

文章编号：1003-501X(2002)03-0045-04

# 检测薄膜压电形变的双光束探测干涉仪的设计

黄 傲<sup>1</sup>, 施柏煊<sup>1</sup>, 陈王丽华<sup>2</sup>

(1. 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;  
2. 香港理工大学应用物理系, 香港)

**摘要：**为了检测压电薄膜的在电场作用下的微小形变，同时避免基底弯曲效应的影响，设计了一种双光束探测干涉仪，通过反馈控制和锁相检测技术，实现了高稳定性、高分辨力的目标，最小可探测形变可达到 0.001nm。系统采用计算机控制测量和数据处理，使测量更加便捷、准确。

**关键词：**双光束干涉仪；压电效应；弯曲效应；薄膜测量

中图分类号：TH744.3

文献标识码：A

## Design of Double-Beam Interferometer for Detecting Piezoelectric Strain of Thin Film

HUANG Ao<sup>1</sup>, SHI Bai-xuan<sup>1</sup>, CHEN Wang Li-hua<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027 China*; 2. *Department of Applied Physics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China*)

**Abstract:** In order to measure micro-strain of piezoelectric thin film under action of electric field and avoiding the impact of substrate bending effect, a double-beam interferometer is designed. The objective of high stability and high resolution is achieved through feedback control and phase-locking detection technique. The minimum detectable strain is as small as 0.001nm. With measurement and data processing are controlled by a computer, the system has the advantages of convenience, fast measurement speed and high accuracy.

**Key words:** Double beam interferometers; Piezoelectric effects; Bending effects; Thin film measurement

## 引 言

压电薄膜，作为具有压电效应的新型功能材料，其应用范围不断扩展。因此对其研究和压电特性的测量越来越深入，成为材料领域研究的一大热点。研究薄膜的压电性能，需要检测在电场作用下薄膜厚度的变化。光学检测方法具有灵敏度、分辨力高和非接触的优点，因此在压电效应检测中获得广泛应用。迈克尔逊干涉仪在块状压电材料的形变检测中很有效<sup>[1]</sup>，但是，在薄膜材料的检测中，基底弯曲效应的影响显著，这限制了迈克尔逊干涉仪在薄膜材料检测中的应用。如图 1 所示，薄膜在电场作用下发生形变时，产生的巨大拉力会拉动基底，使基底发生弯曲，这就是基底弯曲效应。因为这个效应，薄膜和基底近似形成一个“双压电晶片”。这样，在交变电场的作用下，用迈克尔逊干涉仪检测到的振幅实际是“双压电晶片”的振幅，它可能会比实际的压电形变大到一个数量级<sup>[2]</sup>。所以用迈克尔逊干涉仪检测薄膜材料的压电效应可能会带来很大误差。本文介绍的双光束探测干涉仪通过从前后两面探测样品，在光程上抵消基底弯曲效应；并采用计算机控制、反馈控制和锁相检测技术，实现了薄膜材料压电形变的精确测量，其装置已

收稿日期：2001-09-24；收到修改稿日期：2001-12-18

基金项目：香港特区政府创新科技基金资助（ITF AF147/98）资助

作者简介：黄 傲（1977—），男（汉族），安徽舒城人，硕士生，主要从事光电及智能仪器的研究，Email: [ahzju@sohu.com](mailto:ahzju@sohu.com)

在香港理工大学智能材料研究中心得到有效应用。

# 1 双光束探测干涉仪的原理

## 1.1 系统装置

双光束探测干涉仪的光路和电子装置如图 2 所示。激光器发出的线偏振光，经过光隔离器 ( Isolator )  $\lambda/2$  波片，到达偏振分束器  $PB_1$ 。在  $PB_1$ ，垂直于水平面振动的光分量被反射到  $PB_3$ ，形成参考光束；而平行于水平面振动的光分量透过  $PB_1$ ，并被透镜  $L_1$  聚焦，穿过  $\lambda/4$  波片，入射到样品表面，形成探测光束。探测光被样品表面反射后，再次穿过  $\lambda/4$  波片到达  $PB_1$ 。因为探测光两次经过  $\lambda/4$  波片，其偏振方向被旋转  $90^\circ$ ，垂直于水平方向振动，所以到达  $PB_1$  后它被  $PB_1$  反射，经过两个转折棱镜到达偏振分束器  $PB_2$ 。同理，探测光被  $PB_2$  反射，经  $L_2$  聚焦，透过  $\lambda/4$  波片，入射到样品的另一表面，入射点正对前一表面的入射点。探测光被样品再次反射后，也两次经过这一侧的  $\lambda/4$  波片，偏振方向被再次旋转  $90^\circ$ ，所以探测光可以穿过  $PB_2$ ，到达分束器  $BS_1$ 。参考光先被偏振分束器  $PB_3$  反射，经过一个  $\lambda/4$  波片，入射到固定在一个微位移器上的参考平面镜。参考光被参考平面镜反射后再一次经过  $\lambda/4$  波片，从而其偏振方向旋转  $90^\circ$ ，透过  $PB_3$ ，经一个棱镜转折后到达  $BS_1$ ，经过  $BS_1$ ，两束光汇合，产生干涉，干涉的光强被探测器转换成电信号。样品厚度的变化将引起干涉光强的变化，从而从干涉光强的变化中提取出样品厚度变化的信息。探测器的输出被接入反馈控制电路，实现锁定光程；同时也被接入锁相放大器，进行窄带滤波检测，从而提取出微小的厚度变化信息。

## 1.2 基底弯曲效应的消除

这种干涉仪因为探测光从前后两面探测样品而被称为双光束探测干涉仪。正是因为探测光从前后两面探测样品，从而抵消了弯曲效应带来的光程变化。如图 3 所示，当基底向上弯曲时，探测光在上表面的光程就会减少  $2L$ ，但是在下表面，探测光的光程会增加  $2L$ ，所以，探测光的总光程不因为基底的弯曲而变化。这就消除了基底的弯曲效应。同时，这样的光路布置，还可以提高光路抗干扰的能力，因为当外界的干扰使样品连同基底一起振动时，上下两面产生的光程变化也互相抵消，所以最终不会引起干涉光强的变化。

## 1.3 测量原理

设静态 ( 即样品无外加电场驱动 ) 时，探测光和参考光的光程差是  $2d_0$ ， $d_{ac}$  是样品厚度的微小变化， $I_p, I_r$  分别是探测光和参考光在干涉场的光强， $\lambda$  为光波长。则探测器处的干涉光强为

$$\begin{aligned}
 I &= I_p + I_r + 2\sqrt{I_p I_r} \cos[4\delta (d_0 + d_{ac})/\lambda] \\
 &= I_p + I_r + 2\sqrt{I_p I_r} \cos(4\delta d_0/\lambda) \cos(4\delta d_{ac}/\lambda) - 2\sqrt{I_p I_r} \sin(4\delta d_0/\lambda) \sin(4\delta d_{ac}/\lambda) \\
 &= I_p + I_r + 2\sqrt{I_p I_r} \cos(4\delta d_0/\lambda) - 2\sqrt{I_p I_r} \sin(4\delta d_0/\lambda) 4\delta d_{ac}/\lambda
 \end{aligned} \tag{1}$$

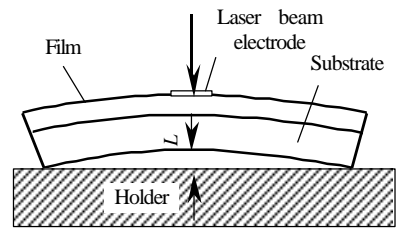


图 1 基底弯曲效应

Fig. 1 Bending effect of the substrate

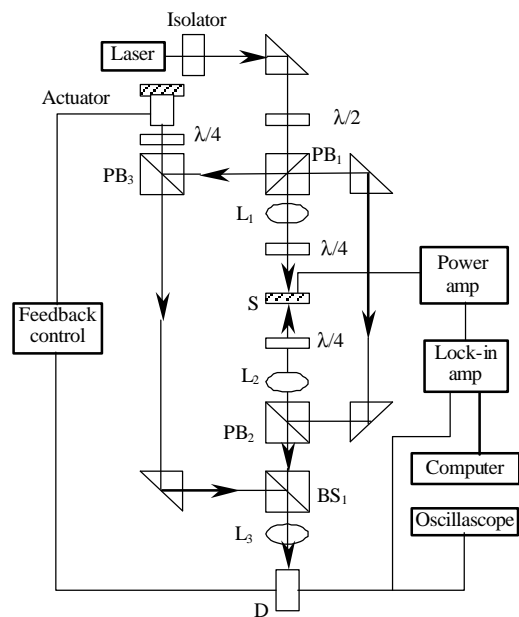


图 2 双光束探测干涉仪示意图

$PB_1 \sim PB_3$ ——偏振分束器； $L_1 \sim L_3$ ——透镜；S——样品；  
 $BS_1$ ——光分束器；D——探测器

Fig.2 Sketch for double-beam interferometer  
 $PB_1 \sim PB_3$ —Polarized beam splitter;  $L_1 \sim L_3$ — Lens;  
S:—Sample;  $BS_1$ :—Beam splitter; D:—Detector

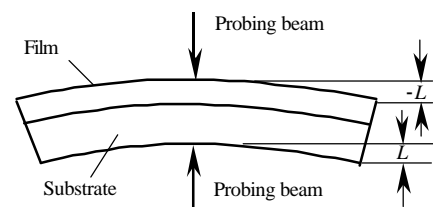


图 3 基底弯曲效应的消除

Fig.3 Elimination of bending effect of substrate

因为薄膜的压电形变  $d_{ac}$  极其微小, 所以 (1) 式的推导作了  $\cos(4\delta d_{ac}/I) = 1$  和  $\sin(4\delta d_{ac}/I) = 4\delta d_{ac}/I$  的近似。在  $|d_{ac}| < 1300\text{nm}$  时, 近似引起的误差不大于 1%<sup>[3]</sup>。

$$(1) \text{式可以分解为两项} \quad I_{dc} = I_p + I_r + 2\sqrt{I_p I_r} \cos(4\delta d_0/I) \quad (2)$$

$$I_{ac} = -2\sqrt{I_p I_r} \sin(4\delta d_0/I) 4\delta d_{ac}/I \quad (3)$$

样品在正弦交流信号驱动下,  $d_{ac} = d_{amp} \sin \omega t$ , 所以,  $I_{dc}$  是直流信号,  $I_{ac}$  是交流信号, 包含着被测信息, 利用锁相检测技术, 可得到  $d_{amp}$ 。从 (3) 式看, 为了得到最高的灵敏度, 必须

$$|\sin(4\delta d_0/I)| = 1 \quad (4)$$

$$\text{即} \quad d_0 = I(2n+1)/8 \quad (5)$$

$$\text{其中 } n \text{ 为整数。} d_0 \text{ 即系统具有最高灵敏度的工作点。这时} \quad I_{dc} = I_p + I_r \quad (6)$$

$$\text{另外, 干涉场光强 } I \text{ 的最大值和最小值分别是} \quad I_{max} = I_p + I_r + 2\sqrt{I_p I_r}, \quad I_{min} = I_p + I_r - 2\sqrt{I_p I_r} \quad (7)$$

$$\text{所以} \quad I_{dc} = (I_{max} + I_{min})/2 \quad (8)$$

利用反馈控制, 将  $I_{dc}$  锁定, 防止测量中工作点的漂移。

$$\text{因为} \quad I_{max} - I_{min} = 4\sqrt{I_p I_r}, \quad \text{所以探测器的交流输出为} \quad V_{ac} = 2\delta' I \cdot V_{pp} d_{amp} \sin \omega t \quad (9)$$

$V_{pp}$  是干涉信号的峰峰电压值, 对应于  $I_{max} - I_{min}$ 。利用锁相放大器检测微小信号时的输出  $V_{out}$  是信号的有效值, 所以

$$d_{amp} = I \cdot V_{out} / \sqrt{2} \delta V_{pp} \quad (10)$$

$V_{pp}$  在测量前定标得到, 这就可以检测出样品厚度振动的振幅。

## 2 设计考虑

### 2.1 光路布置

光路应尽量紧凑布置, 同时使参考光和探测光光程差尽量小。在激光器前我们使用一个由法拉第旋光器构成的光隔离器(见图1), 有效阻止光路中的反射光进入激光器而使激光输出不稳定。因为有了隔离器, 光路中的所有入射都可以按正入射来布置, 提高了光路的精度。光路中的  $\lambda/2$  波片用来旋转入射激光的偏振方向, 调整探测光和参考光的相对强度, 使两束光在干涉时的光强基本相等, 从而得到最高的对比度。在样品两侧, 探测光都是先经过透镜再透过  $\lambda/4$  波片的, 这样透镜表面的反射光就不会经过  $\lambda/4$  波片, 从而使透镜表面的反射光最终折回隔离器, 而不会到达  $BS_1$  参与干涉。实验表明, 如果将样品两侧的  $\lambda/4$  波片和透镜位置对换, 则透镜表面的反射光参与干涉, 使干涉光强很不稳定。

### 2.2 反馈控制

反馈电路应该只对工作点的低频漂移有响应, 对工作点的低频漂移起补偿作用。被测信号处于相对较高的频率, 反馈电路中设有低通滤波, 以保证被测信号不被补偿掉。我们设计的反馈系统带宽 10Hz, 而被测信号是 1kHz 以上。测量前设置反馈电路的参考电压, 以设定工作点。

### 2.3 样品的测量

测量前要先对系统定标, 这可以通过给驱动参考平面镜的微位移器加三角波驱动信号来实现。只要使微位移器驱动参考镜移动半个波长以上, 就可以在示波器上得到完整的正弦波。正弦波的中线就是工作点电压, 将反馈电路的参考电压调整到这个电压, 就可以锁定工作点。锁相放大器可以输出交流、直流驱动信号, 经过功率放大驱动样品(对于很多薄膜材料, 可以直接驱动, 不用放大)。这样, 可以用计算机控制锁相放大器发出驱动信号, 再从锁相放大器读取测量信号, 进行数据处理, 从而实现自动测量。

## 3 实验结果

用一石英样品进行了实验, 定标波形如图4(示波器照片)。三角波2是给推动参考镜的微位移器加的驱动信号, 波形1是

