

非晶合金皮肤:新型柔性应变传感器

威海杰^{1,2} 汪卫华^{1,2,†}

(1 中国科学院物理研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

2017-11-02收到

† email: whw@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20180104

皮肤是人体最大的器官,承担着保护人体内部组织和感受外界刺激的功能。与人体皮肤类似,电子皮肤可以保护智能机器人内部的精密结构不受损伤,更重要的是,它能赋予机器人“知觉”,让其能感受到外界环境的刺激和变化,及时做出响应。早在20世纪70年代,电子皮肤的概念就出现在很多科幻小说和科幻电影中,与此同时,科学家们也开始对电子皮肤进行不断探索,因为除智能机器人以外,电子皮肤在仿生假肢、健康监测等领域也有巨大应用前景^[1-3]。

电子皮肤的基本单元是柔性应变传感器^[4]。随着智能终端的普及,电子皮肤作为可穿戴设备在过去20年中得到蓬勃发展。许多新材料被开发用作电子皮肤的应变敏感材料,包括碳纳米管^[5]、石墨烯^[6]、金属和半导体纳米线^[7, 8]、金属纳米颗粒^[9]、有机高分子材料^[10, 11]等。然而,这些材料都有着自己的短板,强烈地限制了电子皮肤的实际应用。例如,通过化学气相沉积方法生长的石墨烯往往含有很多缺陷和杂质,并且由于温度的限制无法直接生长在柔性衬底上;金属纳米颗粒多是由贵金属组成,并且由于隧穿效应在监测应变时电阻会变得很大;金属和半导体纳米线价格昂贵且难以大规模集成;有机高分子材料力学性能与人体皮肤最为接近,但是其导电性太差,需要较大电压驱动,对于可穿戴设备而言能耗高且不安全^[12]。因此,寻找同时具备导电性好、柔

性佳、灵敏度高、稳定、易加工等特点的应变敏感材料对电子皮肤的实际应用迫在眉睫。

金属合金是人类最早开发并且至今仍在日常生活中使用最广泛的材料之一。然而,晶体金属合金的弹性极限范围很小,一般金属合金材料的弹性极限远小于0.5%^[13],这是金属材料应用在电子皮肤领域最大的短板。急速冷却是制备新型合金材料的现代方法,这种方法可以将金属液体无序的原子结构保留下来,得到的非晶合金材料可以极大地提高其弹性极限范围,高达2%,是一般合金材料的几十倍。与此同时,非晶合金又能将金属优良的导电性较好地保留下来。利用非晶合金材料这些特性,我们最近开发了一种新型柔性高性能应变传感器

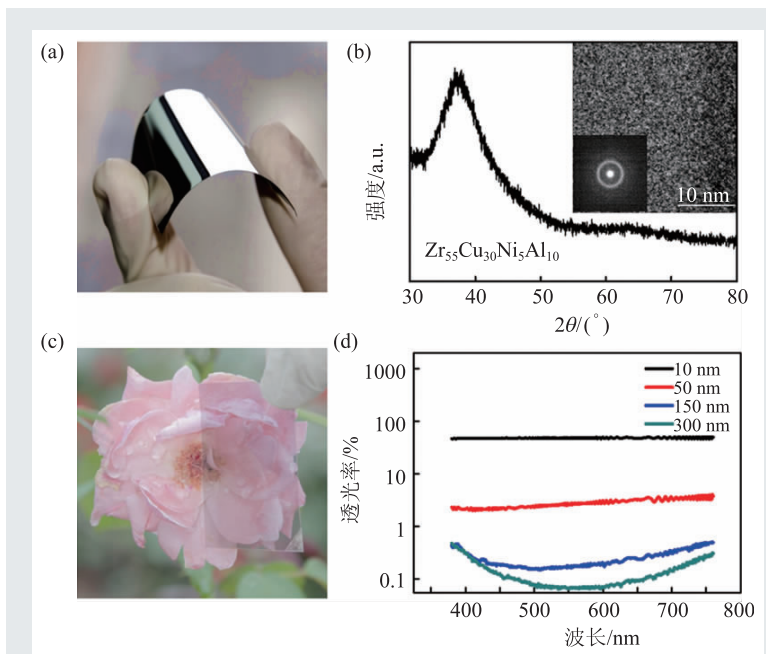


图1 (a)非晶合金皮肤的光学照片;(b)XRD和TEM表明它的无序原子结构;(c)“透明”的非晶合金皮肤;(d)非晶合金皮肤的透光度随非晶合金薄膜厚度的变化

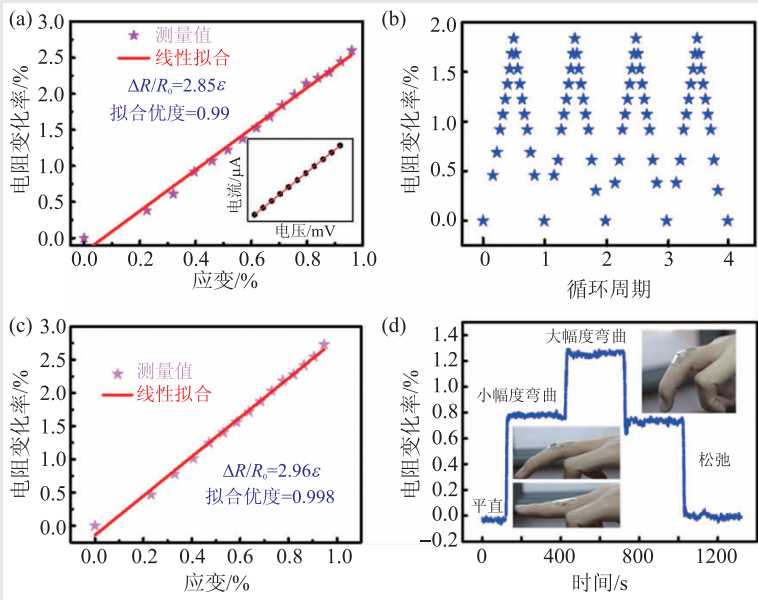


图2 非晶合金皮肤压阻效应测试 (a)非晶合金皮肤电阻随应变的变化; (b)循环测试结果; (c)1000次弯折后的结果; (d)非晶合金皮肤用来监测手指弯曲程度的示意图

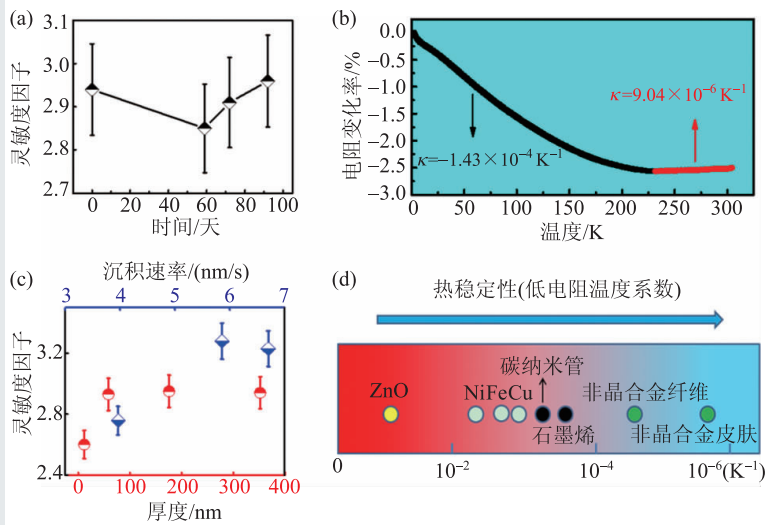


图3 (a)非晶合金皮肤灵敏度系数随暴露在空气中时间的变化; (b)电阻温度系数; (c)灵敏度系数随沉积速率和膜厚的变化; (d)与其他材料电子皮肤相比, 非晶合金皮肤有很好的热稳定性

膜的厚度进行调控, 非晶合金皮肤视觉上可以变“透明”。

电子皮肤的核心功能是将应变转化为电信号, 一种较为常见的策略是通过压阻效应, 即材料电阻随应变的改变来实现, 因为其响应快、信号转换方便等特点。对该传感器进行的压阻效应测试结果表明(图2), 非晶合金皮肤保留了金属材料高电导率($>5000 \text{ S cm}^{-1}$)、电阻与应变之间有完美的线性关系、稳定性好等特点。同时, 与传统晶态金属材料相比, 弹性范围有很大的提高(室温下的理论弹性极限为 4.2% ^[14])。图2(d)显示非晶合金皮肤可以用来灵敏地监测手指弯曲程度, 表明其在仿生学等方向有很大应用前景。

非晶合金区别于晶态合金的最大特点在于其原子和电子结构的无序性, 这种无序性导致了电阻对温度的变化不敏感^[15]。在近室温区, 非晶合金皮肤呈现出极低的电阻温度系数($9.04 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), 比传统金属低2—3个数量级, 与石墨烯和碳纳米管相比, 也有很大优势(图3)。低的电阻温度系数有利于消除热漂移, 使电子皮肤工作的温度范围更大, 同时也有利于和温度传感器集成, 开发多功能电子皮肤。

——非晶合金皮肤。

非晶合金皮肤是通过离子束溅射方法将ZrCuNiAl等非晶合金薄膜直接生长在柔性塑料(PC)衬底上得到的。如图1所示, 非晶合金皮肤柔性好, 很容易弯曲超过 180° 。通过选择不同大小的衬底, 非晶合金皮肤的面积可以实现从几平方毫米到 150 cm^2 的连续变化。通过对非晶合金薄

对大肠杆菌进行的抗菌性测试表明, 非晶合金皮肤还具有一定的抗菌性, 可用于做医疗设备。非晶合金具有的高强度、耐摩擦、耐腐蚀性^[16]等特点可以为机器人内部结构提供足够保护。此外, 非晶合金皮肤能耗低(10^{-7} W)、成本低廉、工艺简单, 满足电子皮肤实际应用的必要条件。

相关研究成果最近在 *Applied Physics Letters* 上发表。通过将非晶合金优良的力、热、电学性质结合在一起,我们的工作有望推动电子皮肤的

早日实际应用,同时也为非晶合金材料的应用开辟新的途径。

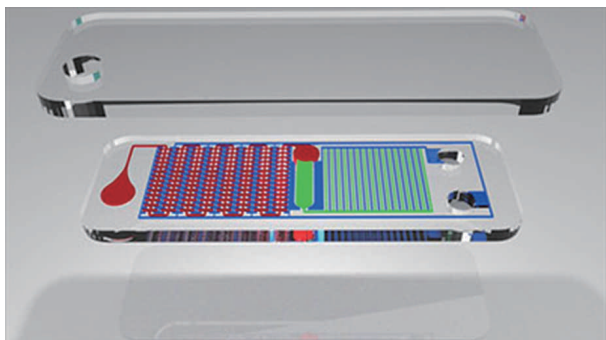
参考文献

- [1] Hammock M L, Chortos A *et al.* *Adv. Mater.*, 2013, 25: 5997
- [2] Wang X D, Dong L, Zhang H L *et al.* *Adv. Sci.*, 2015, 2: 1500169
- [3] Wang C, Hwang D, Yu B Z *et al.* *Nature Mater.*, 2013, 12: 899
- [4] Segev-Bar M, Bachar N, Wolf Y *et al.* *Adv. Mater. Technol.*, 2017, 2: 1600206
- [5] Kang I, Schulz M J, Kim J H *et al.* *Smart. Mater. Struct.*, 2006, 15: 737
- [6] Zhao J, Wang G L, Yang R *et al.* *ACS Nano*, 2015, 9: 1622
- [7] Takei K, Takahashi T, Ho J C *et al.* *Nature Mater.*, 2010, 9: 821
- [8] Wang Z L, Song J H. *Science*, 2006, 312: 242
- [9] Lee D H, Lee H G *et al.* *Adv. Mater.*, 2016, 28: 9364
- [10] Oh J Y, Rondeau-Gagné S, Chiu Y C *et al.* *Nature*, 2016, 539: 411
- [11] Xu J, Wang S H *et al.* *Science*, 2017, 355: 59
- [12] Bauer S, Kaltenbrunner M. *Nature*, 2016, 539: 365
- [13] Oh J C, Ohkubo T, Kim Y C *et al.* *Scripta Mater.*, 2005, 53: 165
- [14] Johnson W L, Samwer K. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95: 195501
- [15] Howson M A, Gallagher B L. *Phys. Rep.*, 1988, 170: 265
- [16] Chen Q, Liu L, Zhang S M. *Frontiers of Mater. Sci. in China*, 2010, 4: 34

微流体芯片探测艾滋病毒和金葡萄球菌

目前探测核酸的标准方法是基于所谓的聚合酶链式反应(PCR)。这是一种昂贵的技术,需要多步骤的样品制备过程以及离心机等耗电的实验室设备。不适用于低资源处所、小诊所及家用。

美国生物物理学家和生物工程师 Lee 等研制了一种称作 SIMPLE 的芯片,可以快速地检测血液样品中的核酸。该芯片使用“真空电池”驱动一个微流体系统,自动地将血浆从血液中分离出来,输送到 224 个很小的“微井室”中。这一过程代替了标准 PCR 检验



10 美元的芯片可以探测血液中的艾滋病毒和金葡萄球菌

物理新闻和动态

中的离心分离及其他样品制备步骤。

这种芯片由两部分聚合物聚二甲基硅氧烷(PDMS)组成。血液分析部分由一系列井、通道和微井组成,而真空电池部分有通道和孔洞以便空气通过。这两个系统大致相同,中间被 PDMS 隔开,PDMS 具有纳米孔结构,空气可以通过,血液及其他液体不能通过。

芯片做好后,封装在真空盒中。准备使用时,将血样与一种生物标记物混合,使标记物与要探测的核酸起反应,然后将盒子打开。将一滴血液与反应产物的混合物放在芯片上。当芯片充进空气时,系统中低压的吸力将血样抽运通过芯片。

血流的主要通道由 40 μm 厚的“微墙”隔开。在通道中由于沉淀作用,血液细胞下沉,血浆升上来,通过微墙进到微井中。

当微井充满时,将芯片加热以通过复制过程增加血浆中核酸的数量。如果有要检测的核酸存在,当其数量增加时,加在血浆中的生物标记物将改变颜色或发荧光。

这种芯片可以在 30 分钟内探测艾滋病毒和金葡萄球菌。芯片的成本只需 10 美元。有关论文发表在 2017 年第 3 卷第 3 期的 *Science Advances* 上。

(周书华 编译自 *Physics World News*, 3 April 2017)