

文章编号: 1001-4888(2023)05-0541-08

柔性膜基结构的应力光学系数测量研究^{*}

邢文辉¹, 武智朋², 孙鑫¹, 王志勇¹

(1. 天津大学 机械工程学院力学系, 天津 300350; 2. 中国科学院 光电技术研究所, 四川成都 610041)

摘要: 柔性膜基结构具有轻质化、可折叠、便携等优点, 在微机电和柔性电子等前沿领域有广阔的应用前景。相比于传统的刚性结构, 柔性膜基结构在制备和随后服役的过程中更容易产生内应力, 造成元器件稳定的降低, 因此膜基结构的应力测量具有非常重要的意义。本文基于光弹性原理, 设计搭建了圆偏振光场下的光弹性实验光路, 分别测得了基底和膜基结构在不同应力下的光弹性图像。根据光弹性图像随应力的周期性亮暗变化规律, 对图像亮度与所受应力大小进行三角函数拟合, 通过拟合结果和所建立的图像亮度与主应力模型对聚酰亚胺基底和金属铜薄膜的应力光学系数进行计算, 结果证明了金属铜薄膜具有应力光学效应以及通过透射的方法测量纳米级金属薄膜应力光学系数的可行性。

关键词: 膜基结构; 光弹性; 应力光学系数; 内应力

中图分类号: O347; O43 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-247

0 引言

膜基结构因具有优越的机械性能、力学性能和电磁学性能而在柔性电子^[1-5]和生物医学工程^[6]中得到广泛应用。但是在膜基结构加工制备的过程中, 因镀膜与基底热膨胀系数不同或晶格缺陷等原因会产生残余应力^[7-8], 并且柔性电子产品在使用过程中频繁发生的弯曲、扭转、拉伸、压缩等各种变形, 都有可能造成膜基结构起泡、分层、裂纹等损伤^[9-10]。不论是制造过程中的残余应力, 还是使用过程中因拉伸、压缩产生的损伤都会影响柔性电子产品的使用寿命, 因此, 发展能够精确测量柔性基底上镀膜机械性能的方法^[11], 对提高膜基结构制备质量和延长元器件使用寿命具有重要意义。

目前, 多数研究人员是通过测量基底或薄膜的变形再由弹性力学相关知识推导出薄膜应力的, 这种方法对于柔性膜基结构容易发生的蠕变、屈服、塑性变形和断裂等复杂力学行为的表征十分困难, 因此, 研究人员又逐渐发展了很多用于膜基结构应力测量的方法, 主要有: 基底曲率法^[12]、纳米压痕法^[13-14]、拉曼光谱法^[15]和 X 射线衍射法^[16]等。尽管这些方法都可以用于膜基结构的应力测量, 有着各自的适用范围, 但其中的大多数是对膜基结构残余应力的测量, 无法对膜基结构应力进行实时测量。

随着光弹性理论及实验方法的成熟, 光弹性法也越来越多地被应用于应力表征。2004 年, He 等^[17]使用一种带条纹倍增器的红外残余应力显微镜, 测量了单晶硅样品的面内残余应力, 并对各向异性应力-光学系数进行了实验标定。2005 年, Sasaki 等^[18]使用光弹性法研究了裂纹、空洞和夹杂物对裂纹产生的影响和相互干扰。2019 年, Su 等^[19]基于光弹性理论研制了一种用于测定硅片应力的专用显微镜, 并评估了硅片上应力分布随热循环的变化。目前学者们普遍认为光无法穿透金属, 所以大多数学

^{*} 收稿日期: 2022-10-04; 修回日期: 2022-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(12041201)

通信作者: 王志勇(1980-), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 数字图像相关方法, 太赫兹波的应力测量原理与方法。Email: zywang@tju.edu.cn

者通过光弹性贴片这种反射式的方法测量金属的变形,反射式的测量方法无法对试件的内部应力进行表征,但是,对于膜基结构来说,由于其金属镀层的厚度为微纳米数量级,十分有利于用透射的方法对内部应力进行测量。

虽然膜基结构在工作过程中有较为复杂的受力状态,但是因为膜基结构的长宽一般都比厚度大很多,所以拉伸是其工作过程中最常见的受力状态,因此本文主要研究单向拉伸状态下膜基结构的内部应力状态。本文首先基于光弹性原理搭建了一套用于测量纳米级金属薄膜结构的光弹性实验光路,该光路可以通过透射的方式测得纳米级金属薄膜的光弹性图像;然后建立了图像亮度与主应力间的光强模型。光路和所建立的模型不仅可以实现膜基结构应力光学系数的测量,还能将基底与薄膜的应力光学系数分离,从而为膜基结构应力测量和分离提供理论和实验基础。

1 光弹性实验光路的搭建

1.1 光弹性实验原理

各向同性的非晶体材料如环氧树脂、塑料、有机玻璃等在受到外加载荷的作用时,会像晶体一样表现出光学各向异性,产生双折射现象,载荷消失后双折射现象同时消失,这种现象被称为暂时双折射效应,光弹性实验的基础就是暂时双折射效应。具有暂时双折射效应的材料在受到载荷时产生的内应力与折射率存在一定关系,在1852年,麦克斯韦(Maxwell)建立了描述这种关系的方程式:

$$\begin{cases} n_1 - n_0 = C_1 \sigma_1 + C_2 (\sigma_2 + \sigma_3) \\ n_2 - n_0 = C_1 \sigma_2 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_3) \\ n_3 - n_0 = C_1 \sigma_3 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: n_0 为无应力状态下材料的折射率; n_1 、 n_2 、 n_3 分别为沿着主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 方向材料的折射率; C_1 和 C_2 为实验所要测量的绝对应力光学系数。

当试件处于平面应力状态时,一束平面偏振光通过试件后将会沿主应力方向分解为两束振动方向相互垂直的平面偏振光,由于两束平面偏振光在试件中的传播速度不同,所以会产生相位差。在平面应力状态下 $\sigma_3=0$,用式(1)中的第一式减去第二式就得到了平面应力状态下折射率改变与主应力的关系:

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

如果试件的厚度为 d ,则通过模型后两束偏振光的光程差 R 为

$$R = (n_1 - n_2)d \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得

$$R = (C_1 - C_2)d(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (4)$$

根据光程差可以求得相位差 δ 为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}Cd(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (5)$$

式中: λ 为光的波长; $C=C_1-C_2$ 为光弹性材料的绝对应力光学系数。

光弹性实验光路分为平面偏振光场光路和圆偏振光场光路,圆偏振光场光路可以消去等倾线,得到仅包含与主应力有关的等差线的光弹性图像,为方便后续处理,本文实验使用圆偏振光场。

圆偏振光暗场光路如图1所示,试件放于两 $1/4$ 波片之间,起偏镜偏振方向 P 与检偏镜偏振方向 A 相互垂直,形成暗场光路; $1/4$ 波片的快轴 F 与慢轴 S 则与偏振镜的偏振方向成 45° 夹角,可实现线偏振光与圆偏振光之间的转换。当试件受到载荷时,两束偏振光产生明显的相位差,在屏幕上显现出黑白条纹,而且载荷越大,条纹越密集。用琼斯向量和琼斯矩阵可表示出一系列光学元件组成的光学系统的出射光强。对于圆偏振暗场用样品的琼斯矩阵 J_0 、波片与偏振镜的偏振方向在 45° 和 -45° 下的琼斯矩阵 Q_{45° 以及 Q_{-45° 、偏振镜的琼斯矩阵 P_0 来表示到达屏幕的光强 I :

$$E = P_0 Q_{45^\circ} J_0 Q_{-45^\circ} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\delta} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$I = \mathbf{E}^* \cdot \mathbf{E} = \sin^2 \frac{\delta}{2} \tag{7}$$

式中： \mathbf{E} 为透过检偏器的光的琼斯矩阵； θ 为主应力方向与水平轴的夹角； δ 为偏振光在 σ_1 和 σ_2 方向上的相位差，当 $\delta=90^\circ$ 时， e^{\otimes} 可表示为 i 。

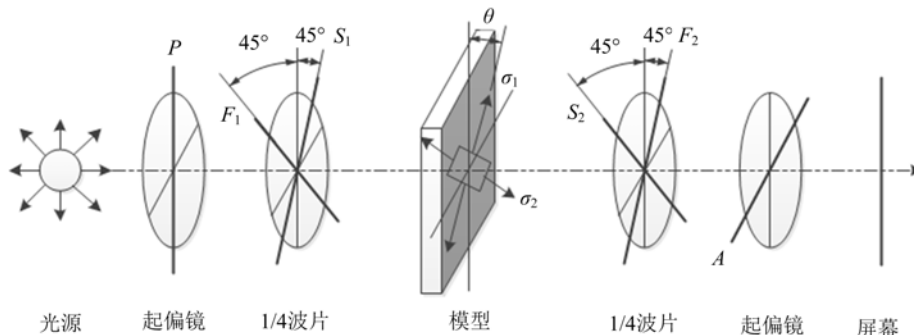


图 1 圆偏振光暗场光路原理图

Fig.1 Schematic diagram of circularly polarized optical path dark field

当 $\sin \frac{\delta}{2} = 0$ 时， $I=0$ ，会在屏幕上形成黑色条纹，即此时 $\frac{\delta}{2} = n\pi$ ， $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。这类光强

为零的点形成的轨迹特点就是主应力差相等，即为等差线，所以通过六步相移法和解包裹法对图像采集系统得到的干涉条纹图像进行处理，得到相位差 δ 后，便可根据光弹性实验原理对试件的内部应力场进行探究。

1.2 光弹性实验光路设计

光测弹性仪又叫偏光弹性仪，是光弹性实验的基本设备。本实验所用的透射式圆偏振光弹性实验光路由光源、偏振镜、1/4 波片和相机组成，如图 2 所示。

实验选用的激光器为氩氖激光器，激光波长为 532nm，激光器发出的光经过起偏镜后变为平面偏振光，平面偏振光经过第一个 1/4 波片变为圆偏振光，圆偏振光穿过试件后，由第二个 1/4 波片抵消掉之前由平面偏振光变为圆偏振光导致的相位差，再通过检偏镜检测出射光的偏振态，最后在白屏上成像，并由 CCD 相机记录下来。当起偏镜与检偏镜垂直时为暗场，平行时为明场，本文实验是在暗场下进行的。



图 2 圆偏振光光路实物示意图

Fig.2 Diagram of circularly polarized light path

2 膜基结构的制备与应力光学系数的测量

2.1 实验试件的制备

聚酰亚胺 (polyimide, PI) 具有优异的热稳定性和机械性能，而且耐化学腐蚀，是柔性电子中应用最广泛的柔性基底。常用的有均苯型和联苯型，本文实验中选用均苯型聚酰亚胺薄膜作为基底材料，其力学参数见表 1。

表 1 实验采用的聚酰亚胺薄膜的力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of polyimide film used in the experiment

泊松比	弹性模量/GPa	折射率	厚度/mm
0.37	2.914	1.695	0.125

金属铜具有很好的延展性，在拉伸过程中线弹性范围较广，而且在电子产品中使用较为广泛，因此

本文实验选用铜作为镀膜材料,其力学参数见表2。

表2 实验采用的铜薄膜的力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of Cu film used in the experiment

泊松比	弹性模量/GPa	折射率	厚度/nm
0.37	80	0.80	100

磁控溅射与其他镀膜方式相比,具有成膜均匀、薄膜密度高和膜基结合力强等优点,所以本文实验采用磁控溅射的方式制备试件。为了观察薄膜边界同时避免圣维南现象,将聚酰亚胺基底做成了哑铃型,以增加拉伸过程中的稳定性,并将镀膜区域集中在基底的中心位置。实验中采用类似掩膜法的镀膜方式,做了两个相同的哑铃型基底,在其中一个上用激光打标机做出如图3(a)所示的中心带有边长为4mm的正方形镂空。镀膜时将这个基底黏在另一个完整的基底上方,镀膜完成后就可得到如图3(b)所示的中间位置镀有边长为4mm正方形铜膜的试件。

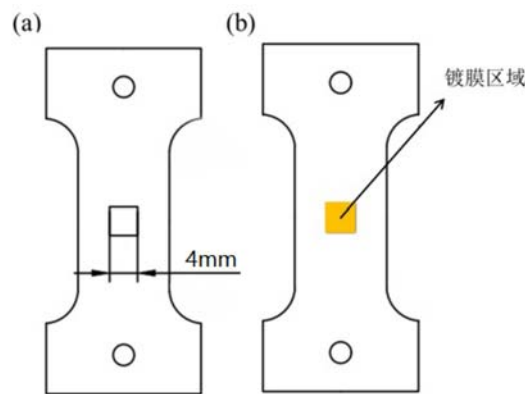


图3 试件示意图:(a)聚酰亚胺基底;(b)膜基结构

Fig. 3 Sketch map of specimen: (a) polyimide substrate; (b) film-substrate structure

2.2 膜基结构应力光学系数的测量理论

由光弹性实验原理可知,想要求得膜基结构的内部应力,需要测量试件的应力光学系数 C 和光弹性条纹的相位差 δ 。光弹性条纹相位差 δ 可以通过对 CCD 获得的干涉条纹图像进行六步相移和解包裹求得,而应力光学系数 C 则需要由实验中所研究的膜基结构设计光弹性实验得到,本节是对其测量原理的介绍。

应力光学系数 C 是与试件材料性质有关的参数,材料的条纹值 f_σ 为

$$f_\sigma = \frac{\lambda}{C} \quad (8)$$

条纹值是光弹性材料的一个基本性能参数,与试件的尺寸、形状和受力形式无关,只与材料的应力光学系数 C 和所用探测光的波长 λ 有关。条纹值表示单位厚度试件产生一级条纹所需的主应力差值,而产生一级条纹则表示相位走过了一个周期,由式(6)可以知道光弹性图像的亮度与条纹的相位有三角函数关系,因此,图像亮度的变化直接反映了相位场的变化。图像经历一次由明到暗再由暗到明或者相反的过程,意味着光弹性条纹的相位变换了一个周期。条纹的级次与主应力的的大小直接相关,因此便可以建立图像亮度与主应力之间的关系。由于 $\sigma_2 = 0$,将式(5)代入式(7)可以得到图像亮度(也就是光强)与主应力之间的关系,图像亮度 I 可由主应力表示为

$$I = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} C_s d_s \sigma_1 \right] \quad (9)$$

式中: C_s 为基底的应力光学系数; d_s 为基底的厚度。

膜基结构中,金属薄膜与基底的厚度相差很大,可以假设在施加拉伸载荷的过程中薄膜完全跟随基底进行拉伸,由此可以得出

$$\frac{\sigma_1^s}{E_s} = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (10)$$

式中： σ_i 为基底的主应力； σ_f 为镀膜的主应力； E_s 为基底的弹性模量； E_f 为镀膜的弹性模量。

薄膜主应力与弹性模量的比值和基底主应力与弹性模量的比值相等，采用与计算基底图像亮度和主应力之间的关系相同的计算方法，可以得到膜基结构光弹性图像亮度与主应力之间的关系：

$$I = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} C_s d_s \sigma_i + \frac{\pi}{\lambda} C_f d_f \sigma_i \frac{E_f}{E_s} \right) \quad (11)$$

式中： C_f 为镀膜的应力光学系数； d_f 为镀膜的厚度。

2.3 膜基结构应力光学系数的测量实验

实验试件所镀的铜薄膜厚度仅为百纳米级别，因此光可透过试件，实验过程中将不镀膜和镀 100nm 厚铜薄膜的试件分别放入透射式的暗场圆偏振光的光弹性实验光路中，使用拉伸装置对试件施加单向拉伸载荷。加载前段，力的加载过程并不是很稳定，实验开始前先给试件施加一个初载，选用初载后的一段加载范围内的数据作为实验数据，因初载并不影响图像亮度的周期性变化，所以将初载记为应力为 0 的初始点。用加载装置对试件继续进行单向拉伸，载荷从初载开始逐步增大。加载的同时用 CCD 相机记录下两个试件在每一步载荷后的光弹性图像，如图 4 和图 5 所示，分别记录下光弹性图像亮暗变化 3 次所对应的 9 个拉伸载荷下的条纹图像。

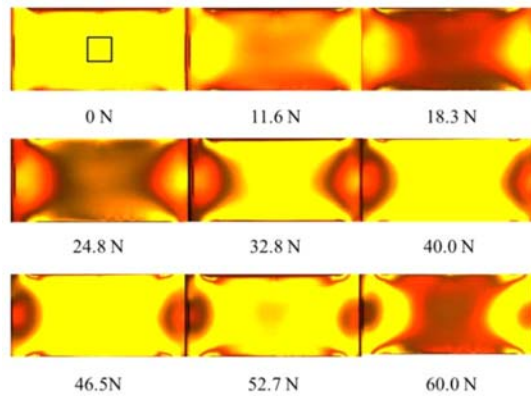


图 4 不同载荷下基底的图像

Fig. 4 Image of substrate under different loads

选择试件中心带有镀膜的区域(图 4 中第一张图方框内所示的区域)作为分析区域，并视此区域为应力均匀区域。从图 4 和图 5 中可以看出，随着拉伸载荷的增大，无论是基底还是膜基结构，都经历着由明到暗又由暗到明的变化，说明了两者的都具有应力光学效应。

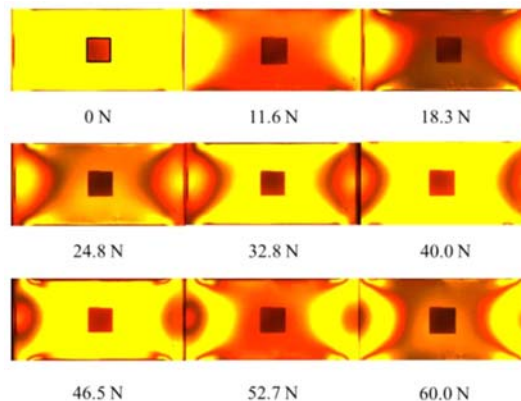


图 5 不同载荷下膜基结构的图像

Fig. 5 Image of film-substrate structures under different loads

为了更加准确地找出图像亮度与应力之间的关系，分别在基底与膜基结构中间选定的 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 区域(图 5 中黑框区域)内选取若干点，计算出平均灰度值表示均匀受力区的平均亮度。当载荷增大或减小过程中的步长足够小、采集到的条纹图足够多时，便可得到不同载荷下试件亮度与载荷的关系，同

时对试件所受载荷与图像亮度进行三角函数拟合。因应力光学系数只与拟合曲线的周期有关,为了便于数据处理及简化模型,直接使用灰度值作为拟合曲线的纵坐标,分别得到基底与膜基结构在单向拉伸状态下的应力与条纹灰度图的拟合曲线如图6、图7所示。

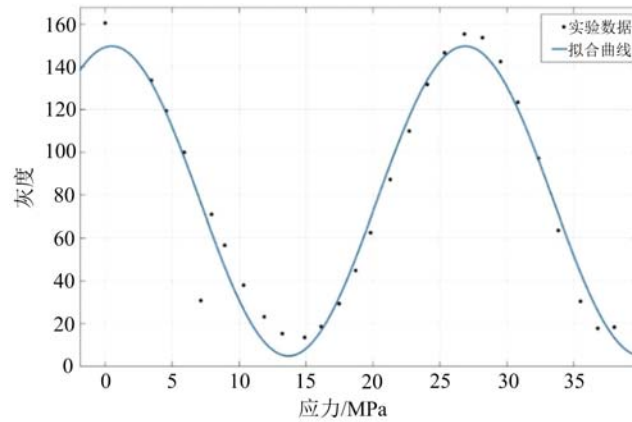


图6 基底应力和灰度的拟合曲线

Fig. 6 The fitting curve of stress and grayscale of substrate

图6中基底拟合曲线的表达式为 $I(\sigma_1) = 77.32 + 71.88\cos(\omega_1\sigma_1) + 8.345\sin(\omega_1\sigma_1)$, 由图6可以看出实验数据基本散落在拟合曲线的周围, 两者的匹配度较好, 符合三角函数变化规律, 从而证实了拉伸过程中图像亮度与应力间的三角函数关系, 式中 ω_1 为 0.2379。为了得到基底曲线周期性的度量参数, 将基底拟合曲线表达式代入式(8)得到

$$C_s = \frac{\lambda\omega_1}{2\pi d_s} \quad (12)$$

由式(12)便可求得聚酰亚胺基底的应力光学系数 C_s 为 $1.784 \times 10^{-10} \text{MPa}^{-1}$ 。

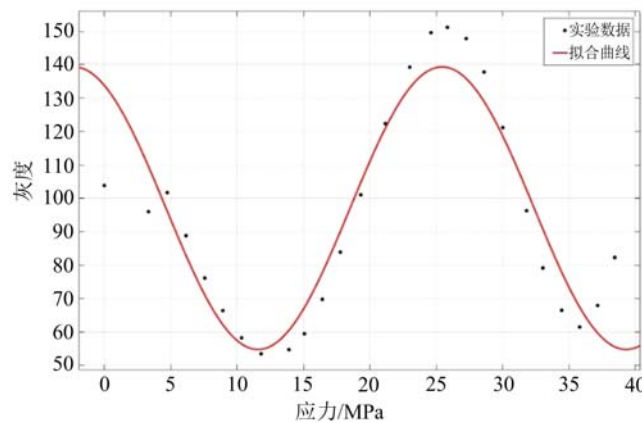


图7 膜基结构应力和灰度的拟合曲线

Fig. 7 The fitting curve of stress and grayscale of film-substrate structures

图7中膜基结构拟合曲线的表达式为 $I(\sigma_1) = 97.06 + 36.74\cos(\omega_2\sigma_1) - 20.97\sin(\omega_2\sigma_1)$, 同样符合三角函数关系, 因此也证明拉伸过程中膜基结构与应力为三角函数关系, 式中 ω_2 为 0.2265。为求出膜基结构拟合曲线的周期性度量参数, 将式(12)代入式(11)可得

$$C_f = \frac{\lambda(\omega_2 - \omega_1)E_s}{2\pi d_f E_f} \quad (13)$$

由式(13)可以求得铜薄膜的应力光学系数 C_f 为 $-3.893 \times 10^{-10} \text{MPa}^{-1}$ 。

通过分别求出的聚酰亚胺基底和所镀铜膜的应力光学系数可以看出, 与传统的光弹性材料不同, 铜膜的应力光学系数为负数, 说明随着应力的增大, 铜膜的应力光学效应在减弱, 即随着应力的增大, 铜膜的折射率改变量在减小。铜膜应力光学系数的测量不仅证明了通过透射的方法测量金属薄膜内应力具

有可行性,还对研究纳米级金属铜膜应力与折射率之间的关系具有参考意义。

3 结论

本文基于光弹性理论,搭建了暗场下的光弹性实验光路,使用磁控溅射的方法,制作出了镀有金属铜的膜基结构。基于光弹性图像亮度与条纹相位间的三角函数关系,建立了膜基结构图像亮度与主应力之间的光强模型。膜基结构的光弹性实验结果显示,在拉伸过程中基底和膜基结构的光弹性图像亮度随外加载荷的增大具有周期性变化的规律,证明了金属铜具有应力光学效应;对实验中得到的基底和膜基结构在不同荷载下的图像亮度与荷载进行三角函数拟合,求出拟合曲线的周期性度量参数 ω ,将 ω 代入到所建立的光强模型中,分别计算出聚酰亚胺基底和金属铜镀膜的应力光学系数,可实现膜基结构的应力光学系数分离。随着光弹性仪的不断发展以及柔性膜基结构应力表征方法的不断完善,相信光弹性方法可以成为研究膜基结构应力的有效方法。

参考文献:

- [1] Takahashi K, Ishii R, Nakamura T, et al. Flexible electronic substrate film fabricated using natural clay and wood components with cross-linking polymer [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(17):1606512.
- [2] Fujikake H, Sato H, Murashige T. Polymer-stabilized ferroelectric liquid crystal for flexible displays [J]. *Displays*, 2004, 25(1):3-8.
- [3] Gelinck G H, Huitema H E A, Van Veenendaal E, et al. Flexible active-matrix displays and shift registers based on solution-processed organic transistors [J]. *Nature Materials*, 2004, 3(2):106-110.
- [4] Chortos A, Liu J, Bao Z. Pursuing prosthetic electronic skin [J]. *Nature Materials*, 2016, 15(9):937-950.
- [5] Chen Y, Au J, Kazlas P, et al. Flexible active-matrix electronic ink display [J]. *Nature*, 2003, 423:136-137.
- [6] Cerda E. Mechanics of scars [J]. *Journal of Biomechanics*, 2005, 38(8):1598-1603.
- [7] Floro J A, Kotula P G, Seel S C, et al. Origins of growth stresses in amorphous semiconductor thin films [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(9):096101.
- [8] Xie J, Komvopoulos K. Friction, nanostructure, and residual stress of single-layer and multi-layer amorphous carbon films deposited by radio-frequency sputtering [J]. *Journal of Materials Research*, 2016, 31(13):1857-1864.
- [9] Marcombe R, Cai S, Hong W, et al. A theory of constrained swelling of a pH-sensitive hydrogel [J]. *Soft Matter*, 2010, 6(4):784-793.
- [10] 蒋钊, 陈学康. 薄膜的应力控制技术研究现状[J]. *真空科学与技术学报*, 2008(增刊1):17-21 (JIANG Zhao, CHEN Xuekang. Stress release and control of thin films materials used in devices fabrication[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2008(S1):17-21 (in Chinese))
- [11] Gunda M, Kumar P, Katiyar M. Review of mechanical characterization techniques for thin films used in flexible electronics [J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2017, 42(2):129-152.
- [12] Chason E, Guduru P R. Tutorial: understanding residual stress in polycrystalline thin films through real-time measurements and physical models [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(19):1032-1114.
- [13] 董美伶, 金国, 王海斗, 等. 纳米压痕法测量残余应力的研究现状[J]. *材料导报*, 2014, 28(3):107-113 (DONG Meiling, JIN Guo, WANG Haidou, et al. The reserach status of nanoindentation methods for measuring residual stresses[J]. *Materials Reports*, 2014, 28(3):107-113 (in Chinese))
- [14] 蒋锐, 胡小方, 许晓慧, 等. 纳米压痕法研究 PZT 压电薄膜的力学性能[J]. *实验力学*, 2007(6):575-580 (JIANG Rui, HU Xiaofang, XU Xiaohui, et al. Study of mechanical properties of PZT piezoelectric film by nano-indentation technique[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007(6):575-580 (in Chinese))
- [15] Li H, Zhang P, Li G, et al. Stress measurement for nonstoichiometric ceria films based on Raman spectroscopy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 682:132-137.
- [16] Cui Y, Li L, Li J. XRD stress analysis on three-layer metal (alloy) films formed by magnetic sputtering [J]. *Semiconductor Technology*, 2010, 35(7):687-690.
- [17] He S, Zheng T, Danyluk S. Analysis and determination of the stress-optic coefficients of thin single crystal silicon

- samples [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(6):3103–3109.
- [18] Sasaki S, Ezumi T. Experimental analysis of stress intensity factor of a high polymer having a crack and a circular hole or an inclusion by tensile load [C]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2005, 5852(1):223.
- [19] Su F, Li T. Development of an infrared polarized microscope for evaluation of high gradient stress with a small distribution area on a silicon chip [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(6):063108.

Study on stress optic coefficient measurement of flexible membrane based structures

XING Wenhui¹, WU Zhipeng², SUN Xin¹, WANG Zhiyong¹

(1. Department of Mechanical, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Institute of Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Flexible membrane-based structures have the advantages of lightness, foldability, portability, etc., and have broad application prospects in many frontier fields. In comparison to traditional rigid structures, flexible membrane-based structures are more likely to generate internal stress and reduce the stability of components during fabrication and subsequent use, thus making stress measurement of membrane-based structures is of great significance. This paper designs and constructs a photoelastic experimental optical path under circularly polarized light field, and records the photoelastic images of substrate and membrane base structures under various stresses, based on the principle of photoelasticity. The periodic brightening and dimming of a photoelastic image with stress can be fitted using a trigonometric function. This established model of image brightness and principal stress was then used to calculate the stress optical coefficients of the polyimide substrate and copper film, thus confirming that copper films possess a stress optical effect and that the stress optical coefficient of nanoscale metal films can be measured using a transmission method.

Keywords: film-substrate structure; photo-elasticity; stress optical effect; internal stress