

# 利用白光干涉垂直扫描法测量波片延迟量

王军<sup>1</sup> 陈磊<sup>2</sup> 吴泉英<sup>1</sup> 臧涛成<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>苏州科技学院数理学院, 江苏 苏州 215009)  
(<sup>2</sup>南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 将白光偏振干涉、迈克耳孙干涉仪和垂直扫描系统相结合,提出了一种利用白光干涉垂直扫描测量波片延迟量(包括级次信息)的方法。准直的白光经偏振干涉系统形成两束偏振方向相同的线偏光,它们进入迈克耳孙干涉仪后分别被两干涉臂的平面镜反射形成四束光,在压电传感器(PZT)驱动干涉仪动镜垂直扫描的过程中,它们两两干涉,形成3组白光干涉包络。根据CCD各像素记录的白光干涉信号,计算白光干涉包络之间的光程差,即可获得被测延迟量。实验测量了一多级波片的延迟量,其结果(4268.1 nm)与使用光谱扫描法测量得到的结果(4269.9 nm)相吻合。

**关键词** 光学测量;波片;延迟量;迈克耳孙干涉仪;偏振干涉;白光干涉垂直扫描

**中图分类号** O436.3; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.011203

## Retardation Measurement of Wave Plates Using White-Light Interference Vertical Scanning Method

Wang Jun<sup>1</sup> Chen Lei<sup>2</sup> Wu Quanying<sup>1</sup> Zang Taocheng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China)  
(<sup>2</sup> School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** A method using Michelson interferometer, polarization interferometry system and white-light vertical scanning system for measuring the retardation of wave plates (including the order of retardation) is presented. Two beams with the same polarization directions are introduced after a collimated white-light passes through the polarization interference system. Then the two beams are respectively reflected by two plane mirrors of the Michelson interferometer. As the moving mirror driven with piezoelectric transducer (PZT) scans vertically, three white-light interference packets are formed and are captured by a CCD camera. The retardation of wave plates can be calculated by the optical-path difference between the central packet and side packet. A multiple-order wave plate is tested by the white-light interference vertical scanning method, and the measured retardation (4268.1 nm) coincides with the that (4269.9 nm) measured by spectroscopic scanning method.

**Key words** optical measurement; wave plate; retardation; Michelson interferometer; polarization interference; white-light interference vertical scanning

**OCIS codes** 120.3180; 220.4840; 260.1440; 260.2130

## 1 引言

波片是由双折射晶体制成的相位延迟器,其延迟量是决定光学系统性能、精度的关键参数,因此精确测量波片的延迟量是非常重要的。

大多数测量相位延迟器的方法仅能得到延迟量的小数部分,无法测得级次信息,如巴比涅法、塞纳蒙法

**收稿日期**: 2012-08-23; **收到修改稿日期**: 2012-09-21; **网络出版日期**: 2012-11-10

**基金项目**: 浙江省眼视光学和视觉科学重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地开放课题、江苏省“六大人才高峰”项目和苏州科技学院科研基金资助课题。

**作者简介**: 王军(1981—),男,博士,讲师,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: wjk31@163.com

和直角棱镜法<sup>[1]</sup>等,然而在斜入射光学系统中分析出射光的偏振态,必须考虑多级波片的级次信息。目前,包含级次信息的延迟量测量法主要有:1) 将起偏器、被测波片和检偏器组成的偏振干涉系统置于分光光度计的参考光路,并测量系统的透射率随入射光波长的变化关系曲线,通过对曲线最值点的分析可获取偏振干涉系统中波片的延迟量和级次信息<sup>[2,3]</sup>。2) 在干涉仪中配合使用单色光和宽光谱光源干涉实现延迟量的测量,首先使用氦氖激光器作为光源,利用移相法测量延迟量的小数部分,再切换使用白光光源,根据插入被测波片前后白光干涉信号零位的偏移量,便可测得延迟量的级次值<sup>[4]</sup>。3) 外差偏光仪法<sup>[5,6]</sup>,在外差偏光仪上旋转被测波片,改变系统中光波的入射角,亦可测出多级波片的延迟量。4) 将偏振干涉系统和白光迈克耳孙干涉仪相结合,根据空间白光干涉图计算相邻干涉包络之间的距离即可获得延迟量和级次信息<sup>[7,8]</sup>,该方法需要倾斜干涉仪其中一干涉光路的平面反射镜,而两干涉光路平面反射镜之间的夹角会引入包络的定位误差。

本文将白光偏振干涉和在迈克耳孙干涉仪基础上构建的垂直扫描系统相结合,利用扫描得到的白光干涉信号实现波片延迟量(包括级次)的测量,测量过程中不需旋转各元件,无需倾斜干涉仪的平面反射镜,便可获取延迟量在被测口径内的分布信息。

## 2 测量原理

如图1所示,测量系统由准直的白光光源、偏振干涉系统、迈克耳孙干涉仪和垂直扫描系统组成。偏振干涉系统由起偏器 $P_1$ 、被测波片和检偏器 $P_2$ 构成,准直的白光经偏振干涉系统后形成振动方向相同、光程差为 $\Delta$ 的两束线偏光, $\Delta$ 即为被测波片的延迟量。它们进入迈克耳孙干涉仪后分别被平面反射镜 $R$ 和 $T$ 反射,形成四束准直光的波前分别为 $T_s$ 、 $R_s$ 、 $T_p$ 和 $R_p$ ,在压电传感器(PZT)推动反射镜 $T$ 纵向扫描的过程中,四束光两两相干,CCD靶面每个像素对应的干涉光强信号随反射镜 $T$ 扫描位置的变化情况如图1中插图所示。

设被测波片的光轴为 $x$ 轴, $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为 $P_1$ 、 $P_2$ 的透光轴与 $x$ 轴的夹角,经偏振干涉系统透射出的两束线装偏光的振幅分别为: $A_{2s} = A_1 \cos \alpha \times \cos \beta$ , $A_{2p} = A_1 \sin \alpha \times \sin \beta$ ,其中 $A_1$ 为由 $P_1$ 透射出的线装偏光的振幅。在PZT纵向扫描过程中,CCD靶面每个像素对应的干涉光强信号表达式为

$$I(z) = \int_0^{\infty} S(k) \{A_{2s}^2 + A_{2p}^2 + 2A_{2s}A_{2p} \cos[k(z - \Delta)]\} dk, \quad (1)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ , $z$ 为由PZT纵向扫描引入的光程差, $S(k)$ 为白光光源的光谱分布函数。设起偏器与检偏器正交, $\alpha = \beta = \pi/4$ ,即 $A_{2s}^2 = A_{2p}^2$ ,并略去常数,式(1)简化为

$$I(z) = \int_0^{\infty} S(k) [1 + \cos(kz - k\Delta)] dk. \quad (2)$$

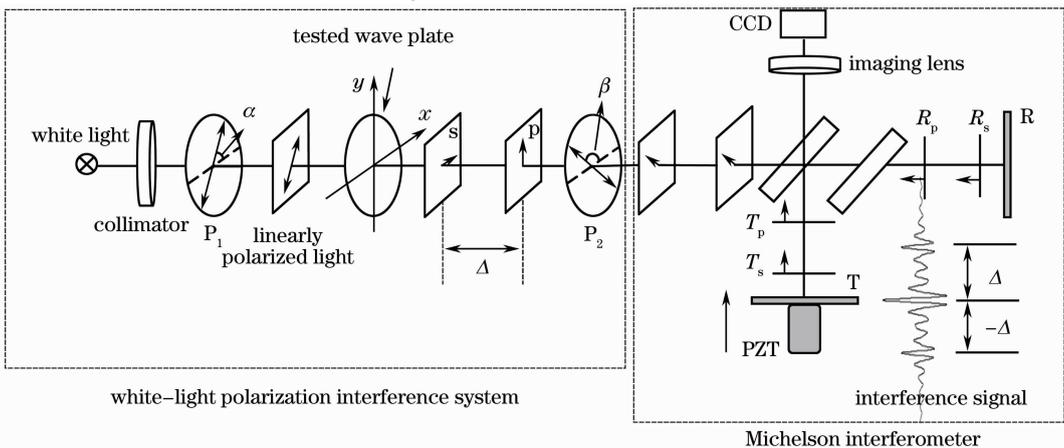


图1 基于白光干涉垂直扫描的波片延迟量测量系统。插图为CCD对应的干涉信号

Fig. 1 Optical setup of the wave plate retardation measuring system based on white-light interference vertical scanning. Inset shows the interference signal captured by CCD

当反射镜 T 纵向扫描到迈克耳孙干涉仪的两干涉光路等光程时 ( $z = 0$ ),  $T_s$  和  $R_s$ 、 $T_p$  和  $R_p$  均光程匹配,干涉产生的两组白光干涉包络,且位置重合,合成了图 1 中插图的中央白光干涉包络。当反射镜 T 扫描到使  $T_s$  和  $R_p$  的光程匹配时 ( $z = \Delta$ ),  $T_s$  和  $R_p$  干涉形成图 1 中插图上侧的白光干涉包络。同理,当反射镜 T 扫描到使  $T_p$  和  $R_s$  的光程匹配时 ( $z = -\Delta$ ),  $T_p$  和  $R_s$  干涉形成图 1 下侧的白光干涉包络。在扫描过程中,  $T_s$  和  $T_p$ 、 $R_s$  和  $R_p$  之间的光程差均为  $\Delta$  保持不变,因此其干涉光强可视为背景光强。

在扫描得到的白光干涉信号中,上、下两侧的白光干涉包络(以下统称旁侧干涉包络)对称地分布在中央白光干涉包络两侧,且旁侧包络峰值位置距离中央包络峰值位置的光程差即为被测延迟量。设白光光源的光谱分布函数  $S(k)$  为

$$S(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta k} \exp\left[-\left(\frac{k-k_0}{\sqrt{2}\Delta k}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  为中心波数,  $\Delta k$  为谱宽。则上侧包络的干涉光强可表示为<sup>[9,10]</sup>

$$I(z) = \int_0^{\infty} S(k) \{1 + \cos[kz - k\mu(k)d]\} dk = 1 + (1+a^2)^{-1/4} \exp\left\{-\left[\frac{2(z-\mu_g d)}{\sqrt{1+a^2}l_c}\right]^2\right\} \times \cos\left\{k_0(z-\mu_p d) - \frac{a}{1+a}\left[\frac{2(z-\mu_g d)}{l_c}\right]^2\right\}, \quad (4)$$

式中  $d$  为波片厚度,  $a = (\Delta k)^2 \mu''(k_0)d$ ,  $l_c$  为光源相干长度,系数  $\mu_p$ 、 $\mu_g$  由以下泰勒展开式确定<sup>[9,10]</sup>:

$$\mu(k) = \mu(k_0) + (k-k_0)\mu'(k_0) + \frac{\mu''(k_0)}{2}(k-k_0)^2 = k_0\mu_p + (k-k_0)\mu_g + \frac{1}{2}(k-k_0)^2\mu''(k_0). \quad (5)$$

由(4)式可知,旁侧包络函数  $\exp\{-[2(z-\mu_g d)/\sqrt{1+a^2}l_c]^2\}$  在  $z-\mu_g d = 0$  时达到峰值,该峰值位置到中央包络峰值位置(即干涉仪的零光程差位置)的光程差为

$$z = \mu_g d. \quad (6)$$

求出厚度  $d$  即可计算出延迟量为

$$\Delta = \mu(\lambda)d = \rho z \mu(\lambda), \quad (7)$$

式中  $\rho = 1/\mu_g$ 。

## 3 实 验

### 3.1 波片延迟量的测量

在上海光学仪器厂的 JDS-1 接触式干涉仪(迈克耳孙型)的基础上构建测量系统,使用 6 W 的白炽灯作为白光光源,经远心透镜准直后进入测量系统。被测样品为一块由石英晶体制成的多级波片,口径 12 mm。PZT 扫描间隔为  $\Delta l = 13$  nm,引起的干涉仪光程差改变为  $\Delta z = 2\Delta l = 26$  nm,扫描过程中 CCD 靶面其中一个像素干涉信号强度的变化曲线如图 2 所示。

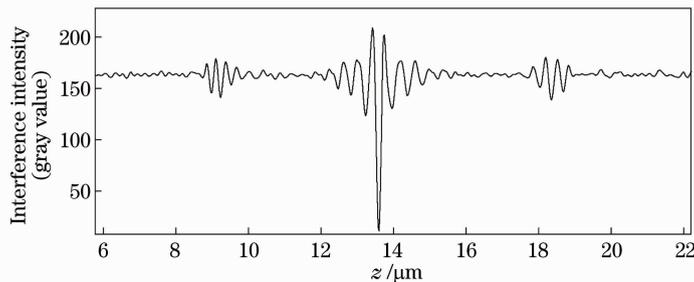


图 2 CCD 采集的白光干涉信号

Fig. 2 White-light interference signal captured by CCD camera

由(7)式可知,波片延迟量由以下 3 个参数确定:

1)  $\mu(\lambda)$ , 被测波片由石英晶体制成,其双折射率可由经验公式<sup>[11]</sup>获得:

$$10^3 \mu(\lambda) = 8.86410 + 0.107057\lambda^{-2} + 0.0019893\lambda^{-4} - 0.17175\lambda^2 - 10^{-3}\Gamma(1 + \Gamma/900)(1.01 + 0.2\lambda^2), \quad (8)$$

式中  $T$  表示环境温度, 单位为 K。

2)  $\rho$ , 文献[7]中已给出在已知被测波片的双折射率和白光光源光谱分布情况下  $\rho$  值的计算方法, 在本系统中  $\rho=98.78^{[7]}$ 。

3)  $z$ , 即旁侧和中央白光干涉包络的峰值的距离。

白光干涉包络的峰值位置的确定是计算  $z$  值的关键, 对白光干涉信号进行傅里叶变换、移频和逆傅里叶变换后, 即可提取到包络信息<sup>[12]</sup>。图 3 为利用该方法从图 2 所示的白光干涉信号提取的包络。对提取的包络做最小二乘拟合, 并将 PZT 扫描间隔细分为 10 份, 以提高峰值位置的定位精度, 此时得到中央包络峰值位置为  $x_C=13590$  nm, 右侧白光干涉包络的峰值位置为  $x_R=18365$  nm, 则右侧白光干涉包络的峰值偏离中央包络峰值的光程差  $z$  为

$$z = x_R - x_C = 4775 \text{ nm}. \quad (9)$$

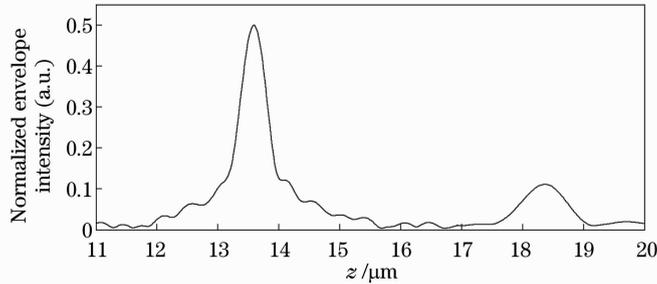


图 3 白光干涉信号的包络

Fig. 3 Envelopes of white-light interference signal

这样根据(7)式就可计算出被测波片口径内与 CCD 靶面对应点的延迟量为

$$\Delta = \rho z \mu(\lambda) = 98.78 \times 4775 \times 0.0090527 = 4269.9 \text{ (nm)}, \quad (10)$$

其中, 工作波长为  $\lambda=632.8$  nm。同样, 利用扫描过程中 CCD 各像素记录的白光干涉信号, 可获得被测口径内延迟量的分布, 如图 4 所示, 延迟量均值为  $\bar{\Delta}_{632.8} = 4268.1$  nm。

### 3.2 结果比对

为了验证上述测量结果的正确性, 利用 PE 公司 Lambda950 双光路型分光光度计按照文献[3]给出的方法测量 3.1 节中的被测波片, 其系统透射率随波长的变化曲线如图 5 所示。

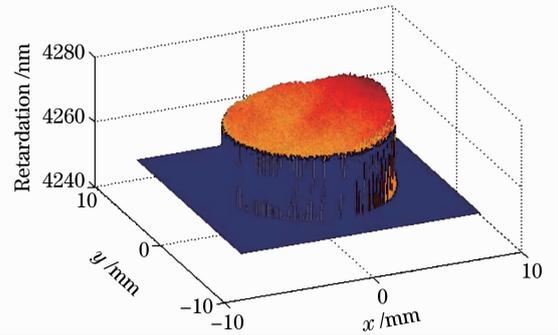


图 4 多级波片被测口径内延迟量分布

Fig. 4 Retardation distribution of the multiple-order wave plate in the test field

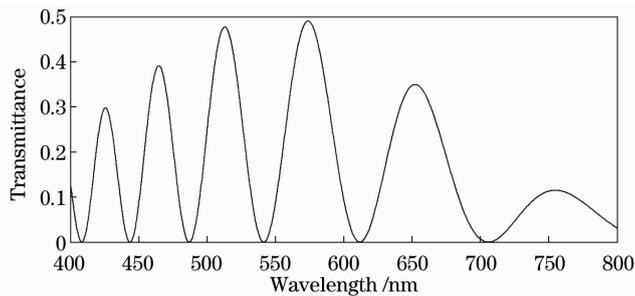


图 5 被测波片的透射率曲线

Fig. 5 Transmittance curve of the tested wave plate

在多级波片的透射率曲线上找到两个邻近的极大值点, 对应波长分别为  $\lambda_1=573.8$  nm,  $\lambda_2=652.2$  nm, 因此被测波片在  $\lambda_1$  处的级次为<sup>[3]</sup>

$$m = [(1-f)\phi - 2\pi] / [2\pi(f-1)], \quad (11)$$

式中  $f = \lambda_1 \mu(\lambda_2) / [\lambda_2 \mu(\lambda_1)]$ ,  $\phi = \pi$ , 则  $m = 7$ 。在工作波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  下, 被测多级波片的延迟量为<sup>[3]</sup>

$$\Delta_{632.8} = d\mu(\lambda) = \frac{(m + 0.5)\lambda_1 \mu(\lambda)}{\mu(\lambda_1)} = 4266.8 \text{ nm}. \quad (12)$$

使用分光光度计测得的结果 ( $\Delta_{632.8} = 4266.8 \text{ nm}$ ) 与利用本文方法测量得到的结果 ( $\bar{\Delta}_{632.8} = 4268.1 \text{ nm}$ ) 相吻合, 验证了本文方法的正确性。

## 4 分 析

### 4.1 延迟量的测量范围

撤出偏振干涉系统, 使准直的白光直接入射进迈克耳孙干涉仪, 利用 PZT 垂直扫描得到一维白光干涉光强信号, 如图 6(a) 所示, 图 6(b) 为其包络, 宽度为  $4600 \text{ nm}$ 。为避免中央包络与旁侧包络距离过近以致影响包络峰值位置的定位, 被测多级波片的延迟量至少为  $\Delta_{\min} = 4600/2 = 2300 \text{ (nm)}$ , 延迟量低于此值时, 包络间会互相叠加。当波片延迟量小于  $\Delta_{\min}$  时, 先将一多级波片置于  $P_1$  和  $P_2$  之间, 使包络之间充分分离, 然后将待测低级次波片置于多级波片后, 并使两波片的光轴重合, 即形成一个新的多级波片, 其延迟量为待测波片和多级波片延迟量之和, 因此两次测量结果的差值就是低级次波片的延迟量。

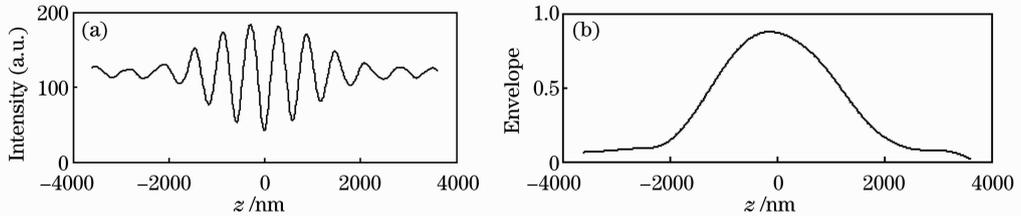


图 6 (a) 白光干涉一维干涉光强和 (b) 包络

Fig. 6 (a) White-light interference intensity and (b) its envelope

### 4.2 PZT 与测量精度的关系

各包络峰值位置的间距是以 PZT 步进距离  $\Delta l$  对应的光程差变化量  $\Delta z$  为单位的, 因此,  $\Delta l$  的值越小, 延迟量测量的精度就越高。为减少 PZT 扫描引入的误差, 实验中选用 PZT 行程中线性较好的一段, 并对其做非线性校正, 校正后的 PZT 位移曲线如图 7 所示。测量过程中, PZT 的扫描间隔为  $\Delta l = 13 \text{ nm}$ , 则  $\Delta z = 26 \text{ nm}$ 。通过对干涉包络做二次多项式拟合并将扫描间隔细分为十份, 将定位精度提高到  $\Delta z/10 = 2.6 \text{ nm}$ 。因此, 采用步进间隔精度更高的 PZT 并减少扫描间距可提高延迟量的测量精度。

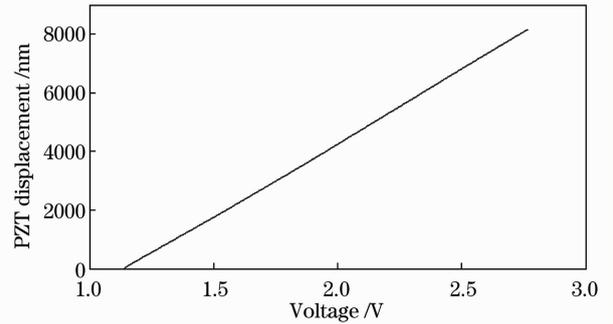


图 7 PZT 位移曲线

Fig. 7 Displacement curve of PZT

## 5 结 论

将偏振干涉和白光干涉垂直扫描系统相结合, 把双折射晶体的延迟量转换为白光干涉包络之间的光程差, 通过计算包络之间的光程差实现了波片延迟量的测量。该方法易于应用在带有垂直扫描系统的白光迈克耳孙干涉仪中, 例如白光干涉轮廓仪等, 在测量过程中无需旋转光学元件或倾斜干涉仪的平面镜, 因此可以避免旋转、倾斜引入的误差, 此外干涉仪平面镜的面形偏差不会影响测量精度。该方法可测量的口径小于准直白光干涉仪的口径, 精度主要由 PZT 的扫描精度和间隔决定, 在扫描间隔为  $13 \text{ nm}$  并采用多项式拟合和插值细分方法的情况下, 延迟量测量精度可达  $1.3 \text{ nm}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Zhengping, Li Qingbo, Tan Qiao *et al.*. Method of measuring practical retardance value and judging the fast or slow

- axis of quarter-wave plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 523~528  
王政平, 李庆波, 谭巧等. 测量  $\lambda/4$  波片实际相移量并判定快慢轴的方法[J]. 中国激光, 2005, **32**(4): 523~528
- 2 Peter S. K. Lee, J. B. Pors, Martin P. van Exter *et al.*. Simple method for accurate characterization of birefringent crystals[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(6): 886~870
- 3 Weiwei Feng, Lihuang Lin, Ligang Chen *et al.*. A spectroscopic method for determining thickness of quartz wave plate[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(12): 705~708
- 4 Sanjib Chatterjee, Y. Pavan Kumar. Simple technique for the measurement of two-dimensional linear retardation distributions of wave plates with a phase-shifting Nomarski prism[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(7): 874~882
- 5 Yu-Tsan Jeng, Yu-Lung Lo. Heterodyne polariscope for sequential measurements of the complete optical parameters of a multiple-order wave plate[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(6): 1134~1141
- 6 Cheng-Hung Hsieh, Chien-Chung Tsai, Hsiang-Chun Wei *et al.*. Determination of retardation parameters of multiple-order wave plate using a phase-sensitive heterodyne ellipsometer[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(23): 5944~5950
- 7 Wang Jun, Chen Lei, Wu Quanying *et al.*. Retardation measurement of wave plates 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
- 8 Wang Jun. The Measurement of Crystal Characteristic Parameter and Profile Using Low Coherence Light Interference[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. 52~54  
王军. 短相干光干涉在晶体特性参数和微观表面形貌测量中的应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010. 52~54
- 9 Feng Tang, Xiangzhao Wang, Yimo Zhang *et al.*. Characterization of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers by use of white-light interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(19): 4073~4080
- 10 Pavel Pavlicek, Jan Soubusta. Measurement of the influence of dispersion on white-light interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **42**(4): 766~770
- 11 A. E. Ennos, K. W. Opperman. Birefringence of natural quartz[J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(1): 170
- 12 G. S. Kino, S. S. C. Chim. Mirau correlation microscope[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(26): 3775~3783