

文章编号: 0258-7025(2003)01-0068-03

采用激光外差干涉仪测量光学材料 光弹特性的研究

寇戈

(南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094)

摘要 将外差干涉用于给定光学材料的光弹特性测量领域, 提出了一种测定光弹性某些参数的新方法, 并研制了一套气压加载装置用以测量不同应力下的折射率变化情况, 通过实验给出了应力-折射率关系曲线, 并对实验结果进行了分析。该方法测试方便, 装置简单, 可通过很小应力(1~2个大气压)获得折射率变化与应力的关系, 折射率变化的测试精度可达 8.4×10^{-8} 。

关键词 材料科学; 光弹效应; 激光外差干涉术; 双折射晶体; 应力-光学常数

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Study of Photoelasticity of Optical Material by Using Laser Heterodyne Interferometer

KOU Ge

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

Abstract In this paper a new method of measuring some parameters of photoelasticity is presented, and the heterodyne interferometry has successfully been applied to the field of photoelasticity of selected optical materials. A device which brings atmosphere to bear on the optical materials has been developed to measure the change of refractive index at different pressures, and the relationship between the given pressure and the corresponding change of refractive index has been obtained through a series of experiments. Also, a careful analysis is given to the results of the experiments. The simple device and the easy method can make the last measuring precision of change of refractive index reach 8.4×10^{-8} with small stress applied.

Key words material science; photoelastic effect; laser heterodyne interferometry; birefringent crystal; stress-optic constant

1 引言

光弹性是光学材料的重要特性。在一定应力作用下, 光学材料的折射率会发生变化。折射率变化量与应力之间的关系, 以及该折射率变化是否会对光学系统的成像质量造成影响, 都是人们十分关注的问题。另一方面, 人们在制造各种偏转镜、激光辐射调制器和信息处理器件时, 需要寻找具有某些应力-光学特性的晶体和非晶体材料, 如何有效地进行

选择也是一个非常重要的问题。

材料的光弹性值可用来测定半成品中的机械—应力值, 计算某种机械载荷下的波面畸变, 但是如何定量测定光弹性、获得光弹性数值一直是困扰人们多年的一个难题。自 1816 年 Brewster 发现透明介质具有暂态双折射特性, 1842 年 Maxwell 建立光弹性学以来已有 100 多年了。这些年来, 人们一直试图用多种方法定量研究光弹性现象。但是, 所有这些方法均有某些限制, 比如说, 通过测试双折射的方

收稿日期: 2001-10-23; 收到修改稿日期: 2002-01-17

作者简介: 寇戈(1968—), 女, 南京理工大学电光学院副教授, 博士, 主要从事光学及信息处理相关研究。E-mail: kouge@mail.njust.edu.cn

法不能获得应力—光学常数的绝对值；计算玻璃光弹性的分析方法误差较大(10%左右)，并且对晶体和某些玻璃不合适，还有一种简化的方法则精度较低。现有的测试光弹系数的方法都基于光的超声衍射，且光弹系数的绝对值及其符号均无法获得。本文试图探讨一种简单且精确度更高的测量方法克服上述缺陷，并且获得了满意的测量结果。这种新方法采用激光外差干涉术定量研究光学材料光弹特性，并通过一系列实验获得光弹系数。激光外差干涉术是一种光电位相测量技术，它直接测量参考波面和被测波面的光程差，无需对条纹进行处理。该技术的位相测量精度高，且可用于动态光学现象。

2 测量原理

光弹效应是指在一定的应力作用下，介质折射率会发生改变的现象，此现象存在于一切透明介质中。由机械应力引起的光学材料主折射率的变化 Δn_i 为^[1~3]

$$\Delta n_i = -\frac{1}{2}n_0^3 P_{ij} S_j \quad (1)$$

式中 P_{ij} 为光弹系数， S_j 为应变，和应力分量 T_j 间存在着线性关系， n_0 为无应力时的材料折射率。

根据应力—光学定律，可得

$$\begin{cases} \Delta n_x = n_0 - n_{//} = \Delta n_{//} = C_1 T_x \\ \Delta n_y = \Delta n_z = n_0 - n_{\perp} = \Delta n_{\perp} = C_2 T_x \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\Delta n_{//}$ 和 Δn_{\perp} 分别是偏振光方向与应力轴平行及垂直时，应力 T_x 作用下折射率的变化。 C_1 和 C_2 为对应的应力—光学常数。应力—光学常数和光弹系数的关系如下

$$\begin{cases} C_1 = \left(-\frac{n^3}{2}\right) \cdot P_{11}/E \\ C_2 = \left(-\frac{n^3}{2}\right) \cdot P_{12}/E \end{cases} \quad (3)$$

式中 E 为弹性模量，对于给定的样品，若其横截面面积为 S ，加于其上的力为 F ，则应力—光学常数由下式给出

$$\begin{cases} C_1 = \frac{n_{//} - n_0}{F/S} \\ C_2 = \frac{n_{\perp} - n_0}{F/S} \end{cases} \quad (4)$$

如果测出应力加载前后折射率的变化(偏振光的振动方向分别与应力轴平行或垂直)，则光弹系数很容易由式(3)求出。折射率的变化可由干涉仪测量，对于 Δn 很小的情况，或需要应力连续变化以获

得折射率与应力间关系的情况，外差干涉仪是一种非常合适的测量仪器。

测试方法如下：首先，将被测材料做成立方体，并在以下两种情况下向该立方体的指定表面施加应力，使偏振光的振动方向：1) 垂直于应力轴；2) 平行于应力轴，获得应力施加前后光束通过被测材料的光程差。这样即可获得 $\Delta n_{//}$ 和 Δn_{\perp} ，由此可计算出光弹系数 P 。

$\Delta n_{//}$ 和 Δn_{\perp} 可通过示波器比较位相得到，应力施加前后光的位相变化如下

$$\begin{cases} \Delta\phi_{//} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot d \cdot \Delta n_{//} \\ \Delta\phi_{\perp} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot d \cdot \Delta n_{\perp} \end{cases} \quad (5)$$

式中 d 为光束通过的样品厚度。

由式(5)很容易得到本文用于测量的主要关系式

$$\begin{cases} \Delta n_{//} = \frac{\lambda}{2\pi d} \cdot \Delta\phi_{//} \\ \Delta n_{\perp} = \frac{\lambda}{2\pi d} \cdot \Delta\phi_{\perp} \end{cases} \quad (6)$$

3 实验装置

实验装置主要包含两部分：外差干涉仪和加载装置。

3.1 外差干涉仪^[4~6]

实验装置选择出射光为线偏振光的 He-Ne 激光器作为光源，调制光波长为 632.8 nm，两支相干光的频率差为 30 MHz，由超高频信号发生器 XG-22 驱动 Bragg 声光调制器实现。光路部分固定在金属防震台上，同时有隔声防震装置与外部隔离以减小干扰。

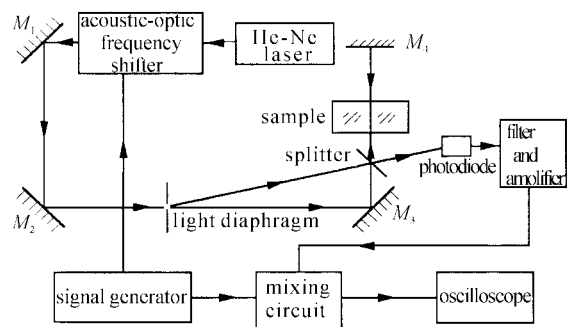


图 1 外差干涉装置示意图

Fig. 1 Heterodyne interferometer

3.2 加载装置

本实验中，加载装置是整个实验装置的重要组

成部分,直接影响实验精度。目前有很多不同的加载方法,比如,机械加载、气压加载、液体加载等等。通过比较,考虑到具体的实验条件,我们选择气压加载。因为实验所需应力为1~2 atm,在气压加载的范围内,可充分利用该方法的优点。

3.3 数据处理及结果

实验中发现当连续增加对测量样品载荷时,示波器显示信号向某一指定方向平行移动;当连续减小对测量样品载荷时,示波器显示信号向相反方向平行移动。数次重复实验证实:加载过程和去载过程是可逆的。

由图2和图3可知,测量样品上应力与折射率变化呈线性关系。图中的直线是由最小二乘法进行拟合的,其斜率分别为应力-光学常数 C_1 和 C_2 。由式(3)可计算出本实验中经多次测量下 P_{11} 和 P_{12} 的算术平均: $P_{11} = -0.8964, P_{12} = -2.082, P_{44} = (P_{11} - P_{12})/2 = 0.593$ 。式中 n 应与光源波长632.8 nm匹配,即 $n_{632.8 \text{ nm}} = 1.51466$ 。至此,我们得到了一定应力下玻璃材料的折射率变化曲线,同时计算出了玻璃的光弹系数。

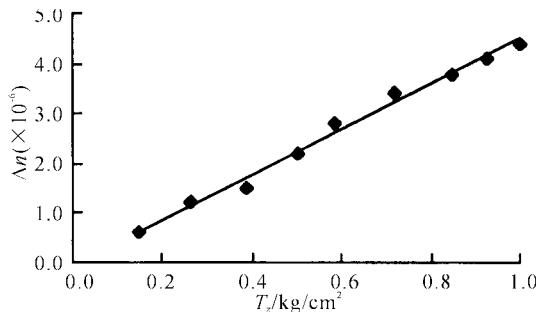


图2 偏振光振动方向与应力方向垂直时
 T_z - Δn 关系曲线

Fig. 2 Relationship of T_z - Δn when the vibration direction of polarized light is perpendicular to the stress axis

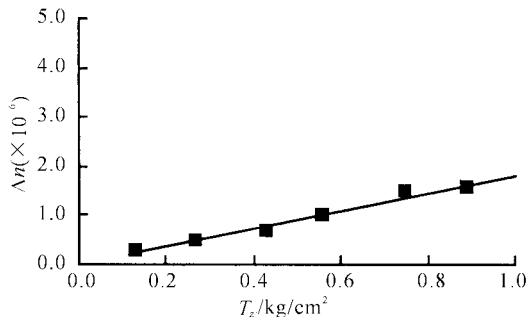


图3 偏振光振动方向与应力方向平行时 T_z - Δn 关系曲线
Fig. 3 Relationship of T_z - Δn when the vibration direction of polarized light is parallel with the stress axis

4 误差分析

理论上,实验的测量精度取决于示波器的读数精度,本实验中,示波器的最小位相分辨率 $\phi_{\min} = 2\pi/568$,因此读数精度为 $\pi/568$,对应于一个很小的光程变化0.56 nm。此时,所测样品的横向长度变化不可忽略。事实上所测 $\Delta\phi$ 包含两个部分:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}[\Delta n \cdot d + (n-1) \cdot \Delta d] \quad (7)$$

因此折射率变化可由下式得到

$$\Delta n = \left[\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta\phi - (n-1) \cdot \Delta d \right] / d \quad (8)$$

式中 Δd 为相应应力下横向长度的变化。

上式说明 Δn 的精度与 $\Delta\phi$ 和 Δd 的精度有关。对式(8)微分,可得

$$\Delta(\Delta n) = \left[\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta(\Delta\phi) - (n-1) \cdot \Delta(\Delta d) \right] / d \quad (9)$$

式中 $\Delta(\Delta n)$, $\Delta(\Delta\phi)$ 和 $\Delta(\Delta d)$ 分别为 Δn , $\Delta\phi$ 和 Δd 的测试精度。

由误差原理可知: $\Delta(\Delta\phi)$ 应为示波器精度的两倍,即 $\Delta(\Delta\phi) = 2\pi/568$, $\Delta(\Delta d)$ 是示波器精度的 $\lambda/2\pi m$ 倍。将 $\Delta(\Delta\phi)$ 和 $\Delta(\Delta d)$ 代入(9)式可得 Δn 的精度为 8.4×10^{-8} 。

5 结论

将外差干涉仪应用于光弹性领域,是一种研究光弹性的新方法。该法测试方便,装置简单,成本低廉,可得到很高的测试精度,并可通过很小应力(以往偏光应力仪均采用较大应力 $4 \sim 20 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$)获得折射率变化与应力的关系,由此定量研究应力对折射率的影响,测试结果可为光学设计提供依据。

参考文献

- 1 A. Kuske, G. Robertson. Photoelastic Stress Analysis [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1979 (in Chinese)
- 2 Sun Kang, Zhang Fuxue. Piezoelectricity [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1984 (in Chinese)
- 3 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics [M]. Beijing: Science Press, 1978 (in Chinese)
- 4 Dan Pantzer, Jacob Politch, E. K. Leif. Heterodyne profiling instrument for the angstrom region [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(22):4168~4172
- 5 C. P. Wang. Measuring 2-D laser-beam phase and intensity profiles: a new technique [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(9):1399~1402
- 6 Trolinger D. James. Ultrahigh resolution interferometry [C]. *SPIE*, 1996, **2861**:114~123