

热载荷作用下铜膜层对柔性电子复合薄膜热应力分布和电学特性影响的研究*

王涛 陈诚 李子赞 刘星语 黄川 王紫阳 任春华

(天津商业大学机械工程学院 天津 300134)

摘要:为定量表征热载荷作用下铜膜层对柔性电子复合薄膜应变分布和电学特性的影响,建立了基于数字图像相关法的热变形测试工作站和电学测试站的综合测试系统,首先在柔性聚合物上通过磁控溅射方法制备了铜导电层厚度为 50、100、200、500 nm 的二维马蹄形柔性电子复合薄膜,并对柔性电子复合薄膜在恒速率加热条件下进行原位和全局变形检测和电信号稳定性检测。提取了二维马蹄形互连的热应变场,并重点分析了薄膜铜层附近单位面积内的应变场特征。结果表明,500 nm 膜厚铜层在热载荷作用下与衬底配合关系最佳,样品整体应变成稳定趋势。同时配合电学测试站对样品进行电信号采集,发现随着铜膜层厚度增加,500 nm 样品的电阻松弛至 3 Ω ,并在持续温度载荷下可以保持优异的工作稳定性。综上所述,通过建立热载荷测试系统揭示了不同金属层厚度对柔性电子复合薄膜衬底和金属层连接的热应变与信号传输效率的影响,实验表明了 500 nm 铜膜层样品在热载荷下的性能优势,为可拉伸电子元件的安全设计提供了理论依据。

关键词: 柔性电子复合薄膜;数字图形相关法;热应变;电学稳定性

中图分类号: TO313;TN407

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 130.1520

Effect of copper film on thermal stress distribution and electrical properties of flexible electronic composite films under thermal load

Wang Tao Chen Cheng Li Ziyun Liu Xingyu Huang Chuan Wang Ziyang Ren Chunhua

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: To quantitatively characterize the effects of copper film layers on the strain distribution and electrical properties of flexible electronic composite films under thermal loading, this study establishes an integrated testing system comprising a thermal deformation test workstation based on digital image correlation and an electrical testing station. First, two-dimensional horseshoe-shaped flexible electronic composite films with copper conductive layers of 50, 100, 200, and 500 nm thickness are prepared on flexible polymers via magnetron sputtering. In-situ and global deformation detection and electrical signal stability testing of the films are conducted under constant-rate heating conditions. The thermal strain fields of the two-dimensional horseshoe-shaped interconnections are extracted, with particular emphasis on analyzing the strain field characteristics per unit area near the copper film layers. The results show that the 500 nm-thick copper film layer exhibits the optimal compatibility with the substrate under thermal loading, leading to a stable overall strain trend in the sample. Electrical signal acquisition via the electrical testing station reveals that as the copper film thickness increases, the resistance of the 500 nm sample relaxes to 3 Ω and maintains excellent operational stability under sustained temperature loading. In conclusion, this study reveals the effects of different metal layer thicknesses on the thermal strain at the substrate-metal interface and signal transmission efficiency of flexible electronic composite films through the established thermal loading testing system. Experiments demonstrate the performance advantages of the 500 nm copper film layer sample under thermal loading, providing a theoretical basis for the safety design of stretchable electronic components.

Keywords: flexible electronic film; digital graph correlation method; thermal strain; electrical stability

0 引言

柔性电子产品具有机械坚固、结构灵活、重量轻、成本低、可贴附等优点,在可穿戴设备、柔性电路、柔性电子显示器、薄膜热电器件等领域应用广泛,同时也预示着移动电子产品和日常设备(贴附型传感器)的新时代^[1-4]。现代柔性电子产品往往采用导电连接层部分与柔性基底组成复合结构^[5],在这种结合中,电子产品的刚性和高功能性与柔性基底的轻便性和灵活性相结合。柔性材料的电气功能化不仅支持诸如传感器等简单电子元件的开发构建,而且也可以是它们的一部分,可以与各种材料组合构建,完成信号收集和传递工作,形成诸如贴附式温度传感器^[6]等功能性器件。多变的连接层结构设计,不同的金属层厚度或聚合物衬底性质的改变都会给产品带来更优质的工作性质,这为柔性电子的设计带来了新思路。这种复合柔性电子产品的开发,在其他各个领域中也展示出了广泛的应用前景,例如在医疗^[7]和传感器领域的发展趋势正在朝着更高的功能性、小型化方向^[8]进步,同时通过拓展新材料的应用和设计可变形的电子电路来提高舒适性控制和应用的多样性。在这项工作中,提出了柔性可拉伸互连的设计,其中的电路互连层是通过在可拉伸的衬底材料中嵌入弯曲的金属线来实现的。这些柔性电子器件在保持器良好电学特性的同时,又实现了整体结构的延展性,因为复合柔性电子在经历复杂变形时,作为导线的可拉伸互连几乎吸收了全部的力学变形,并保持功能的完整性,进一步满足了应用对象复杂结构界面的需要。

在导电层连接部分,多节点的线路连接使得岛桥结构不同与传统直连线路连接,拥有更广泛的信号传输范围和更优质的抵抗工作环境干扰能力,在此基础上,研究人员设计了波浪形、非共面网格型、蛇形线型和马蹄形等可拉伸互连结构^[9-12],通过有限元和实验测试^[13]等方法进行验证,发现二维马蹄形图案结构更有优势。复合二维马蹄形结构适应了目前柔性电子器件对更高的面积覆盖和更大的延展性要求,但独特的几何结构使可拉伸互连具有复杂的形变规律,表面金属层二维马蹄形图案的特殊化将会导致样品表面会出现不均匀应变大小和不均匀应变分布的现象,也使电子器件的电气性能的影响因素变的多样化。而在已有的研究中,研究其在柔性衬底上集成时的独特变形特征较少,特别是针对其在温度场变化的应变特征研究将有助于贴附式柔性电子器件的设计和应用。

随着柔性电子元件向多用途的不断发展,集成在柔性基底上的互连导线在使用过程中会承受来自温度^[14]、变形^[15]等多种复合破坏行为考验,从而产生断裂、卷曲、

分层^[16]的失效行为,同时对柔性衬底产生相应影响,对其在使用过程中的信号收集和传递产生功能性影响,这对柔性电子复合材料结构在温度变化下的稳定性提出了一定的要求。现有研究中,大多数学者都针对性的利用原位光学系统和扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)^[17]对于它优异的力学性能进行了测试,并建立了理论模型来说明破坏行为对其结构的破坏能力。但是直观的显微检测方法无法实现对器件整个过程的破坏行为检测,光学和扫描电镜的观测只局限于对柔性电子力学性能的检测,模拟仿真的方法也不能完全说明复合柔性电子在实际载荷下力学和电学性能的综合检测和变化规律。同时在温度、拉伸等多重破坏条件下发生的断裂、卷曲损伤中,除了研究可见的破坏条件对其在结构完整性的直接影响外,考虑到柔性电子更广泛和细致的使用环境,还应考虑在实际破坏条件的施加作用下,观察其信号采集、传递等功能影响情况和破坏响应演变规律。

复合柔性电子具有多层结构,针对二维马蹄形蛇形互连结构^[18]的柔性电子器件,加工工艺的复杂性和不同材料之间的性能差异不但会导致柔性电子器件在复杂载荷下力学失效行为,同时会对器件的电学性能产生十分重要的影响,因此本文设计了一种非接触实时监测实验系统,可同时对柔性电子器件在热载荷作用下的变形失配和电信号变化进行定量表征和功能性监测,为柔性电子系统的工作能力监测和系统设计提供了重要参考。

考虑到在重复和长时间的使用条件下,柔性电极保持其电气性能至关重要,一种方法是提高金属薄膜和基材界面的机械强度,以获得高导电性和良好的附着能力。此外,制备相对厚的薄膜电极^[19],同时获得高电气性和优异的机械可靠性,是提高柔性电子产品整体性能的一种有效方法。实验过程中,制备了一种由聚二甲硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)基底和铜金属导线构成的复合柔性电子薄膜。柔性PDMS基底具有良好的柔韧性,可提供使用过程中所需要的抗拉伸、弯曲等变形能力。薄膜金属层提供器件的高电气性能,其另一特殊优势是优异的导热性减少了平面基底不必要的热传递,并且具有低刚度和高断裂伸长率的特点,同时显示出诸如更高的耐磨性和更好的可回收性等优势。在进一步的方法中,本文通过磁控溅射法在柔性衬底上沉积了不同厚度的金属铜膜,在热载荷施加的作用下观测了二维马蹄形柔性电子薄膜的热应变现象并通过伏安特性原理^[20]检测了样品的工作稳定性。这项工作的重点是在柔性电子器件中表征基底与铜导线的热变形能力和导电能力,并分析样品的演变机理作为柔性电子传感器抗热变形的演示和概念验证。

1 实验

1.1 样品制备

二维马蹄形互联柔性电子复合薄膜样品制备工艺均在万级超净间完成,以保证制备样品的合格性能。制备工艺如图1(a)所示。

1) 成膜。将PDMS与固化剂均匀混合,真空泵去泡,用一次性吸管滴定在高质量浮法玻璃片上,匀胶机上匀胶至均匀分布,放入真空干燥箱固化成膜,用紫外臭氧处理,改变表面疏水性质,旋涂聚酰亚胺(Polyimide, PI)后梯度升温烘烤成膜。

2) 连接层制备。在PI上磁控溅射5 nm Ti作为中间粘层,使PI更好与铜膜结合,分批次在成膜上继续溅射铜膜。

3) 图案化。在铜表面上旋涂一层光刻胶,使用光刻机利用掩模板将二维马蹄形互连图案曝光在成膜上,曝光完成后立即进行显影处理,得到互连图案层,整个光刻过程在黄光区保护下进行。

4) 转印。用水溶性胶带将二维马蹄形互连揭下,间隔贴至玻璃板上。继续溅射5 nm Ti和50 nm SiO_2 ,将新制的PDMS基底和互联导线进行紫外光处理,将导线转印至新制的PDMS基底上最后贴合热压20 min,清洗水溶性胶带,得到成品(图1(b)),图1(c)所示为马蹄形单元结构尺寸,图案宽度 $W=100\text{ }\mu\text{m}$,弧半径 $R=365\text{ }\mu\text{m}$ 。图1(d)所示为柔性电子薄膜分层结构。

1.2 实验系统设计

建立了基于数字图像相关法(digital image correlation, DIC)的工作站,如图2所示,并已被证明能够检测薄膜材料的热变形精度较高。DIC可以有效区分金属互连和柔性衬底的应变场特性,并且在热载荷作用下,特殊图案互连线的热应力与一般金属层的热应力分布不同,对与衬底配合的影响程度各异,采用DIC方法通过对热载荷作用下的样品进行图像采集处理,可以敏锐的捕捉到样品的全场热应变状况。电学测试工作站可以利用微小电流,敏锐捕捉器件在外界破坏条件下,对工作信号的传递能力和稳定性。结合DIC对二维马蹄形单元结构的失效部位检测分析,可以充分观测同步破坏条件下的信号传输响应情况,更有效的分析出二维马蹄形互连导线的工作适应能力。

DIC方法是借助样品表面的随机散斑作为被测结构形变的信息载体,基于特征匹配原理,通过高分辨率相机采集图像变形前后特征点的灰度值信息进行计算,持续对比并重现结构的形变过程。

通过相关匹配函数进行计算搜索,准确匹配变形前

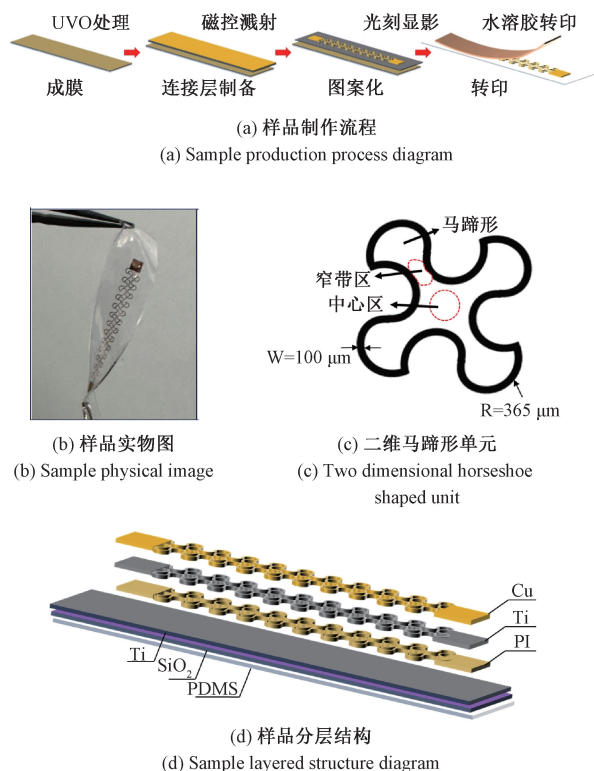


图1 柔性电子薄膜样品示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flexible electronic film sample

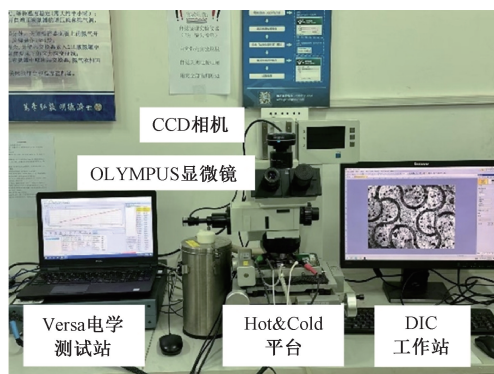


图2 热变形测试以及电学测试工作站

Fig. 2 Hot deformation testing and electrical testing workstation

后同一特征点的像素位移(u, v),从而计算结构的全场变形,原理如图3所示。考虑到结构包含了平移、旋转、剪切等非线性变形情况,本文引入一阶形函数(式(1))作为特征点的位移映射函数,在参考平面内选取以点 P 为中心的 $(2m+1) \times (2m+1)$ 的像素区域作为参考子区域, Q 为同参考平面内的相邻参考点。在形变后捕捉变形图像内相关系数最大的 P' 和 Q' 位置,最后根据两点对应的坐标得出位移值和应变值。

$$\begin{aligned} x' &= x_0 + \Delta x + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ y' &= y_0 + \Delta y + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{aligned} \quad (1)$$

式中: u 、 v 为参考点 P 在变形前后在 x 、 y 方向的位移分量; u_x 、 u_y 、 v_x 、 v_y 为一阶位移梯度。

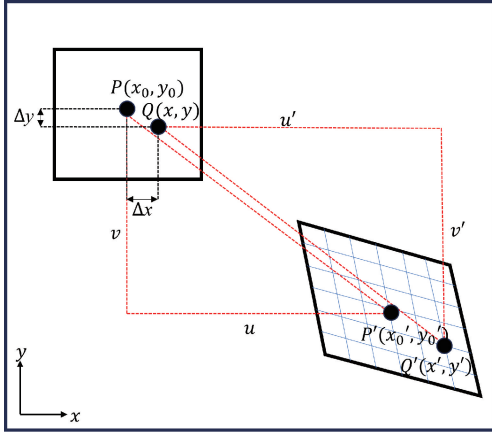


图 3 形变数学模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of deformation mathematical model

考虑到环境光源对图像的边缘处理和特征提取会产生一定影响,为保证图像的的稳定可靠,准确捕捉特征点的匹配关系,选用零均值归一化函数(zero-normalized sum of squared differences, ZNSSD) (式(2))作为最相关匹配函数,因为它对光照产生的波动和偏移量不敏感,噪声的鲁棒性最好。

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m \left[\frac{f(x_i, y_j) - \bar{f}}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - \bar{g}}{\Delta g} \right]^2 \quad (2)$$

式中: $f(x_i, y_j)$ 表示参考子区某一点的灰度值, $g(x'_i, y'_j)$ 表示目标子区某一像素点的灰度值; Δf 、 Δg 分别参考子区和目标子区零均值二范数。 Δf 、 Δg 表示为:

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \quad (3)$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]^2} \quad (4)$$

2 结果与讨论

在柔性基板上通过磁控溅射的方法沉积了不同厚度的铜导电层。所有的加工都是在柔性但不可拉伸的基板上完成的。将不同铜膜厚度的样品放在 SEM 下观察表面形貌,选用高真空,标准束流模式可以有效提高电子束流对样品形貌检测的敏感程度,选用背散射模式来提高对样品立体形貌的表征强度,结果如图 4 所示。由图 4(a)发现,50 nm 层厚样品的铜晶粒成形度不高,晶粒间隙严重不均匀且间隙过大。由图 4(b)发现,100 nm 层厚样品,表面出现规则颗粒并发生团聚。由图 4(c)发

现,200 nm 层厚样品的铜晶粒间隙呈现均匀变化,晶粒成形逐渐清晰。由图 4(d)发现,500 nm 层厚样品的铜晶粒分布明显,成形度高且分布规则,晶粒间隙均匀且划分清晰。成功通过沉积更厚的铜膜,促进了铜晶粒的结晶,促进致密化过程,提高了铜膜的结晶度。

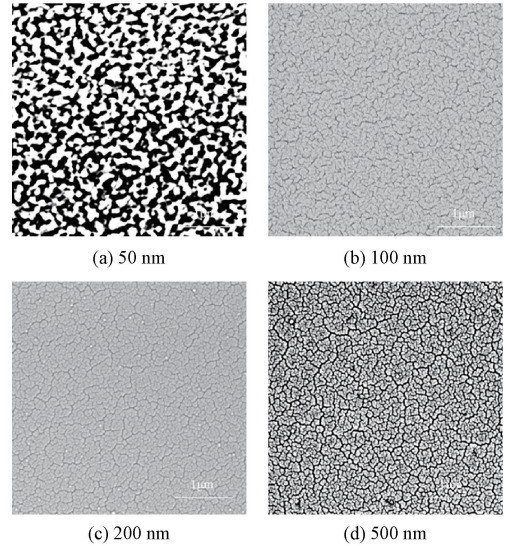


图 4 SEM 观测下的不同铜膜厚度导线形貌-50、100、200、500 nm

Fig. 4 Morphology of wires with different copper film thicknesses observed by SEM -50, 100, 200, 500 nm

根据柔性电子器件的实际应用情况,将温度范围设定为室温($\approx 20^\circ\text{C}$) $\sim 50^\circ\text{C}$,利用精密加热平台对二维马蹄形互连柔性电子薄膜施加加热载荷。样品置于 LinkamTST350 冷热级密封腔内,不受任何限制,腔体中心装有电阻加热器,试样与加热器完全接触。使用电阻加热器来提高温度,冷热段内的温度传感器检测腔内的温度。升温速率为 $1^\circ\text{C}/\text{min}$,样品的工作环境每升温一度,实验通过摄像头对样品进行一次图形采集。梯度升温至 50°C 后,所有图像经过 DIC 分析得出温度载荷下的应变状况。

应变的大小取决于相对变形程度,由于 PDMS 基底和金属层材料之间力学性能的巨大差异,导致相邻层在热载荷作用下应变大小不一致,不可避免的出现变形失配,图案化金属层以及 PDMS 基底之间膨胀系数不匹配,环境温度的改变会引发样品内部的热应力,进一步影响了变形失配程度。因此在柔性电子设计中,有效分析热应力对样品结构带来的应变变化非常重要,因为二维马蹄形结构在柔性衬底上的规则分布,提取单个马蹄形单元(图 1(c)),对其在温度场中的形变状况进行分析。

因为层间材料性质差异,如图 5(a)所示,在复合薄膜的热应变场中,可以很容易区分互联体和衬底的应变特性,也表现出 Von mises 热应变场能够很好的反应试样

全域实时形变。如图 5(b) 所示,在环境温度为 40 ℃ 时,应变差异开始在边界处扩展,随着环境温度上升至 50 ℃,如图 5(c) 所示,边界处应变差异明显增大,并呈现向中心扩展趋势。可以看出,在热载荷作用下,材料间不同弹性模量和热膨胀系数的差异导致热应力不同,从而导致柔性衬底和金属互联体之间的应变失配。将不同温度梯度的应变数值对比发现,在升温过程中,二维马蹄形互连和柔性衬底的 Von Mises 应变不同,地区差异很大,伴随着环境温度的上升,应变差异增大,这种应变差的变化反映了应变不匹配程度随着工作温度的上升而增加。高温对样品的变形失配产生了相对较大的影响,如图 5(d) 所示,进一步在不同厚度层样品的薄膜-衬底边界处选择单位面积区域,提取温度梯度影响下的应变值。

1) 50 nm 铜膜厚度样品的边界处,单位面积内在温度变化中产生的应变差最大,并有随温度升高逐渐增大的趋势。

2) 500 nm 铜膜厚度的样品边界处单位面积应变差变化相对较小,趋势稳定,表征了铜膜与衬底的配合程度受温差影响较低。

3) 铜膜层厚度对边界应变差影响明显,并呈现出铜膜层厚度增大,边界应变差越小,连接层与衬底配合越稳定的趋势。

结合 SEM 观测图像显示,沉积厚度较薄的铜膜下晶粒成形差、间隙不均,沉积厚度大的铜薄膜晶粒分布规则、致密性高,这种结构差异显著影响复合薄膜的热应变行为。薄铜膜由于结构疏松,且与衬底弹性模量和热膨胀系数失配加剧的原因,导致高温下应变波动大。而厚铜膜结构致密,能有效缓冲热应力,减小边界应变差,从而使得应变场更稳定。

为持续表征连接层厚度对膜基配合的影响程度,以连接层铜线为参考,进一步选择了二维马蹄形窄带处的近点和中心处的远点,与边界处单位面积的应变变化进行对比。如图 6(a) 所示,发现 50 nm 铜膜厚度样品中,近点处受温度影响产生的应变差与边界处应变差呈相似的增长趋势,并明显偏离远点的应变增长趋势,说明其受膜厚影响程度较大,较低的连接层膜厚增大了二维马蹄形整体结构的应变失配程度。如图 6(b) 所示,100 nm 铜膜厚度样品边界处应变值总体减小,近点处和远点处应变值配合明显,但仍与边界处应变值差距较大。如图 6(c) 所示,200 nm 厚度样品边间处单位面积内温差应变值上升趋势明显减小,与近点的应变值差异持续呈现减小趋势。如图 6(d) 所示,500 nm 铜膜厚度样品中,3 处单位面积内的应变增长呈相似趋势,衬底窄带处受铜膜边界应变影响较小,衬底中心处受影响最小,减小了应变失配程度,增大了样品工作的热稳定性,说明了连接层厚度的增大,对于样品整体结构的稳定性有向好作用。

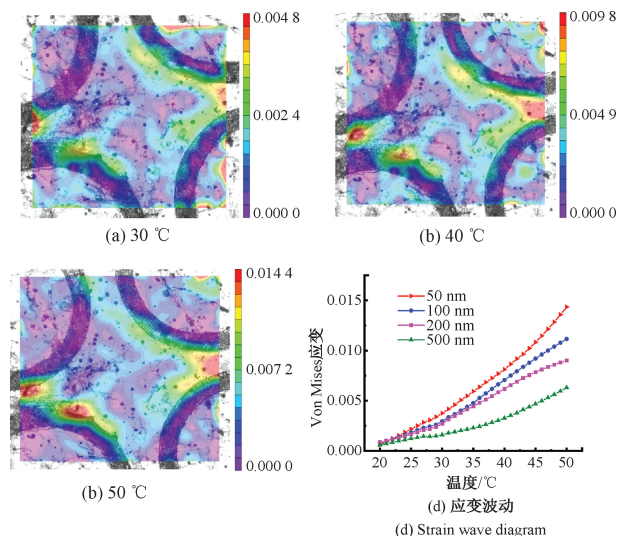


图 5 500 nm 样品不同温度下热应变场和应变波动

Fig. 5 Thermal strain field and strain fluctuation diagram of 500 nm sample at different temperatures

对比发现,较薄的铜膜晶粒成形度低,这使得在热载荷下,膜基间应力传递不均匀,导致应变失配严重。而较厚铜膜晶粒成形度高,晶界均匀,使得膜基应力分配更加均匀。而在距离基底中心处远点和近点,薄铜膜因晶界缺陷无法有效分散应力,应变失配大,但是厚铜膜的良好晶界结构有助于减小这种应变失配,维持膜基配合的稳定性。

为实时观测柔性电子器件在温度载荷作用下的工作稳定性,实验搭配了电学测试站通过伏安法特性原理对样品施加线性扫描伏安法 (linear sweep voltammetry, LSV) 和计时电流法 (Chronoamperometry, Ca) 两种测试环境,观察样品在梯度升温环境中的工作能力。线性伏安法是通过样品施加递增的电压获得电流信号值来检测样品的工作特性和阻抗特性,计时电流法是通过样品施加周期性的恒定电压获得电流信号来表征柔性电子的工作稳定性。

如图 7(a) 所示,可以发现 50 nm 铜膜厚度的样品电阻可达到 110 Ω ,随着膜厚的增加,500 nm 样品电阻松弛至 3 Ω 附近。有效说明了铜膜厚度对柔性电子导电性能的影响,并表征出随着铜膜厚度的增加可以有效降低导电层的阻抗。结合不同铜层厚度下的 SEM 观测图像,50 nm 铜膜晶界间隙大且不均匀,电子在传输过程中受到晶界散射作用强,导致电阻大。而 500 nm 铜膜晶粒成形明显、晶界均匀,电子传输顺畅。随着铜膜厚度增加,晶界对电子散射作用逐渐减弱,有效降低了导电层阻抗。同时,对比发现,500 nm 较厚铜膜的良好晶界结构有助于维持电学性能稳定,并且所有铜膜层厚度样品表现的电阻能力仍然完全兼容薄膜晶体管阻抗 (在兆欧范围

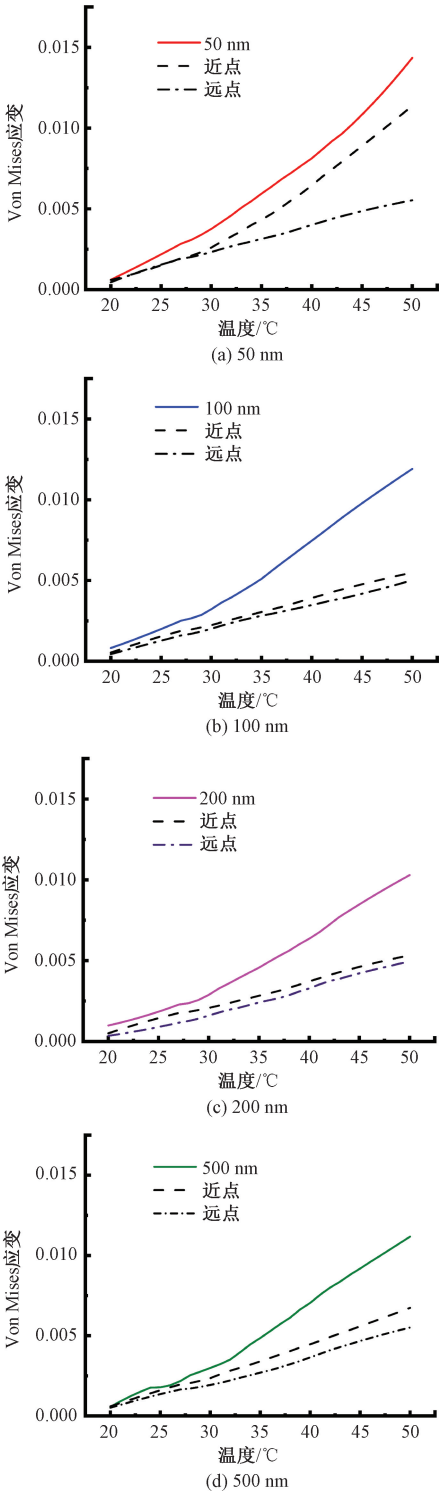


图 6 不同层厚样品边缘与中心应变值对比

Fig. 6 Comparison chart of edge and center strain values of samples with different layer thicknesses

内)以及大多数传感器阵应用所需的开关频率,适用于可拉伸电子器件。如图 7(b)所示,选取 50 ℃各膜厚样品的计时电流曲线对比,发现各膜厚样品的导电性能持续

稳定,说明了二维马蹄形柔性电子对环境温度的抵抗能力较强,具有优秀的工作稳定性。

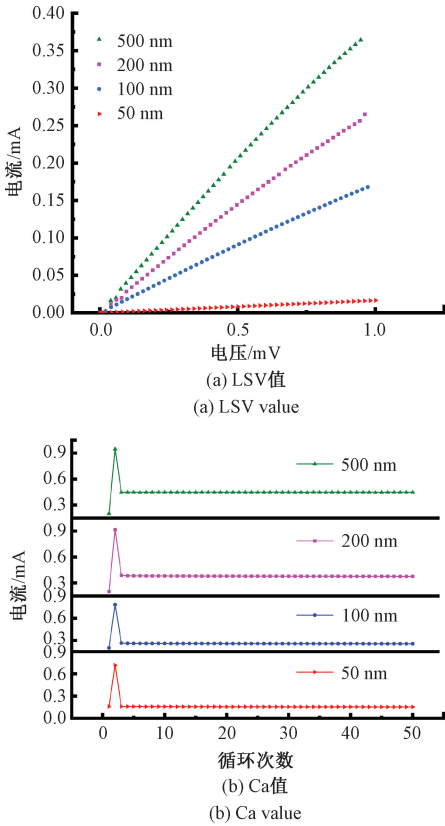


图 7 50 ℃下不同铜层厚度样品 Lsv 和 Ca 值

Fig. 7 Lsv and Ca values of samples with different copper layer thicknesses at 50 °C

3 结 论

本文通过磁控溅射金属在 PDMS 柔性聚合物上制备了厚度为 50、100、200、500 nm 的导电金属铜线,后通过光刻显影技术制备成二维马蹄形柔性电子复合薄膜。因为金属铜导线规则分布在聚合物基底上,因此材料的柔性变形性质不变。利用 SEM 对不同厚度的铜膜进行纳米级观测,对比发现 500 nm 铜层金属铜晶粒分布清晰,晶粒间隙均匀。结合 DIC 对施加梯度升温的柔性电子的热应变进行失效检测,同时通过电学测试工作站的配合,可以有效检测温度场条件下互联层失效对信号传递的稳定性影响。结果表明,500 nm 膜厚铜层在热载荷作用下与衬底配合关系最佳,样品整体应变变成稳定趋势。电学特性测试表明,50 nm 铜膜厚度的样品电阻可达到 110 Ω,随着膜厚的增加,500 nm 样品电阻松弛至 3 Ω 附近,有效说明了铜膜厚度对柔性电子导电性能的影响。研究结果为可拉伸电子元件的安全设计提供了理论依

据,并证实了柔性电子复合薄膜极强的工作能力和广泛的应用场景。

参考文献

- [1] HWANG T Y, CHOI Y, SONG Y, et al. A noble gas sensor platform: linear dense assemblies of single-walled carbon nanotubes (LACNTs) in a multi-layered ceramic/metal electrode system (MLES) [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(5): 972-979.
- [2] LI Z, CHANG S, KHUJE S, et al. Recent advancement of emerging nano copper-based printable flexible hybrid electronics [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 6211-6232.
- [3] PENG Q, CHEN J, WANG T, et al. Recent advances in designing conductive hydrogels for flexible electronics [J]. *InfoMat*, 2020, 2(5): 843-865.
- [4] 周明行,毛燧,黄显. 磁性材料控制与生物医学应用研究进展[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(8): 1-10.
- ZHOU M X, MAO S, HUANG X. Advances in control and biomedical applications of magnetic materials [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(8): 1-10.
- [5] HUANG S, LIU Y, ZHAO Y, et al. Flexible electronics: stretchable electrodes and their future [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(6): 1805924.
- [6] LI Z, KHUJE S, CHIVATE A, et al. Printable copper sensor electronics for high temperature [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, 2(7): 1867-1873.
- [7] HENG W, SOLOMON S, GAO W. Flexible electronics and devices as human-machine interfaces for medical robotics [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(16): 2107902.
- [8] HE R, LIU H, NIU Y, et al. Flexible miniaturized sensor technologies for long-term physiological monitoring [J]. *NPJ Flexible Electronics*, 2022, 6(1): 1-11.
- [9] FAN Z G, ZHANG Y H, MA Q, et al. A finite deformation model of planar serpentine interconnects for stretchable electronics [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, 91: 46-54.
- [10] 陈少轩,陈诚,张宏儒. 复合柔性电子变形失配数字图像相关研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 32(6): 48-53.
- CHEN SH X, CHEN CH, ZHANG H R. Digital image correlation research on deformation mismatch of composite flexible electronics [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 32(6): 48-53.
- [11] KIM D H, LU N, MA R, et al. Epidermal electronics [J]. *Science*, 2011, 333(6044): 838-843.
- [12] MENG F, DAI S, ZHANG Y, et al. The interconnecting process and sensing performance of stretchable hybrid electronic yarn for body temperature monitoring [J]. *Polymers*, 2024, 16(2): 243.
- [13] 孙世政,何江,秦鸿宇,等. 基于FBG的机器手指尖触觉感知研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(5): 72-81.
- SUN SH ZH, HE J, QIN H Y, et al. Research on tactile perception of machine fingertip based on FBG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(5): 72-81.
- [14] BUTT M A, KAZANSKIY N L, KHONINA S N. Revolution in flexible wearable electronics for temperature and pressure monitoring-a review [J]. *Electronics*, 2022, 11(5): 716.
- [15] HARRIS K D, ELLAS A L, CHUNG H J. Flexible electronics under strain: A review of mechanical characterization and durability enhancement strategies [J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51: 2771-2805.
- [16] CHEN Z X, PENG H, ZHANG J Y. An integrated electronic skin with biaxial sensitivity from a layered biphasic liquid metal/polymer film [J]. *Materials Horizons*, 2024, 11(17): 4150-4158.
- [17] LI W, SUN Q, LI L, et al. The rise of conductive copper inks: challenges and perspectives [J]. *Applied Materials Today*, 2020, 18: 100451.
- [18] YANG X, GAO P, ZHANG H, et al. Temporal interference wireless power transfer strategy with passive flexible electrode for vagus nerve stimulation [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(9): 6908-6918.
- [19] HWANG S, KIM Y. The effect of grain size and film thickness on the thermal expansion coefficient of copper thin films [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2011, 11(2): 1555-1558.
- [20] GUPTA J, JUNEJA S, BHATTACHARYA J. UV lithography-assisted fabrication of low-cost copper electrodes modified with gold nanostructures for improved analyte detection [J]. *ACS Omega*, 2020, 5(7): 3172-

3180.

作者简介



王涛, 2021 年于河北农业大学获得学士学位, 现为天津商业大学硕士研究生, 主要研究方向为柔性电子技术。

E-mail: wangtao70228@163.com

Wang Tao received his B. Sc. degree from Hebei Agricultural University in 2021. He is now a M. Sc. candidate at Tianjin University of Commerce. His main research interest includes flexible electronics technology.



陈诚 (通信作者), 分别在 2007 年和 2010 年于天津大学获得硕士学位和博士学位, 现为天津商业大学教授, 主要研究方向为精密测试技术及智能传感器。

E-mail: chencheng@tjcu.edu.cn

Chen Cheng (Corresponding author) received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 2007 and 2010, respectively. He is now a professor at Tianjin University of Commerce. His main research interests include precision measurement technology and intelligent sensors.