

计算机技术

柔性衬底上金属褶皱结构制备及相关特性研究

陈 萌 郭 浩 杨江涛 赵苗苗 张斌珍 刘 俊 薛晨阳 张文栋 唐 军

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室,太原 030051)

摘 要 采用磁控溅射技术在聚二甲基硅氧烷(PDMS)上制备金属褶皱结构,有效地解决了柔性结构发生形变时电阻值发生较大改变甚至失效的问题。研究了不同溅射时间对金属褶皱结构周期及高度的影响,并对金属褶皱结构的电学性能进行测试。利用原子力显微镜分析表征柔性衬底上金属褶皱结构的表面形貌,利用数字万用表进行样品表面电阻值的测量。测试结果表明:随着溅射时间的增加,金属褶皱结构的周期和高度都呈增大趋势,电阻增长率变得缓慢,对信号的响应程度也越来越小。

关键词 柔性衬底 金属褶皱结构 磁控溅射 电子皮肤

中图分类号 TP212.1; **文献标志码** A

电子器件是信息的基础单元,任意变形和应用于任意曲面的需求刺激了电子器件概念的创新,出现了柔性电子器件的概念^[1]。柔性电子器件即具有柔性特点的有机电子器件,它可以重复拉伸、压缩、折叠、扭转,也可应用于复杂曲面,与传统电子器件相比,柔性电子器件在生物医学、显示、成像系统、电子皮肤和太阳能电池板等领域都有着广泛的应用前景^[2]。柔性电子器件技术开创了一个新的应用领域,用来设计柔性电子皮肤、柔性显示器、可穿戴电子衣等^[3,4]。柔性电子器件应用在航空航天领域,可以加工成巡航导弹的视窗、飞机的座窗上用来吸收散射雷达波减少 RCS;也可以应用在光电转换器领域中太阳能电池异质窗放大器上面用来提高能量转换效率。最常见的应用就是成为等离子显示器、电致发光显示器、触摸屏等的重要原料^[5]。柔性电子器件的另一个重要应用是生物领域如电子皮肤^[6]和健康检测器^[7]等。电子皮肤又称为皮肤状电子或敏感皮肤,是将功能电子元器件(如温度、压力传感器等)和导体集成于柔性衬底形成的可以应用于表皮的柔性电子电路^[8,9]。

从国内外的最新研究进展来看,电子皮肤实现了柔性,但是可拉伸量和弯曲量很小,对于机器人关节等弯曲部位并不适用。本文基于 PDMS 的柔软特性,设计了一种可拉伸的柔性金属褶皱结构,应用于机器人关节等部位的触觉检测,可以将机器人关节等发生形变时产生的信号实时准确传输出来。

1 实验部分

1.1 实验试剂及仪器

试剂: Sylgard 184 型 PDMS 前聚物及固化剂(Dow Corning, Corp., USA); 丙酮、无水乙醇等购自天津市光复精细化工研究所,均为分析纯;实验用水为去离子水。

仪器: DZF-6050 型真空干燥箱(上海博讯实业有限公司); 洁盟牌 JP-030S 型超声波清洗机(深圳市洁盟超声波清洗机有限公司); CSPM5500 系列扫描探针显微镜(广州本原纳米仪器有限公司); 101-2A 型电热鼓风加热箱(北京中兴伟业仪器有限公司); Qprep400-BASE 纳米团簇沉积系统(英国 Mantis 高科技公司); 导电铜箔胶(珠海凯为光电科技有限公司); Agilent 4156C 精密半导体参数分析仪(安捷伦科技有限公司)。

1.2 银电极制备

实验中,利用 Qprep400-BASE 纳米团簇沉积系统进行电极的制备。使用的溅射靶材选取纯度为 99.99% 的 Ag 靶材,工作气体为高纯 Ar(99.99%) (Ar 气流量单位为 sccm,表示在标况下每分钟进入腔体内的气体毫升数。1 sccm 表示每分钟进入腔体内的 Ar 气为 1 mL)。首先使用机械泵和涡轮分子泵对系统抽真空,当真空度达到 9.0×10^{-9} Torr 后维持 5 min,待腔体和靶材上的杂质清理干净后再进行实验。实验过程中,腔体内的基压维持在 8.0×10^{-3} Torr 左右,根据长期对金属 Ag 电极溅射工艺的研究总结,通过改变主要参数溅射时间来实现电极的制备。

2014年11月26日收到

第一作者简介:陈 萌,女,硕士研究生。E-mail: 763109453@qq.com。

表 1 溅射参数设置

Table 1 Sputtering parameter

样品	时间/min	功率/W	Ar 流量/sccm	基压/Torr
1	5	60	30	8.0×10^{-3}
2	10	60	30	8.0×10^{-3}
3	15	60	30	8.0×10^{-3}
4	20	60	30	8.0×10^{-3}

1.3 测试与表征

利用广州本原 CSPM5500 系列扫描探针显微镜 (AFM) 测试柔性衬底上褶皱电极的表面形貌, 并利用 Imager 软件对测试结果进行分析, AFM 工作模式为轻敲式, 扫描频率为 2 Hz, 扫描范围为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。利用 Agilent 4156C 精密半导体参数分析仪测试电阻的变化。

2 结果与讨论

2.1 褶皱电极的制备

在柔性衬底上制作电极, 要求电极既具有优良的导电能力, 又具有可拉伸可弯曲特性^[10]。但直接在柔性衬底上制作的金属电极拉伸或弯曲时电极的导电性能极差。因此在柔性衬底 PDMS 上设计一种褶皱电极结构, 当拉伸或弯曲 PDMS 时, 其上电极的电阻变化较小, 电学性能可以在一个较小的范围内变化。图 1 表示柔性衬底上褶皱电极的制备过程。

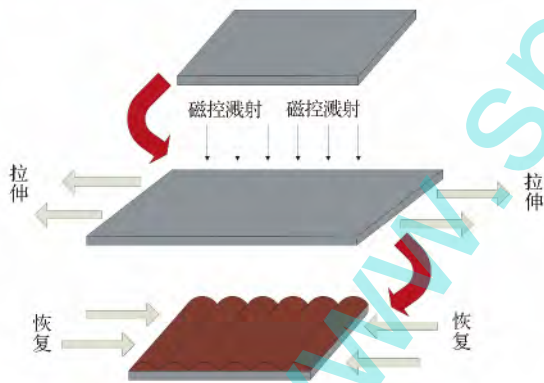


图 1 柔性衬底上褶皱电极的制备过程

Fig. 1 Preparation process of wrinkle electrode on a flexible substrate

2.2 溅射时间对褶皱电极表面形貌的影响

磁控溅射的原理是将需要溅射的金属材料的靶材放入真空腔内的靶材底座上, 利用高能量的氩离子 Ar^+ 在电场 E 的作用下轰击靶材表面, 靶材原子与氩离子 Ar^+ 发生碰撞后获得能量脱离靶材, 脱离靶材的粒子沉积到基片上, 即可在基片上形成金属薄膜结构^[11, 12]。

通过改变沉积时间制备不同形貌的金属褶皱结构, 按照表 1 参数设置来制备样品 (PDMS 预拉伸程

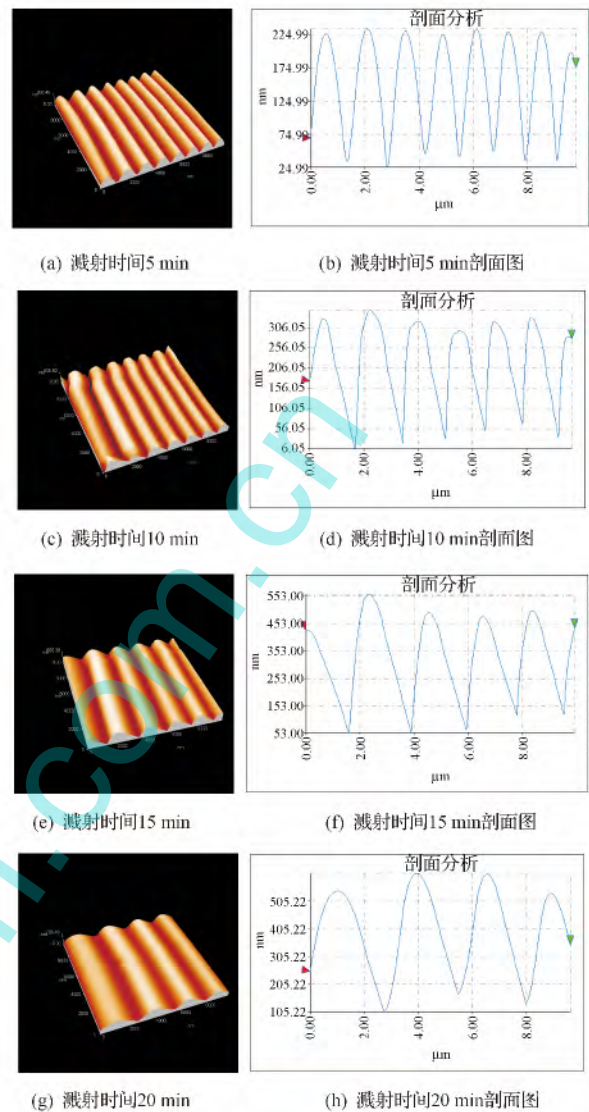


图 2 不同溅射时间下褶皱结构表面形貌

Fig. 2 Atomic force microscope images of wrinkle electrodes

度均为 30%) 并利用原子力显微镜 (AFM) 测试褶皱结构的周期、高度。

图 2 是 PDMS 经过 30% 的预拉伸, 再经过表 1 中的参数溅射后表面的原子力显微镜图片, 从图 3 可以看出, 预拉伸后的 PDMS 经过不同时间的溅射表面形貌会有所不同, 当溅射时间为 5 min 时, 褶皱电极的周期为 $1.4 \mu\text{m}$, 电极高度为 195 nm; 溅射时间增加到 10 min 时, 褶皱电极的周期增加到 $1.7 \mu\text{m}$, 高度增加到 302 nm; 当溅射时间为 15 min 时, 褶皱电极的周期增大到 $2.2 \mu\text{m}$, 高度增加到 438 nm; 当溅射时间增大到 20 min 时, 褶皱电极的周期增大到 $2.7 \mu\text{m}$, 相应的高度增大到 496 nm。由此可以得出: 随着溅射时间的增加, 褶皱电极的周期呈增大趋势, 高度也呈增大趋势。

2.3 电学性能测试

通过测试电极的初始电阻并分析褶皱结构对电极电学性能的影响。由于褶皱结构增加了柔性电极的厚度,从图3可以看出,预拉伸程度越大,电极的初始电阻越小。因此,褶皱结构有效地降低了柔性电极的初始电阻值,保证信号能够有效地进行传输。

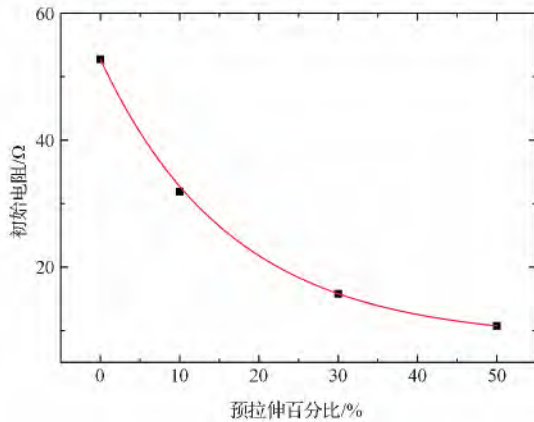


图3 初始电阻与所施加的拉伸率的关系

Fig. 3 Variation of the initial resistance as a function of the prestretching strain

利用 Agilent 4156C 精密半导体参数分析仪测试制作好的褶皱电极在不同拉伸条件下的电阻变化情况。从图4可以看出,柔性衬底上的褶皱电极在较小的形变量的情况下电阻变化情况基本相近,当柔性电极形变量超过10%后,周期较小、高度较低的褶皱电极电阻变化率较快,并且随着衬底形变量的变大褶皱电极电阻变化率的差距越来越大。

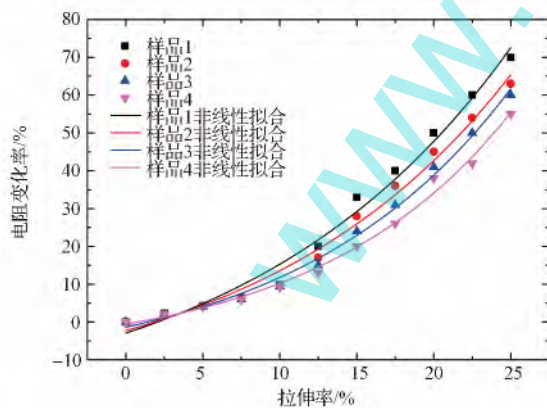


图4 电阻变化与拉伸率的关系

Fig. 4 Change in conductivity as a function of tensile strain

3 结论

通过对柔性衬底的预处理,结合磁控溅射方法

得到了周期稳定、高度稳定的褶皱电极。实现了可拉伸的柔性触觉传感器,满足了柔性电极对拉伸性的要求。同时,褶皱电极为机器人拥有人类皮肤的柔软、弯曲特性提供了新的制备技术。

参考文献

- 冯雪,陆炳卫,吴坚,等. 可延展柔性无机微纳电子器件原理与研究进展. 物理学报, 2014; 63(1): 9—26
Feng X, Lu B W, Wu J *et al.* Review on stretchable and flexible inorganic electronics. *Acta Phys Sin*, 2014; 63(1): 9—26
- 黄英,陆伟,赵小文,等. 基于碳纤维复合材料的柔性复合式触觉传感器. 计量学报, 2012; 33(3): 221—226
Huang Y, Lu W, Zhao X W, *et al.* Flexible multi-functional tactile sensor based on carbon fiber conductive composites. *Acta Metrologica Sinica*, 2012; 33(3): 221—226
- 刘少强,黄惟一,王爱民,等. 机器人触觉传感技术研发的历史现状与趋势. 机器人, 2002; 24(4): 363—366
Liu S Q, Huang W Y, Wang A M, *et al.* Overview and prospect of research and development on robot tactile sensor. *Robot*, 2002; 24(4): 363—366
- 黄英,葛运建,陆伟,等. 用于机器人皮肤的柔性多功能触觉传感器设计与实验. 机器人, 2011; 3(3): 347—353
Huang Y, Ge Y J, Lu W, *et al.* Design and experiment of flexible multi-functional tactile sensor for robot skin. *Robot*, 2011; 3(3): 347—353
- Takei K, Takahashi T, Ho J C, *et al.* Nanowire activematrix circuitry for low-voltage macroscale artificial skin. *Nature Materials*, 2010; 9: 821—826
- Someya T, Kato Y, Sekitani T, *et al.* Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensor with organic transistor active matrices. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005; 102(35): 1231—1232
- Mannsfeld S C B, Tee B C K, Stoltenberg R M, *et al.* Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers. *Nature Materials*, 2010; 9(10): 859—864
- Yang Y J, Cheng M Y, Chang W Y, *et al.* An integrated flexible temperature and tactile sensing array using PI-copper films. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008; 143(1): 143—153
- Jonathan E, Nannan C, Craig T, *et al.* Flexible multimodal tactile sensing system for object identification. *Proceedings of the 5th IEEE Conference on Sensors*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 563—566
- Meng C, Liu C, Chen L *et al.* Highly flexible and all-solid-state paperlike polymer supercapacitors. *Nano Letters*, 2010; 10(10): 4025—4031
- 顾期斌,杨万来,梁飞,等. 柔性透明导电 ZnO 基薄膜的制备及其发展前景. 湖北第二师范学院学报, 2014; 8: 11—14
Gu Q B, Yang W L, Liang F, *et al.* Preparation and development of transparent conductive oxide ZnO-based thin films on flexible substrates. *Journal of Hubei University of Education*, 2014; 8: 11—14
- 翟超,唐军,温煥飞,等. 银纳米颗粒的物理可控生长技术. 仪表技术与传感器, 2014; 1: 103—106
Zhai C, Tang J, Wen H F, *et al.* Controlled growth of Ag nanoparticles by physics means. *Instrument Technique and Sensor*, 2014; 1:

Preparation and Characteristics of Metal Wrinkle on Flexible Substrates

CHEN Meng , GUO Hao , YANG Jiang-tao , ZHAO Miao-miao , ZHANG Bin-zhen , LIU Jun ,
XUE Chen-yang , ZHANG Wen-dong , TANG Jun

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement Ministry of Education and Science and
Technology on Electronic Test & Measurement laboratory ,North University of China ,Taiyuan 030051 ,P. R. China)

[Abstract] Wrinkle electrodes were deposited on flexible polyimide substrates by magnetron sputtering method , solved the resistance changed and even failure problems effectively. The effects of sputtering time on the cycle and height of wrinkle electrodes were carried out. Atomic force microscope (AFM) was used to examine the surface morphology of the wrinkle electrodes. The digital multimeter was used to measure the resistance of the sample surface. The results show that , with the increase of the sputtering time , the cycle and the height of wrinkle electrode are increased , and the resistance rate becomed slow. The degree of response signal is becoming more and more small.

[Key words] flexible substrate wrinkle electrode magnetron sputtering E-skin209

(上接第 205 页)

Anti-interference Algorithm Comparison Research of Multi-antenna Communication System

CHENG Feng^{1 2} , ZHANG Chi² , LI Ye²

(The State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and
Information System(CEMEE)¹ , Luoyang 471003 , P. R. China)
School of Electronic Information ,Wuhan University² , Wuhan 430072 , P. R. China)

[Abstract] Multiple antennas are used to increase the capacity and spectrum efficiency of communication system , thus can improve the transmission rate and the communication quality. This paper applies the MVDR adaptive beamforming algorithm , to suppress interference signals in multi-antenna communication system. Meanwhile , one of the blind source separation algorithms , FastICA algorithm , is used to separate the interference signals and desired signals , which also achieves the effect of anti-interference. Through simulations , the paper compares the impact of array error and signal to noise ratio on these two algorithms , and analyzes the cause of their different anti-interference performances. Based on the analysis , the applicable conditions and application advice on these two algorithms are given.

[Key words] multi-antenna communication system anti-interference adaptive beamforming blind source separation array error