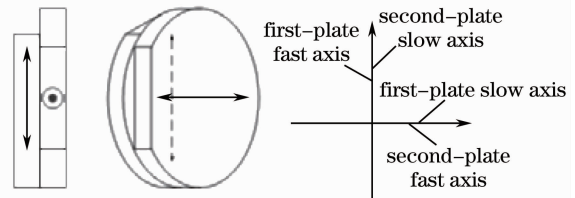


图 1 双片波片补偿器原理

Fig. 1 Principle of biplate compensator

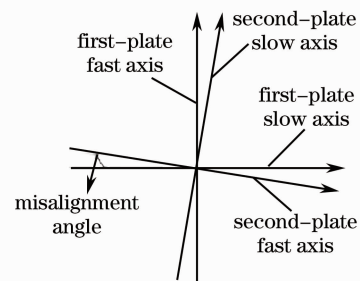


图 2 双片波片中光轴对准存在偏差角度

Fig. 2 Schematic of misalignment angle between two optical axes of biplate compensator

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(-C)\mathbf{J}(\delta_2)\mathbf{R}(C)\mathbf{R}\left[-\left(C+\Delta_c+\frac{\pi}{2}\right)\right]\mathbf{J}(\delta_1)\mathbf{R}\left(C+\Delta_c+\frac{\pi}{2}\right) = \\ \mathbf{R}(-C)\mathbf{J}(\delta_2)\mathbf{R}\left[-\left(\Delta_c+\frac{\pi}{2}\right)\right]\mathbf{J}(\delta_1)\mathbf{R}\left(\Delta_c+\frac{\pi}{2}\right)\mathbf{R}(C) = \mathbf{R}(-C)\mathbf{J}_c\mathbf{R}(C), \end{aligned} \quad (2)$$

式中

$$\mathbf{J}_c = \begin{bmatrix} \sin^2\Delta_c + \cos^2\Delta_c \times \exp(-i\delta_1) & \frac{1}{2}\sin 2\Delta_c \times [\exp(-i\delta_1) - 1] \\ \frac{1}{2}\sin 2\Delta_c \times \{\exp[-i(\delta_1 + \delta_2)] - \exp(-i\delta_2)\} & \sin^2\Delta_c \times \exp[-i(\delta_1 + \delta_2)] + \cos^2\Delta_c \times \exp(-i\delta_2) \end{bmatrix}.$$

下面讨论双片波片对椭圆偏振仪的影响,以常见的可旋转波片的 PSC_rA 椭圆偏振仪为例,其光学结构如图 3 所示。

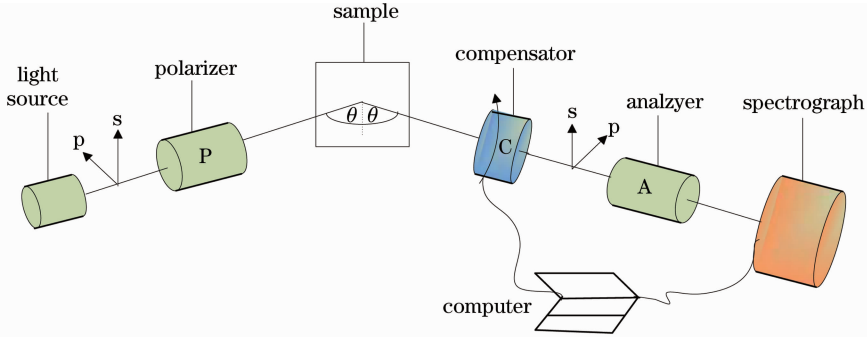


图 3 PSC_rA 椭圆偏振系统结构图

Fig. 3 PSC_rA ellipsometric system

PSC_rA 椭圆偏振系统主要组成部分包括:光源、起偏器和检偏器(分别用于产生和检测偏振光)、待测样品、补偿器(用于改变偏振光的相位差,测量时处于旋转状态)、光谱仪(用于探测各波段光的强度)和计算机(数据采集和处理单元,用于分析实验数据、输出测量结果)。 PSC_rA 椭圆偏振光学系统^[9,10]的表达式为

$$\mathbf{L}_{\text{out}} = \mathbf{J}_A\mathbf{R}(A)\mathbf{R}(-C)\mathbf{J}_c\mathbf{R}(C)\mathbf{S}\mathbf{R}(-P)\mathbf{J}_P\mathbf{L}_{\text{in}}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{J}_P = \mathbf{J}_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 样品 $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sin\Psi\exp(i\Delta) & 0 \\ 0 & \cos\Psi \end{bmatrix}$, $\tan\Psi = \left|\frac{r_p}{r_s}\right|$, $\Delta = \delta_p - \delta_s$, r_p 和 r_s 分别是菲涅耳

方程中 p 偏振和 s 偏振反射系数, δ_p 和 δ_s 分别是 p 偏振和 s 偏振经样品反射时的相位延迟量。当波片是双片波片时,通常认为(理想情况) $\Delta_c = 0$,使用和标定波片时,忽略 Δ_c 造成的偏差。但实际情况下 Δ_c 通常不等于零,下面通过(3)式模拟计算,比较椭圆系统参数相同的情况下, Δ_c 存在对椭圆测量结果(Ψ 和 Δ)的影响。模拟计算时,系统参数起偏器和检偏器的方位角分别固定在 45° 和 22.5° ,双片波片的参数是 $d_1 = 800 \mu\text{m}$, $d_2 = 807.112 \mu\text{m}$,材料是 MgF_2 ,样品的 Ψ 和 Δ 根据入射角和样品不同,通过多层薄膜反射模型计算获得。以入射角为 60° 情况下的 2 nm 的 SiO_2 为例,模拟得到强度 $I(C)$ 曲线后,利用函数进行拟合得到傅里叶系数,再利用非线性最小二乘法拟合出样品的 Ψ 和 Δ 谱线,进而把得到的 Ψ 和 Δ 谱线代入到多层薄膜反射模型中拟合得到样品的厚度。如图 4 所示,当双片波片存在偏差角度时,角度为 0.2° 时,椭圆参数 Ψ 和 Δ 就会出现振荡。

当偏差角度增大时,效果如图 5 所示,图 5(a)和(b)分别为偏差角度为 0.2° 、 0.4° 和 0.6° 时 Ψ 和 Δ 与偏差角度为 0° 时 Ψ_0 和 Δ_0 的差值曲线图。在只改变偏差角度的情况下,偏差角度越大,振荡的振幅越大。图 5(c)和(d)分别为双片波片厚度为 $d_1 = 800 \mu\text{m}$ 、 $d_2 = 807.112 \mu\text{m}$ 和 $d_1 = 1600 \mu\text{m}$ 、 $d_2 = 1607.112 \mu\text{m}$,偏差角度为 0.2° 时 Ψ 和 Δ 与偏差角度为 0° 时 Ψ_0 和 Δ_0 的差值曲线图。可见振荡的幅度与偏差角度成正比,振荡频率与波片的厚度成线性关系,波片越厚,振荡频率越大。

下面针对双片波片补偿器偏差角 Δ_c 存在所引起的样品测量样品厚度偏差进行模拟分析。通过分析 64.18° 入射,厚度分别为 300 nm 和 30 nm 的 SiO_2 样品,对比在不同 Δ_c 角度时得到的拟合厚度值。

由图 6 可以看出,偏差角度变化 1° 时,对于 300 nm 的 SiO_2 ,厚度仅变化 0.03 nm ;而对于 30 nm 的

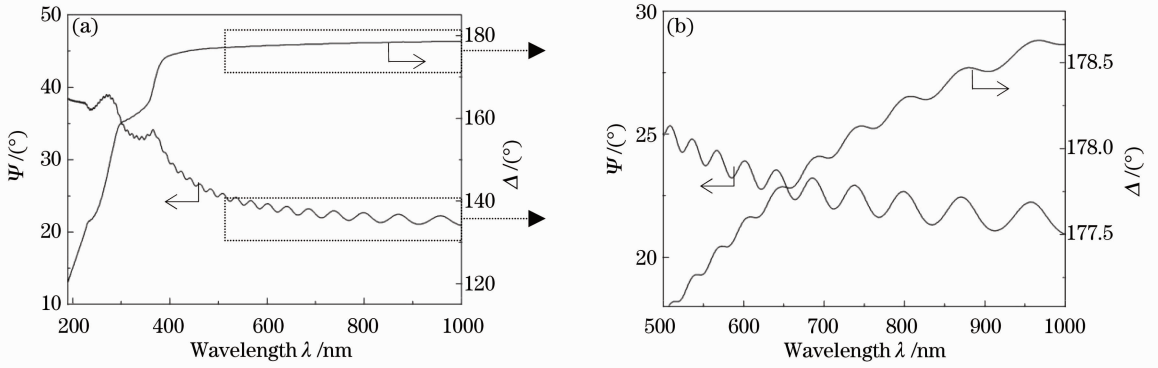


图 4 偏差角度为 0.2° 时 Ψ 和 Δ 随波长的变化

Fig. 4 Ψ and Δ versus wavelength when the misalignment angle is 0.2°

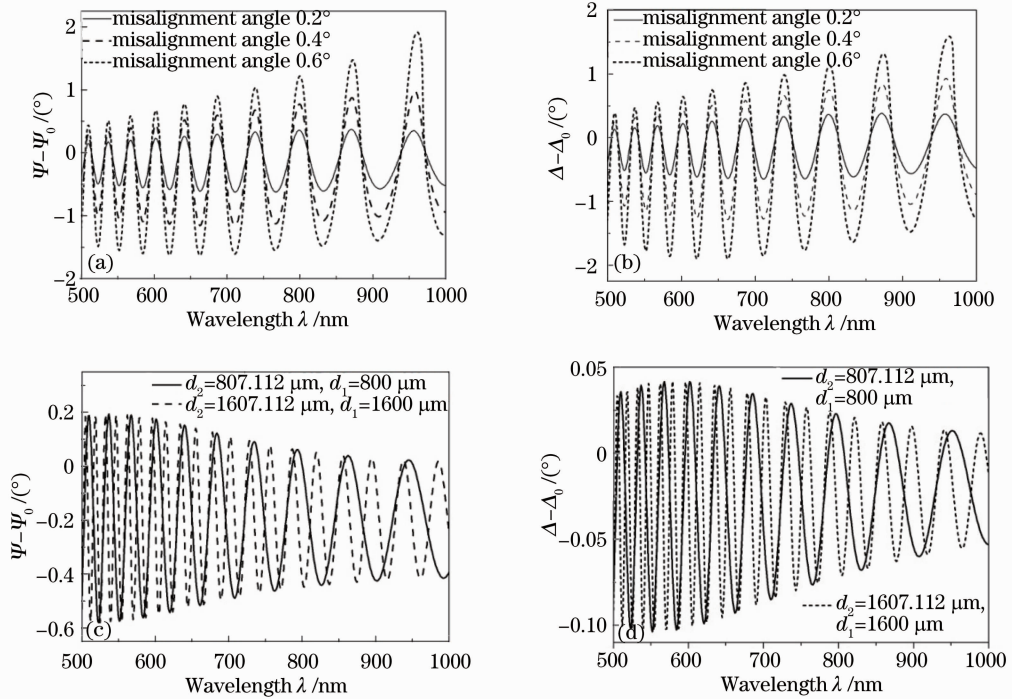


图 5 不同偏差角度下与不同波片厚度下, Ψ 和 Δ 差值变化图

Fig. 5 Ψ and Δ versus wavelength with different misalignment angles and different thicknesses of the biplate

SiO_2 , 厚度变化 0.375 nm 。可见, 对于较厚的样品, 偏差角度对其厚度的影响很小, 几乎可以忽略, 但对于较薄的样品, 拟合厚度随偏差角度增大呈线性增加, 测量时需要考虑偏差角度对其厚度测量的影响, 例如在实际生产中对于栅极等厚度小于 2 nm 的超薄薄膜, 测量误差将造成很大影响。

3 测量双片波片补偿器的偏差角度值

本文提出的检测波片的方法基于无样品直通式旋转波片(PC_rA)的椭偏光学系统(图 7)。系统参数与图 3 类似, 去除样品, 在此系统中, 起偏器和检偏器固定在某任意角度。

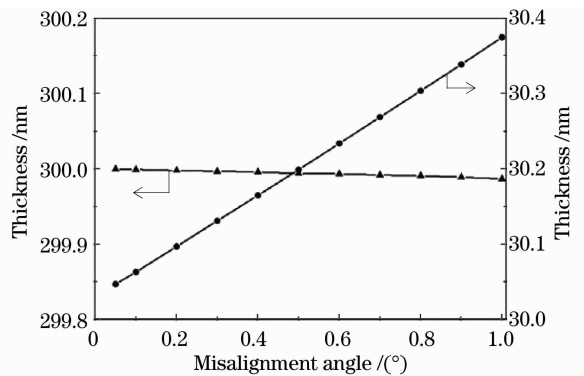


图 6 拟合厚度随偏差角度的变化

Fig. 6 Fitting thickness versus misalignment angle

当不包含样品时,(3)式没有琼斯矩阵 S , 化简为

$$\mathbf{L}_{\text{out}} = \mathbf{J}_A \mathbf{R}(A) \mathbf{R}(-C) \mathbf{J}_C \mathbf{R}(C) \mathbf{R}(-P) \mathbf{J}_P \mathbf{L}_{\text{in}}. \quad (4)$$

实际实验中,不必确定 C 相对于 0° 的绝对值,而通过引入补偿器开始旋转时的角度 C_s 。本方法可在任意 C_s 情况下求解,因此 C 可以定义为双片波片上的任意方向。鉴于 Δ_c 是光轴偏差角度,将其看作小量(小于 0.1°),对(4)式进行泰勒展开,采用一阶近似,忽略高阶 Δ_c^2 及以上的展开项。在此情况下 PC_rA 系统的测量光强表达式为

$$I(C) = \mathbf{E} \times \mathbf{E}' = \alpha_0 + \alpha_2 \cos 2(C + C_s) + \beta_2 \sin 2(C + C_s) + \alpha_4 \cos 4(C + C_s) + \beta_4 \sin 4(C + C_s), \quad (5)$$

式中 $\alpha_2, \beta_2, \alpha_4, \beta_4$ 为补偿器旋转情况下解得的光强在每个波长上的傅里叶系数。进一步对(5)式展开得到

$$I(C) = \alpha_0 + \alpha'_2 \cos 2C + \beta'_2 \sin 2C + \alpha'_4 \cos 4C + \beta'_4 \sin 4C, \quad (6)$$

式中

$$\begin{bmatrix} \cos 4C_s & -\sin 4C_s \\ \sin 4C_s & \cos 4C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha'_4 \\ \beta'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_4 \\ \beta_4 \end{bmatrix}.$$

因此,通过实验可以获得的傅里叶系数 α'_4, β'_4 存在关系

$$\frac{\beta'_4}{\alpha'_4} = \frac{t_1 \sin[4C_s - 2(A + P)] + t_2 \cos[4C_s - 2(A + P)] \times \Delta_c}{-t_1 \cos[4C_s - 2(A + P)] + t_2 \sin[4C_s - 2(A + P)] \times \Delta_c}, \quad (7)$$

式中 $t_1(\delta_1, \delta_2) = \frac{1}{4} \times [1 - \cos(\delta_1 - \delta_2)]$, $t_2(\delta_1, \delta_2) = \frac{1}{2} \times [1 + \cos \delta_2 - \cos \delta_1 - \cos(\delta_2 - \delta_1)]$ 。进一步简化可得

$$\arctan \frac{\beta'_4}{\alpha'_4} = 2(A + P - 2C_s) - 2 \left(1 - \frac{\sin \frac{\delta_2 + \delta_1}{2}}{\sin \frac{\delta_2 - \delta_1}{2}} \right) \times \Delta_c. \quad (8)$$

通过宽光谱范围内的比较已知条件计算值 $2(A + P - 2C_s) - 2 \left(1 - \frac{\sin \frac{\delta_2 + \delta_1}{2}}{\sin \frac{\delta_2 - \delta_1}{2}} \right) \times \Delta_c$ 和光强拟合傅里叶

系数比值的反正切值 $\arctan \frac{\beta'_4}{\alpha'_4}$ 。如图 8 所示,模拟实验值(点)和近似公式计算值(圆圈)具有很好的一致性,说明忽略高次小量对近似的影响很小,并且谱线的振动说明该方法对偏差角度 Δ_c 具有灵敏性。其中模拟设置波片参数参考零级 MgF_2 波片, $d_1 = 800 \mu\text{m}$, $d_2 = 807.112 \mu\text{m}$, 偏差角度为 0.1° 。

实际测量中,系统的 Δ_c, C_s, A, P 是不随波长变化的常量,理论上选取 4 个不同的波长,可以列出至少四个方程,组成方程组可以解出 Δ_c 。如表 1 所示,当双片波片光轴偏差角度 Δ_c 为 $\pm 0.5^\circ$ 之间时,基于模拟实验

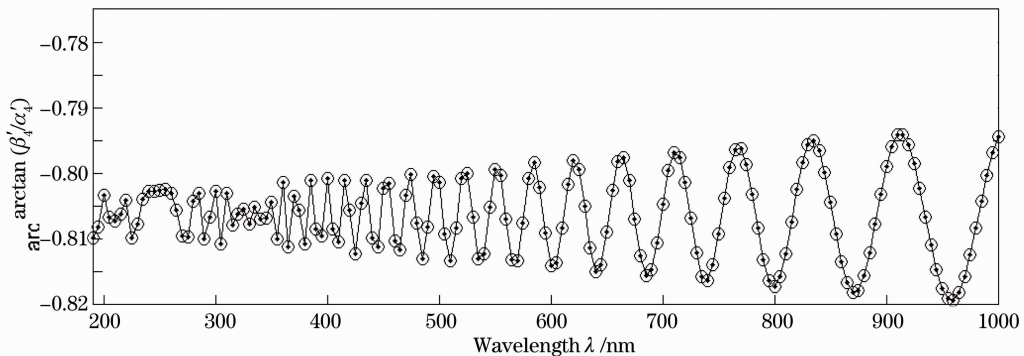


图 8 实验模拟值与近似公式计算值比较

Fig. 8 Comparison between simulation results and calculation results by appoximate expression

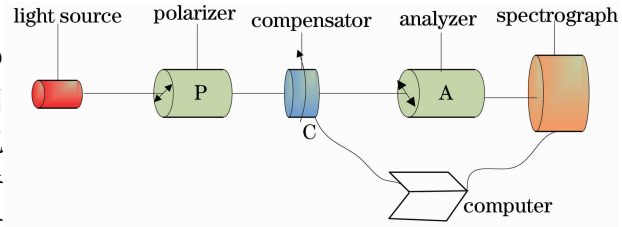


图 7 PC_rA 系统

Fig. 7 PC_rA system

结果,都可以准确地计算出偏差角度。

表 1 模拟实验代入值和拟合实验值的比较

Table 1 Simulated experimental value versus fitting values

No.	Simulation $\Delta_c/(\circ)$	Fit $\Delta_c/(\circ)$
1	0.5000	0.5000
2	-0.5000	-0.4990
3	0.2000	0.2001
4	-0.2000	-0.1998
5	0.0500	0.0490
6	-0.0500	-0.0499

由(8)式可以看出,在求解时 $A+P-2C_s$ 对于光谱范围是一个常数,设计系统时并不需要知道它们的具体数值,相比于文献[6,7]中的方法, P 和 A 可以在任意角度,更加简单,可以降低实验系统偏差,并且实际测量时可同时获得光谱范围的大量数据,利用最小二乘法解得偏差角度 Δ_c 。由于双片波片厚度通常约为 1 mm,本方法忽略了双片波片前后界面间光的多次反射造成的影响。

4 结 论

通过模拟 PSC_rA 椭偏仪发现,当双片波片的光轴存在偏差角度时,测量薄膜的厚度越小,双片波片补偿器偏差角度带来的影响越大。通过模拟实验过程,验证了通过 PC_rA 光学结构可以测量双片波片中的光轴偏差角度。通过数学表达式可以看出此方法不需要考虑 P 、 A 、 C_s 的相对关系,具有较低的系统误差,并且不需要旋转偏振器,从而避免了光学系统中偏振敏感元件对于测量的影响。此方法对检测和提高制造双波片式补偿器的精度具有参考价值。进一步的工作将把该方法进一步引入椭圆偏振测量的校准中。

参 考 文 献

- 1 Jounghel Lee, P. I. Rovira, Ilsin An *et al.*. Alignment and calibration of the MgF₂ biplate compensator for applications in rotating-compensator multichannel ellipsometry [J]. *Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(8): 1980~1985
- 2 Liphardt Martin, Johs Blaine, Hale Jeffrey *et al.*. Spectroscopic Ellipsometer and Polarimeter Systems [P]. US Patent 7336361 B1, 2008-12-28
- 3 Li Fanyue, Han Jie, Zeng Aijun *et al.*. Method for measuring retardation by swinging quarter-wave plate with phase modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0208003
李凡月, 韩 杰, 曾爱军等. 基于相位调制和样品摆动的 1/4 波片相位延迟量测量方法[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0208003
- 4 Wang Jun, Chen Lei, Wu Quanying *et al.*. Retardation measurement of waveplates using white-light Michelson interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0508001
王 军, 陈 磊, 吴泉英等. 一种基于白光迈克耳孙干涉仪波片延迟量的测量方法[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0508001
- 5 Hou Junfeng, Wang Dongguang, Deng Yuanyong *et al.*. Phase retardation measurement with least square fitting method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812001
侯俊峰, 王东光, 邓元勇等. 基于最小二乘拟合的波片相位延迟测量[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0812001
- 6 Bruno Boulbry, Bruno Bousquet, Bernard Le Jeune. Polarization errors associated with zero-order achromatic quarter-wave plates in the whole visible spectral range [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(5): 225~235
- 7 Boulbry, B. Le Jeune, F. Pellen *et al.*. Identification of error parameters and calibration of a double-crystal birefringent wave plate with a broadband spectral light source [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **35**(20): 2508~2515
- 8 D. E. Aspnes Alignment of an optically active biplate compensator [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(11): 2545~2546
- 9 Hiroyuki Fujiwara. Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications [M]. Tokyo: Maruzen Co., Ltd., 2003. 81~89
- 10 R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. Ellipsometry and Polarized Light [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1977