

基于移相算法的玻璃应力延迟量快速测量方法

李金鹏 陈 磊 乌兰图雅 杨鸣箫 周 舒 朱荣刚 郑东晖

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 为了测量光学玻璃的全场应力延迟量,提出了一种基于移相算法和自准直光路系统的应力测量方案。测试光两次通过被测件使应力信息放大 1 倍。根据应力条纹图对比度选定移相步长,分析一组具有高对比度的移相应力条纹图实现方砖延迟量的全场分布测量。通过仿真得到该方法的测量精度达 0.2 nm/cm,测量结果显示退火方砖的中间区域应力延迟量为 3 nm/cm,边沿区域为 9 nm/cm。采用该方法,可以快速实现应力延迟量的全场高精度测量。

关键词 测量;光学测量;应力延迟量;移相算法;光学玻璃

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0612005

A Method Based on Phase Shifting Algorithm for Fast Measurement of Stress Retardation of Optical Glass

Li Jinpeng Chen Lei Wulan Tuya Yang Mingxiao Zhou Shu
Zhu Ronggang Zheng Donghui

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract In order to determine the stress retardation distribution of optical glass, a novel method based on phase shifting algorithm and autocollimation method is proposed. An enlargement of the retardation of specimen can be achieved because of the autocollimation architecture. The phase shift step is fixed on according to the contrast of stress fringe patterns. The stress retardation can be acquired by analyzing a set of phase shifting stress fringe patterns with high contrast. The simulated result shows an accuracy of 0.2 nm/cm. The experimental result indicates that the retardation in the central area of annealed glass cube is 3 nm/cm while in the edge area it is 9 nm/cm. Fast stress retardation measurement with high precision can be realized by this method.

Key words measurement; optical testing; stress retardation distribution; phase shifting algorithm; optical glass

OCIS codes 120.2650; 120.4800; 120.5050; 120.5410

1 引 言

众所周知,利用光学玻璃内应力表现出来的双折射效应可以实现光学材料的内应力测量。目前测量玻璃内应力的方案大致分为两类:1)基于 Babinet-Soleil 补偿装置^[1]以及 Senarmont 补偿装置^[2]的方案,典型的有 Hutsel 等^[3]的扫描光强最大值应力测量法和 Park 等^[4]的扫描光强最小值应力测量法。何勇等^[5]采用光电编码器控制检偏器旋转

实现了玻璃应力全场分布的测量。2)移相式应力测量法,其思想来源于光弹测量法^[6~11],学者们将该思想应用于玻璃应力测量当中,张丽君等^[12]旋转整个光学系统实现了应力条纹图的移相达到测量玻璃全场等倾角的目的,Ajovalasit 等^[13]将该方法应用到玻璃边沿内应力测量中。除了上述两种典型的测量方法,李志诚等^[14]根据分振幅斯托克斯参量测量原理设计了应力分布测量系统,同样实现了应力延

收稿日期: 2013-01-06; **收到修改稿日期:** 2013-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(61108041,U1231111)资助课题。

作者简介: 李金鹏(1985—),男,博士研究生,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: kingpenglee@yahoo.cn

导师简介: 陈 磊(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学测试技术方面的研究。

E-mail: chenlei@njust.edu.cn (通信联系人)

迟量测量。

本文提出了一种基于自准直光路结构的全场玻璃应力延迟量测量方案。该方案中光路两次经过待测件使得应力信息放大 1 倍；选择合适的移相步长使得应力条纹图对比度足够大（一般大于 0.8），得到移相应力条纹图，通过分析该组应力条纹图实现了光学玻璃应力延迟量分布的快速测量。

2 玻璃应力延迟量测量方法

玻璃应力测量方案如图 1 所示。起偏器的透振方向为 x 方向，检偏器的透振方向为 y 方向。激光依次经过的影响偏振态的器件为起偏器、1/4 波片

(QWP)、被测件，到达反射镜自准直返回再次经过被测件、QWP，最后从检偏器透射而出。也就是说，光路两次经过被测件，即所谓的“双通”光路结构，使得被测件的应力信息放大 1 倍。根据琼斯矢量推导，应力条纹图的光强函数表达式为

$$I = I_i \left[\sin 2\theta \cos \frac{2\pi\delta}{\lambda} + \sin 2(\alpha - \theta) \sin \frac{2\pi\delta}{\lambda} \right]^2, \quad (1)$$

式中 I_i 为入射到 QWP 的光强； θ 为 QWP 快轴与 x 轴的夹角； λ 为光波长； α 为方砖主应力方向与水平方向的夹角（简称等倾角）； δ 为待测应力延迟量。

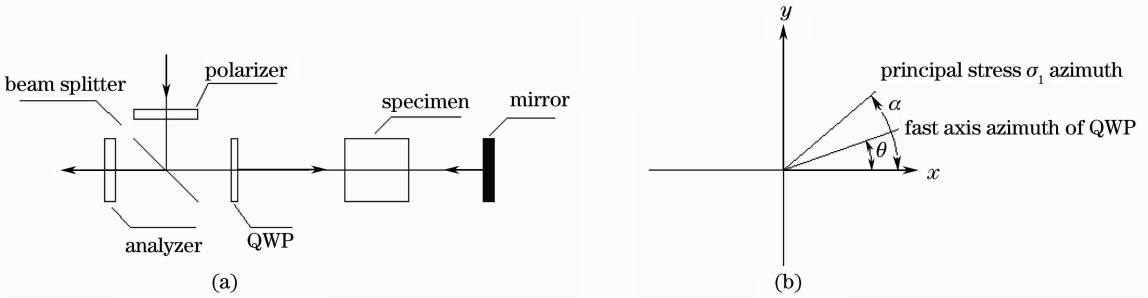


图 1 玻璃应力延迟量测量方案。(a)玻璃应力延迟量测量方案原理图；(b)波片光轴与待测材料光轴方向示意图

Fig.1 Method of measuring stress retardation. (a) Scheme of this method; (b) sketch of QWP and specimen's axes

连续旋转 QWP 并记录得到的应力条纹图，利用数字图像处理方法解算应力条纹图对比度信息。当应力条纹图对比度较大时（一般大于 0.8），记录对应的 QWP 快轴方位角 θ' ($\theta' \neq 0$)。

旋转 QWP 的方位角分别为 $-\theta'$, θ' , $-\theta' + \pi/2$, $\theta' + \pi/2$, 得到移相应力条纹图 $I_{-\theta'}$, $I_{\theta'}$, $I_{-\theta' + \pi/2}$, $I_{\theta' + \pi/2}$, 根据(1)式可写成

$$\begin{cases} I_{\theta'} = I_a + I_{b_1} + I_i \sin 4\theta' \sin 2(\alpha - \theta') \sin \frac{2\pi\delta}{\lambda} \cos \frac{2\pi\delta}{\lambda} \\ I_{-\theta'} = I_a + I_{b_2} - I_i \sin 4\theta' \sin 2(\alpha + \theta') \sin \frac{2\pi\delta}{\lambda} \cos \frac{2\pi\delta}{\lambda} \\ I_{\theta' + \pi/2} = I_a + I_{b_1} - I_i \sin 4\theta' \sin 2(\alpha - \theta') \sin \frac{2\pi\delta}{\lambda} \cos \frac{2\pi\delta}{\lambda} \\ I_{-\theta' + \pi/2} = I_a + I_{b_2} + I_i \sin 4\theta' \sin 2(\alpha + \theta') \sin \frac{2\pi\delta}{\lambda} \cos \frac{2\pi\delta}{\lambda} \end{cases}, \quad (2)$$

式中

$$\begin{aligned} I_a &= I_i \sin^2 2\theta' \cos^2 \frac{2\pi\delta}{\lambda}, \\ I_{b_1} &= I_i \sin^2 2(\alpha - \theta') \cos^2 2\theta \sin^2 \frac{2\pi\delta}{\lambda}, \\ I_{b_2} &= I_i \sin^2 2(\alpha + \theta') \cos^2 2\theta \sin^2 \frac{2\pi\delta}{\lambda}, \end{aligned} \quad (3)$$

等倾角可利用(2)式计算：

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{I_{\theta'} - I_{\theta' + \pi/2} + I_{-\theta' + \pi/2} - I_{-\theta'}}{I_{-\theta' + \pi/2} - I_{-\theta'} - I_{\theta'} + I_{\theta' + \pi/2}} \tan 2\theta' \right), \quad \sin \frac{4\pi\delta}{\lambda} \neq 0. \quad (4)$$

根据(2)、(4)两式可以引入参量 S：

$$S = \left[\frac{\sin 2\alpha}{\cos 2\theta'} (I_{\theta'} - I_{\theta'+\pi/2} + I_{-\theta'+\pi/2} - I_{-\theta'}) \right] + \left[\frac{\cos 2\alpha}{\sin 2\theta'} (I_{-\theta'+\pi/2} - I_{-\theta'} - I_{\theta'} + I_{\theta'+\pi/2}) \right] = 4I_i \sin 4\theta' \sin \frac{2\pi\delta}{\lambda} \cos \frac{2\pi\delta}{\lambda}, \quad (5)$$

式中 α 可由(4)式计算得到,若要求解延迟量 δ ,则需要知道入射光强 I_i 。旋转 QWP 方位角到 x 方向,应力条纹图可表示为

$$I_0 = I_i \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{2\pi\delta}{\lambda}. \quad (6)$$

将 $I_0 > t_h$ 的所有光强值单独取出,这一区域设为 area,其中 t_h 为大于 0 的阈值。此时满足在 area 内 $\sin \alpha \neq 0, \sin \frac{2\pi\delta}{\lambda} \neq 0$,可以先计算该区域内应力延迟量取值

$$\delta_{(\text{area})} = \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \left[\frac{4I_{0(\text{area})} \sin 4\theta'}{\sin^2 2\alpha_{(\text{area})} \cdot S_{(\text{area})}} \right], \quad (7)$$

进一步求得该区域内的入射光强取值

$$I_{i(\text{area})} = \frac{I_{0(\text{area})}}{\sin^2 2\alpha_{(\text{area})} \sin^2 \frac{2\pi\delta_{(\text{area})}}{\lambda}}, \quad (8)$$

对该区域内所有 I_i 值取均值,即 $I_i = \text{mean}[I_{i(\text{area})}]$ 。之后结合(5)、(8)式以及所求入射光强值可计算全场的应力延迟量分布

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi} \arcsin \left(\frac{S}{2I_i \sin 4\theta'} \right). \quad (9)$$

3 应力延迟量测量数值仿真

对于一个 K9 玻璃材料,尺寸为 $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ 的方砖,根据达纽舍夫斯基给出的光学玻璃应力理论公式^[15],给出应力延迟量分布如图 2(a)所示。在对起偏器、检偏器透射轴校准之后^[16],采用高质量的零级波片,其相位延迟精度可达 1° ,考虑 QWP 方位角校准误差^[17]存在的条件下分别写出代表起偏器、检偏器、QWP 和待测应力材料的琼斯矩阵,利用琼斯矢量理论推导得到经过这些器件后的琼斯矢量,(2)式中的 $\theta' = 8^\circ$,并考虑应力条纹图中包含高斯白噪声噪声,得到仿真应力条纹图如图 2(b)所示。利用本文所提方法求解得到的应力延迟量分布如图 2(c)所示。

比较图 2(a)与图 2(c)可知,所提方案求解的应力延迟量分布与理想光程延迟量分布一致,应力延

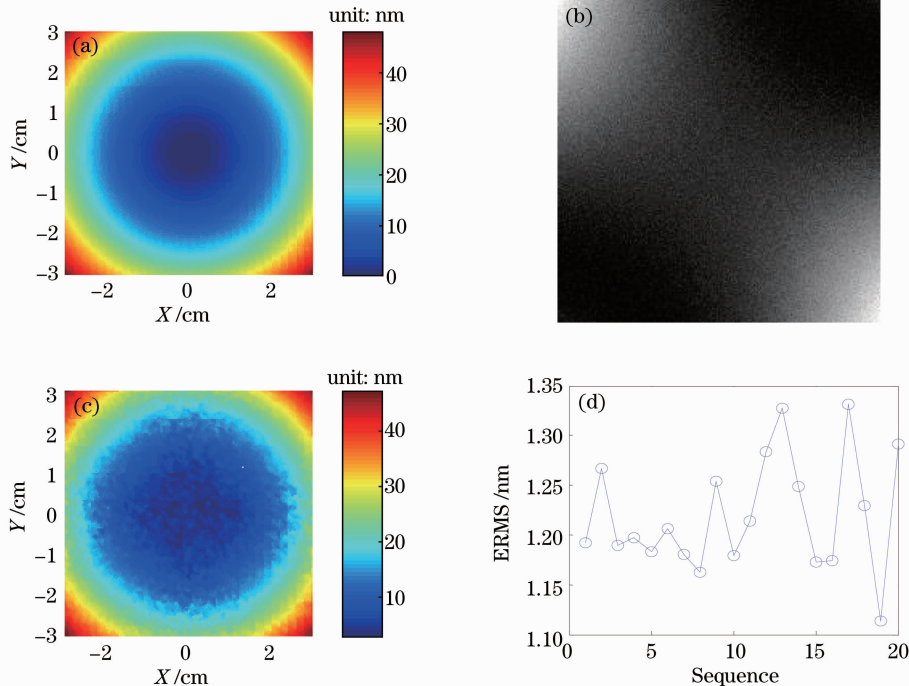


图 2 仿真结果。(a)理想应力延迟量分布;(b)仿真得到的其中一幅应力条纹图;(c)利用所提方案得到的延迟量分布;(d)仿真测量误差曲线

Fig. 2 Simulated result. (a) Standard stress retardation; (b) one of the simulated stress fringe patterns; (c) retardation derived by this method; (d) error of simulated measurement

迟量误差均方根(ERMS)取值为 1.18 nm。图 2(d) 给出的测量误差结果显示,经过 20 次测量其 ERMS 均值为 1.22 nm,对于一块 6 cm 的方砖其精度达到 0.2 nm/cm。因此,利用所提方案可以实现应力延迟量的高精度全场测量。

4 实验装置

实验装置图如图 3 所示。激光器采用 NEW FOCUS 6000 系列稳强激光器,中心波长为 632.8 nm。

实验开始前标定起偏器、检偏器的方向,使起偏器透振方向为 x 方向,而检偏器为 y 方向。将 QWP 安装在精密旋转架上并标定 QWP 光轴方向,该旋转台的精度为 0.1° ,保证了 QWP 的精密旋转。为了降低检测系统中光学元件的应力对测量的影响,系统中尽可能地避免使用透射型、厚度较大的光学元件,改用反射型、厚度小的光学元件,例如离轴抛物镜、薄膜分光镜等。被测件为 K9 玻璃材料制作的退火方砖,其尺寸为 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 。

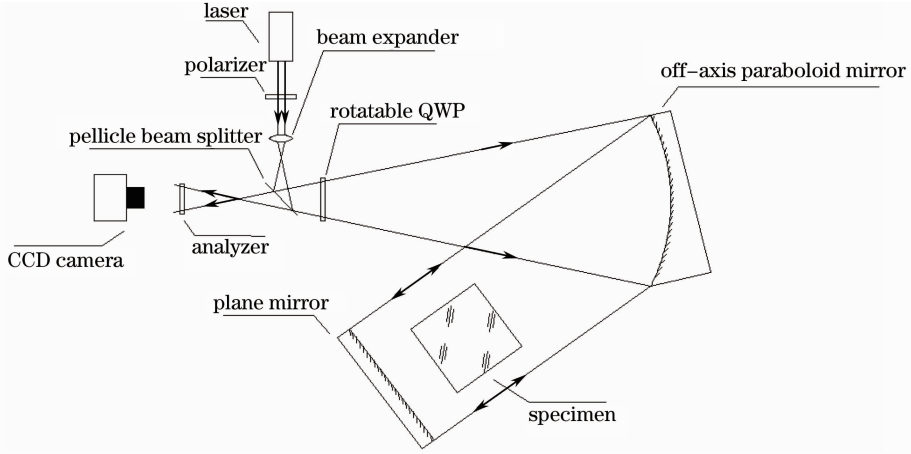


图 3 实验装置图
Fig. 3 Experimental setup

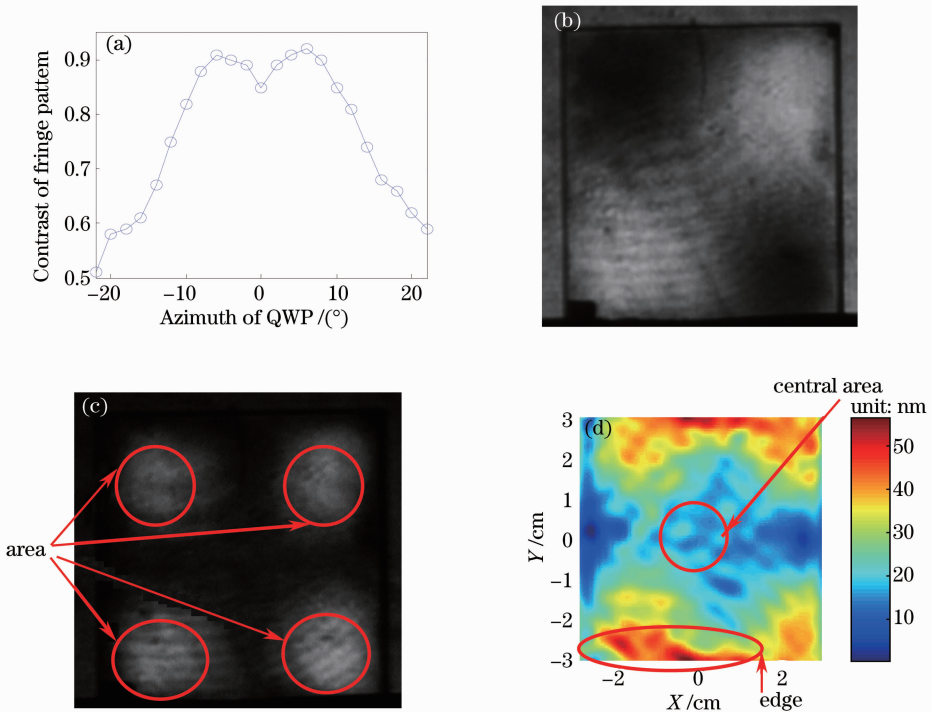


图 4 实验结果。(a)对比度曲线;(b)实验采集到的其中一幅应力条纹图;(c) $I_0 > t_h$ 区域示意;(d)应力延迟量分布
Fig. 4 Experimental result. (a) Contrast curve; (b) one of the experimental stress fringe patterns; (c) sketch of area $I_0 > t_h$; (d) retardation distribution

5 实验结果

连续旋转波片,并提取应力条纹图的对比度信息,其结果如图4(a)所示。根据对比度曲线,当 $\theta' = 8^\circ$ 时,对比度达到0.85满足测试要求,拍摄得到的其中一幅应力条纹图如图4(b)所示。为了测量入射光强 I_i ,将QWP快轴方向旋转到 x 方向,令阈值 t_h 等于0.2(图像中光强值已归一化),选取的区域在图4(c)中标示出来。利用(5)、(8)两式求解得到的方砖应力延迟量分布如图4(d)所示。

结果显示,方砖全场光程延迟量最小值为0.16 nm,最大值为57 nm。取中间 $\Phi 10$ mm区域,其均值为17 nm,即3 nm/cm;边缘区域延迟量较大,取最大的100个延迟量值,其均值为56 nm,即9 nm/cm。根据中华人民共和国无色玻璃材料标准(GB903-87),该退火方砖的中央应力等级达到1a级,边缘应力等级达到S3级。

6 结论

提出了一种基于移相算法,自准直光路结构的玻璃应力延迟量测量方案。仿真结果显示,该方法测量精度可达0.2 nm/cm,即可以实现应力延迟量的高精度测量。此外还对K9玻璃退火方砖实现了应力延迟量的实测,可以得到如下结论:

- 1) 由于采用“双通”光路结构,该系统可以将应力信息放大1倍,实现了应力延迟量的高精度测量;
- 2) 该系统在选定移相步长后,经过一次扫描能够确定应力延迟量全场分布,实现了应力延迟量的快速测量。

参 考 文 献

- 1 A. S. Redner, A. S. Voloshin. Surface and face stress in tempered glass [C]. Proceedings of 9th International Conference on Experimental Mechanics, 1990, **2**: 884~912
- 2 ASTM. Standard Test Method for Non-Destructive Photoelastic Measurement of Edge and Surface Stresses in Annealed, Heat-Strengthened, and Fully Tempered Flat Glass [S]. West Conshohocken: ASTM Standards, 2010
- 3 M. R. Hutsel, R. Ingle, T. K. Gaylord. Accurate cross-sectional stress profiling of optical fibers[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(26): 4985~4995
- 4 Y. Park, T. J. Ahn, T. H. Kim *et al.*. Measurement method for profiling the residual stress and the strain-optic coefficient of an optical fiber[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(1): 21~26

- 5 He Yong, Wang Pingting, Zhu Rihong *et al.*. Autotesting of optical glass stress [J]. *Glass & Enamel*, 2005, **33**(3): 40~43
- 何勇,王娉婷,朱日宏等. 光学玻璃应力的自动测试[J]. *玻璃与搪瓷*, 2005, **33**(3): 40~43
- 6 A. Asundi, L. Tong, C. G. Boay. Phase-shifting method with a normal polariscope[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(28): 5931~5935
- 7 P. Pinit, E. Umezaki. Digitally whole-field analysis of isoclinic parameter in photoelasticity by four-step color phase-shifting technique[J]. *Opt. & Lasers in Eng.*, 2007, **45**(7): 795~807
- 8 X. F. Yao, L. H. Jian, W. Xu *et al.*. Digital shifting photoelasticity with optical enlarged unwrapping technology for local stress measurement [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2005, **37**(7): 582~589
- 9 Lei Zhenkun, Yun Dazhen, Yu Wanming. Whole-field determination of isoclinic parameter by five-step color phase shifting and its error analysis[J]. *Opt. & Lasers in Eng.*, 2003, **40**(3): 189~200
- 10 Lei Zhenkun, Yun Dazhen, Kang Yilan. Five-step color phase-shifting technique in digital photo elasticity and its applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 162~167
- 雷振坤,云大真,亢一澜. 数字光弹性中五步彩色相移法及其应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 162~167
- 11 Ji Xinhua, Zhang Lina, Shi Lijun *et al.*. Whole-field phase of isochromatic angle and isoclinic line in digital photoelastic phase-shifting technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 273~278
- 计欣华,张丽娜,史丽军等. 数字光弹性相移法中全场等倾角和等差线相位[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 273~278
- 12 Zhang Lijun, Sha Dingguo, Nie Linqiu. Whole-field digital measurement of the stress isoclinic parameter of optical glass based on phase shifting [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(3): 199~203
- 张丽君,沙定国,裴林秋. 基于移相法的光学玻璃应力等倾角全场数字化测量[J]. *光学技术*, 2004, **30**(3): 199~203
- 13 A. Ajovalasit, G. Petrucci, M. Scafidì. Measurement of edge residual stresses in glass by the phase-shifting method [J]. *Opt. & Lasers in Eng.*, 2011, **49**(5): 652~657
- 14 Li Zhicheng, Tang Zhilie, Chen Ping *et al.*. Study of photoelastic stress distribution and imaging method based on Stokes parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0512005
- 李志诚,唐志列,陈萍等. 基于斯托克斯参量的光弹性应力分布及成像方法研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0512005
- 15 E. Ǻ. Danu Krzyzewski. Principles of Optical Glass Linear Annealing [M]. Zou De Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 1965
- E. Ǻ. 达组舍夫斯基. 光学玻璃线性退火原理[M]. 邹德译. 北京: 国防工业出版社, 1965
- 16 Wang Jianyu, Wu Jincai, He Zhiping. Device and Method of Calibrating the Light-Transmissive Axis of Polarizer [P]. China: CN102279094A, [2011-12-14]
- 王建宇,吴金才,何志平. 一种标定偏振片透光轴的装置及方法[P]. 中国: CN102279094A, [2011-12-14]
- 17 Yang Kun, Zeng Aijun, Wang Xiangzhao *et al.*. Fast axis calibration of quarter wave plate by fundamental component extinction [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1553~1556
- 杨坤,曾爱军,王向朝等. 基于基频分量消光的1/4波片快轴标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1553~1556