

论坛四十四：柔性电子材料论坛

分论坛主席：黄维，冯雪

44-01

Wrap-like transfer printing for three-dimensional curvy electronicsWei Jian^{1,3}, Xingye Chen^{1,2}, Ying Chen^{1,2,4*}, Xue Feng^{1,3*}¹Laboratory of Flexible Electronics Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China²Institute of Flexible Electronics Technology of THU, Zhejiang, Jiaxing 314000, China³AML, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China⁴Qiantang Science and Technology Innovation Center, Hangzhou 310016, China⁵School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

*Correspondence should be addressed to Y.C., and X.F.

Email: chenying@ifet-tsinghua.org; fengxue@tsinghua.edu.cn

Three-dimensional curvy electronics have wide-ranging application in biomedical healthcare, soft machine and high-density curved imager. Limited by material properties, complex procedures and coverage ability of existing fabrication techniques, the development of high-performance 3D curvy electronics remains challenging. Here, we propose an automated wrap-like transfer printing prototype for fabricating 3D curvy electronics. Assisted by a gentle and uniform pressure field, the pre-fabricated planar circuits on the petal-like stamp are integrated onto the target surface intactly with full coverage. The driving pressure for the wrapping is provided by the strain recovery of a pre-strained elastic film triggered by the air pressure control. The wrapping configuration and strain distribution of the stamp is simulated by the Finite Element Analysis, and the pattern and thickness of the stamps are optimized. Demonstration of this strategy including spherical meander antenna, spherical LED array, spherical solar cell array illustrates its feasibility in the development of complex 3D curvy electronics.

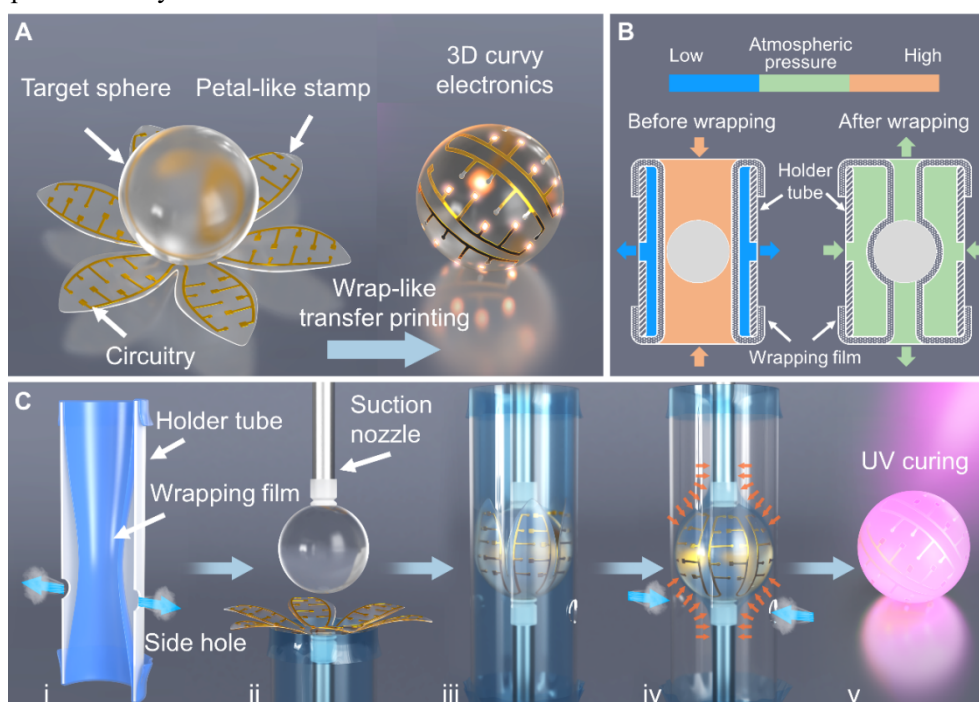


Fig. 1. The wrap-like transfer printing process. (A) Schematic illustration of wrap-like transfer printing relied on a petal-like stamp with circuitry. (B) Schematic diagram of pressure distribution before and after wrapping (arrows represent the direction of airflow). (C) The fabrication process including: i) Inflate the wrapping film. ii) Align the target sphere and the petal-like stamp. iii) Insert the sphere and petal-like stamp into the wrapping film. iv) Contract the wrapping film and print the circuitry onto the target sphere automatically. v) Cure the adhesives between the circuitry and the sphere.

44-02

基于有机电化学晶体管的无酶葡萄糖传感器

孟珂¹, 朱佳¹, 林媛¹

(1. 电子科技大学 材料与能源学院, 成都 610000)

实时、无创伤监测体液中的葡萄糖浓度对于评估人体代谢水平与预防糖尿病并发症具有重要意义。传统的无创式体液葡萄糖传感器大致分为有酶与无酶两种, 前者具有较高的特异性, 而后者成本较低且灵敏度较高。然而, 对于体液中微量的葡萄糖水平, 现有的传感器仍然面临着监测极限和稳定性不足等问题。本工作通过结合葡萄糖无酶传感与有机电化学晶体管放大信号的原理, 研制了一款具有高灵敏度与稳定性的可穿戴汗液葡萄糖传感器。该传感器采用三电极结构, 以金纳米颗粒修饰激光诱导石墨烯为门电极, 金作为源、漏电极, PEDOT:PSS 作为沟道半导体。通过优化修饰的金纳米颗粒含量、门电极尺寸与门电位大小, 基于有机电化学晶体管的无酶葡萄糖传感器的检测极限可达 10 nM, 同时具有较高的抗干扰能力, 可实时监测汗液中微小的葡萄糖浓度变化。

关键词: 葡萄糖无酶传感器; 可穿戴/柔性电子器件; 有机电化学晶体管; 激光诱导石墨烯; 场效应

44-03

基于多孔薄膜的柔性透气性超薄电路

周伟欣¹; 陈颖^{2*}; 冯雪^{12*}

(1X-center, 浙江清华柔性电子技术研究院, 浙江 嘉兴, 314006;

2 航天航空学院, 清华大学, 北京, 100084)

*Email: chenying@ifet-tsinghua.org; fengxue@tsinghua.edu.cn

具有良好皮肤贴敷性的表皮电子器件近年来得到了广泛的关注。这类器件具有良好的皮肤贴合性, 能够更准确地采集各类人体生理信号。但由于人体皮肤会排放汗液等表皮分泌物, 长期佩戴后会在皮肤器件底部积聚。因此具有良好透气性的表皮电子器件可以防止汗液在皮肤表面的聚集而引发各类皮肤问题。在表皮电子器件中, 具有信息采集处理和传导的柔性电路是表皮电子器件系统的核心, 因此对其的研究具有重要的意义。柔性电路作为柔性表皮电子的核心组成部分, 面临着高集成度, 高可靠性超轻透气和生物相容性等方面的挑战。传统的柔性电路往往具有大面积的硬质单元, 对佩戴舒适性和透气性都造成了较大的负面影响。本研究针对柔性电路的透气性需求, 开展了一系列研究。利用呼吸图法所具备的超薄多孔 PI 薄膜, 实现了柔性电路良好的透气性和良好的与皮肤表面的共性能。而在柔性电路中引入柔性芯片则有效的降低了电路单硬质单元面积大幅提升了柔性电路的共性能, 另一方面, 先进的封装也有效地降低了柔性芯片的质量, 这些优势大幅提升了本课题所研究的柔性电路的佩戴舒适性和生物相容性。为柔性表皮电子器件的发展提供了一种可行的实施路径。

关键字: 柔性芯片, 多孔材料, 透气性薄膜, 柔性微系统

44-04

柔性半导体感知集成系统

王丽丽 中国科学院半导体研究所

随着智慧医疗信息技术的蓬勃发展,对半导体多功能集成系统的信号采集和处理提出了更高的要求。目前,柔性半导体传感器已经可以实现单一功能的感知,包括光、声、力、温度、生化信号等,然而与单一功能器件相比,多模态半导体感知融合在评估人体健康状态和提高疾病识别精度方面具有明显优势。在传统的多模态感知系统中,不同信息的获取主要是通过将各种传感器集成从而采集不同信号,这会产生较大的功耗和电路冗余。因此,我们通过设计半导体材料,优化新型半导体器件结构、提出新的传感机理来实现系统对外部复杂信息的感知和识别是非常重要的。

44-05

适用于可穿戴电子设备的超弹性、变形稳定的无线供电天线

和子栋,巫远招,刘宜伟,李润伟

(中国科学院宁波材料工程与技术研究所 磁材实验室,浙江 宁波 315000;)

{近场通信(NFC)天线利用电磁耦合技术实现短距离内的无线传输和能量采集,被广泛应用于可穿戴和植入式电子设备中。然而,在实际应用中,机械变形是不可避免的,这会严重影响天线的谐振频率和品质因数,从而导致通信失败。在此,我们报告了一种基于仿生结构和液态金属微通道的超弹性、变形稳定的 NFC 天线。有限元分析和实验测试结果表明,该天线具有拉伸应变不敏感、电感变化以及谐振频率偏移较小的特点。该天线优点具体如下:1)在各种变形条件下的兼容性:如拉伸(>300%单轴应变)、折叠(0~170°)、弯曲曲率半径(R=2.5~20mm)、扭曲(0~270°)、滚动(0~360°)和整体压力(1000KPa);2)动态稳定性:与球囊表面共形膨胀或收缩、贴附在运动的膝关节上(0~9 Km/h)时,该天线的谐振频率始终保持稳定。此外,该天线被集成到智能服装以及包裹在人工血管上,以展示无线供电的能力。总之,该天线优异的变形能力以及稳定性使其在无线、无源的可穿戴和植入式电子设备中具有相当大的应用潜力。}

关键词: {无线供电;液态金属;变形稳定;近场通信;可穿戴电子}

44-06

超薄硅基图像传感器球曲化及光电性能研究

张志兴,陈颖*

(浙江清华柔性电子技术研究院,浙江省嘉兴市南湖区亚太路 906 号 17 号楼,314006 *邮箱:chenying@ifet-tsinghua.org)

硅基曲面图像传感器具有独特的三维结构,为成像系统设计提供了全新的自由度,推动了新型超薄、超广角摄像模组的发展,是成像器件实现重大变革的关键。因此,本项目从突破面图像传感器芯片薄化、超薄芯片曲面化、曲面芯片键合封装等多项关键技术出发,形成硅基芯片材料-器件-性能的全方位研究。并以 IMX179 芯片为原始器件,制备出曲率半径为 60mm,且与标准球相比偏差小于 20um 的低折皱、高精度凹型球曲面图像传感器。结合超薄芯片弯曲的理论计算、曲面芯片的结构表征以及芯片性能测试,建立曲面芯片空间形貌-应力分布-光电性能三者的映射关系,分析了力电耦合作用机制。通过本项研究为曲面成像模组的研制提供器件制备工艺与理论、系统设计方法等关键研究依据,为新一代光学系统的设计提供理论据与实验基础。

关键词: 硅基芯片,超薄化,曲面图像传感器

44-07

基于高灵敏度柔性压力传感器的体表冲击波

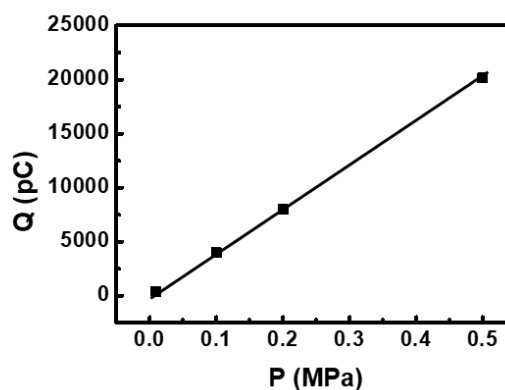
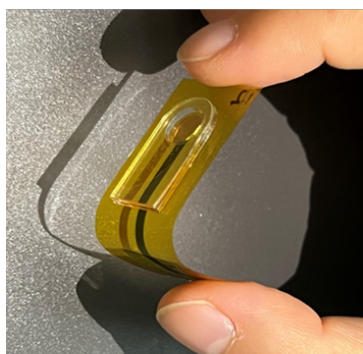
精准测量技术

杜琦峰¹, 陈颖^{1,2*}

(1. 浙江清华柔性电子技术研究院, 浙江 嘉兴 314000; 2. 钱塘科技创新中心, 浙江 杭州 310018)

针对爆炸冲击波致伤效能评估的需求, 本文开展了基于 PVDF (polyvinylidene fluoride) 柔性压力传感器的体表冲击波精准测量技术研究。首先, 建立了基于板壳力学的面内拉伸模式柔性压力传感器测量理论模型, 揭示了载荷与输出电荷量的线性关系, 提出了基于空腔结构的面内拉伸模式柔性压力传感器测量原理, 大幅提升了器件的测量灵敏度。另外, 采用局部极化和电极边缘去极化工艺实现了传感单元面积精准控制, 保证了器件测量性能精准可控, 同时一体式压电传感的结构设计有效地提升了器件的抗冲击性能。结果表明, 柔性压力传感器的线性测量范围为 10~500 kPa; 灵敏度为 40335.3pC/MPa。最后, 通过爆炸试验场中小香猪体表冲击波测量实验, 验证了柔性压力传感器能够有效地测量生物体表面冲击波超压, 并且精确地反应冲击波在体表的作用过程, 为未来穿戴式体表冲击波压力的精确测量提供支撑。

关键词: 柔性压力传感器; 高灵敏度; 冲击波; 精准测量



柔性压力传感器实物及标定曲线

44-08

多级金字塔锥微结构柔性压力传感器

安彤舸^{1,2}, 张永军¹, 杜琦峰^{2,3}, 赵晓宇¹

(1. 杭州电子科技大学 材料与环境工程学院, 杭州 310018;
2. 钱塘科技创新中心 芯片与智能微系统研究所, 杭州 310018;
3. 浙江清华柔性电子技术研究院, 浙江嘉兴 314000)

为实现柔性压力传感器灵敏度和检测范围的同时优化, 本文设计了一种具有多层金字塔微结构 (MLPm) 阵列的柔性压阻式传感器, 该 MLPm 传感器使用聚二甲基硅氧烷和多壁碳纳米管混化物作为传感材料, 结合微球自组装、反应离子刻蚀、磁控溅射、湿法腐蚀等工艺, 在宽线性传感范围 (1000 kPa) 内实现了高灵敏度 (8775 kPa⁻¹) 和高线性 (R²=0.997)。MLPm 传感器的高性能是通过传感材料表面的多层级金字塔锥微结构实现的, 这提高了传感材料的可压缩性并补偿了结构的硬化。此外, MLPm 传感器的响应时间在 12 ms 内, 检测下限低至 30.2 Pa, 并在 400 kPa 下重复 10000 次循环, 以证明传感器的稳定性。为了进一步探索 MLPm 传感器的应用, 它已被证明可以检测各种生理信号, 如呼吸、手腕脉冲、眼球运动和手指弯

曲。此外，MLPm 传感器阵列可以检测八种不同姿势下物体的形状、重量分布以及足底压力的分布。

关键词：柔性压力传感器；高灵敏度；宽线性检测范围；微球自组装；湿法腐蚀

44-09

双极超薄柔性芯片减薄后电热性能的变化

高 能¹, 汪照贤², 陈 颖², 潘泰松¹, 林 媛¹

(1. 电子科技大学 材料与能源学院, 成都 610054; 2. 浙江清华柔性电子技术研究院, 浙江 嘉兴 314006)

背面机械研磨减薄是超薄柔性芯片制备的重要步骤之一, 但在研磨减薄的过程中, 不可避免地会引入一定的残余应变、位错结构、界面层等额外缺陷, 使芯片出现性能漂移甚至失效等情况。本文通过对双极 PWM 芯片的测试分析了不同厚度芯片的多个电参数, 发现随着衬底减薄, 短路输出电流和漏电流参数表现出与厚度相关的变化。采用微光显微镜 (EMMI)、透射电镜 (TEM)、拉曼光谱等手段, 研究了薄化后芯片背面形貌, 发现在厚度小于 20 微米时, 芯片衬底电流、机械研磨带来的损伤层均对芯片性能构成了较大影响。反应离子刻蚀 (RIE) 和化学机械抛光 (CMP) 工艺均消除了损伤层带来的漏电变化。另一方面, 比较了不同的功率下芯片薄化前后的热性能, 薄化芯片在散热方面表现出更好的性能。

关键词：超薄芯片、机械研磨、背面损伤、寄生效应、柔性芯片

44-10

液态金属镓晶化的尺寸效应

刘金云, 尚杰, 刘宜伟, 李润伟

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江省宁波市镇海区中官西路 1219 号, 315201;

镓是一种低熔点高沸点的金属材料, 有“电子工业脊梁”的美誉。镓以及镓基合金由于具有无毒等特点是目前应用最广泛的液态金属材料。作为液态金属应用最重要的分支, 微米或亚微米尺度的颗粒被应用在可穿戴电子、催化、能源与生物医疗等领域。而金属镓复杂的多相结构以及尺寸依赖的相转变规律严重限制了镓基液态金属的应用范围。针对这一问题, 我们重点围绕金属镓晶化规律及其多相选择机制不明确等问题开展研究。在这项工作中, 我们对不同尺寸、不同退火温度下镓的相转变行为进行了广泛的热分析实验, 研究发现镓到 α -Ga 或 β -Ga 的结晶温度和结晶路径可以通过热处理和液滴尺寸有效地控制, 并发现了临界退火温度对尺寸的依赖关系, 我们认为镓的多相选择过程是由过冷液体中共价键的形成和消失有决定的, 这一结果对认识镓的物性和设计新型器件具有一定的指导意义。

关键词：晶化；尺寸效应；相变；热处理；过冷液体

44-11

用于超薄晶圆探针测试的临时支撑材料

宋 禹^{1,2}, 宋 欣^{3,4}, 简 巍^{1,2}, 陈 颖^{3,4}, 冯 雪^{1,2}

(1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084; 2. 清华大学 柔性电子技术研究中心, 北京 100084; 3. 浙江清华柔性电子技术研究院, 浙江 嘉兴 314000; 4. 钱塘科技创新中心, 杭州 310016)

由于对芯片柔性的要求, 超薄芯片将成为未来的一个重要发展趋势。晶圆探针测试是在高级半导体工艺中获得具有可靠高效性能的超薄芯片的关键。超薄晶圆的探针测试的主要困难是确保在不损坏晶圆的情况下检测到准确的电信号。为了解决这一困难, 本文通过理论模型研究了临时支撑的超薄晶圆的探针测试。分析了晶圆在不同临时支撑和测试驱动值下的力

学行为。还建立了晶圆失效相图，为选择临时支撑材料和测试条件提供理论指导。模型分析结果表明，通过增加临时支撑材料的弹性模量和临时支撑的厚度，可以减小晶圆的最大拉应力，进而防止晶圆在测试过程中被破坏。通过制作 8 英寸、10 微米厚的晶圆样品，分别采用晶圆粘接薄膜和紫外胶带作为临时支撑材料，在不造成损伤的情况下成功进行了超薄晶圆的探针测试，且晶圆粘接薄膜能够使晶圆承受更大的测试驱动值。

关键词：超薄芯片；超薄晶圆；探针测试；临时支撑；失效相图

44-12

高分辨能力和分辨率的柔性应变-温度双模传感器

肖恢芸 1,2, 刘宜伟 1,2, 巫远招 1,2, 尚杰 1,2, 李润伟 1,2

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

人体活动所产生包括应变和温度等大量的生理信号是医疗健康、运动监测的重要数据来源，利用柔性可穿戴电子实现应变和温度的感知意义重大。Co 基非晶丝具有优异的软磁性能和应变/磁感知能力，并且具有灵活的检测方式，是理想的电子器件感知材料之一。在此基础上，以 Co 基软磁非晶丝为敏感材料，通过设计具有管状异质结构的双模态传感器实现了单一传感器对应变和温度的灵敏监测和实时区分。该传感器具有独立的应变和温度感知机制。一方面，结合磁弹性体的磁弹效性和 Co 基非晶丝的巨磁阻抗效应可以实现应变灵敏探测；另一方面，用于阻抗输出的热电偶线圈具有显著的塞贝克效应，可以同时实现温度的检测。基于独立的感应机制，温度和应变信号之间不存在相互耦合。最终，该传感器实现了 0.05% 的应变和 0.1 °C 的低探测极限，5.29 和 54.9 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 的较高应变和温度感知灵敏度。最后，该研究将所设计的双模传感器与织物集成，可以同时用于人体微小应变的探测，比如呼吸和吞咽等检测，也可用于膝盖弯曲等较大应变的探测，同时也能实现体温或环境温度的实时监测。在健康监测、智慧医疗以及人机交互领域具有良好的应用前景。

关键词：Co 基非晶丝、双模态传感器、磁弹效应、塞贝克效应、智能可穿戴电子

44-13

本征导电及纳米尺度下可重构的液态金属纳米胶囊

徐 丹 1, 尚 杰 1, 刘宜伟 1 李润伟 1

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程所 磁性材料重点实验室, 浙江 宁波 315201)

液态金属 (LM)，尤其是基于镓的合金，已经成为人工皮肤不可或缺的材料，在可穿戴的预防医学、基于人工智能的人机界面、运动健康监测等领域具有巨大潜力。为了提高其不同 LM-弹性体界面、高分辨率电路以及动态自愈合装置中的加工性能，纳米级别的 LM 材料被广泛采用。然而，LM 纳米颗粒上天然形成的电氧化层 (Ga_2O_3) 会阻碍电子传输，使原始 LM 纳米颗粒即使在紧密堆积时也不导电。已经开展了一些尝试，例如机械激活和化学辅助侵蚀，以消除这种电障碍，但导致其他问题，包括电路短路、弱化界面粘接和意想不到的激活。本论文提出一种具有本征导电性的 LM 纳米胶囊来解决这些问题。该胶囊通过铂负载的氧化还原石墨烯 (Pt/rGO) 原位包裹，导电性高达 $1.2 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$ 。Pt/rGO 二维包覆层可以通过聚电解质 (PSS) 静电作用辅助原位包裹在 LM 纳米颗粒上，以实现纳米胶囊外壳的导电性。LM 纳米胶囊具有形貌高度紧凑和力学可重构的特点，可用于制备高导电性电路。LM 纳米胶囊对外部刺激，包括长期暴露（在溶剂中长达 7 天，在空气中长达 30 天）和机械变形（在 100% 应变下经过 5000 次拉伸循环后， $\Delta R/R_0 < 4\%$ ），保持化学和机械稳定性。LM 胶囊墨水易于设计高分辨率电路（约 70 μm ）并制造用于机器人感知皮肤和实时健康监测技术的电子纹身。**关键词：**液态金属；可重构胶囊；核壳结构；聚电解质；电子纹身

44-14

基于硬磁软材料的弹跳失稳柔性机器人

张迎超 俞璟

(1. 南洋理工大学 材料科学与工程学院, 新加坡 639798;

硬磁软材料是由硬磁颗粒与柔性弹性体构成的刺激响应性软材料。在外加磁场的作用下, 其能够发生可控变形, 具备响应速度快、变形可编程、无线可控等特点。基于硬磁软材料, 我们设计了一种双稳态结构, 具有存储与快速释放弹性能的能力, 并展示了其在跳跃机器人方面的应用。我们建立了相应的力学理论模型, 以追踪该双稳态结构在磁场作用下的快速翻转屈曲不稳定性及后屈曲演化过程。与传统的双稳态结构不同, 基于硬磁软材料的双稳态结构设计需要考虑两个关键参数: 即双稳态结构的磁化分布和外部磁场方向。基于所发展的力学模型, 我们确定了的最佳磁化分布位置以及外磁场的方向, 可极大降低所需磁场。进一步的, 我们制备了基于这一优化设计的弹跳机器人。在外磁场的作用下, 该双稳态结构首先发生弹性变形, 储存弹性势能, 在达到临界点后发生突跳失稳, 将其所存储的弹性势能转化为动能, 撞击地面, 实现跳跃。

关键词: 硬磁软材料; 双稳态结构; 屈曲失稳; 磁场; 弹跳机器人

44-15

基于三维线圈的 NdFeB / PDMS 基柔性电磁致动器

董智超 1,2, 王雅新 1, 杜琦峰 2, 3, 赵晓宇 1

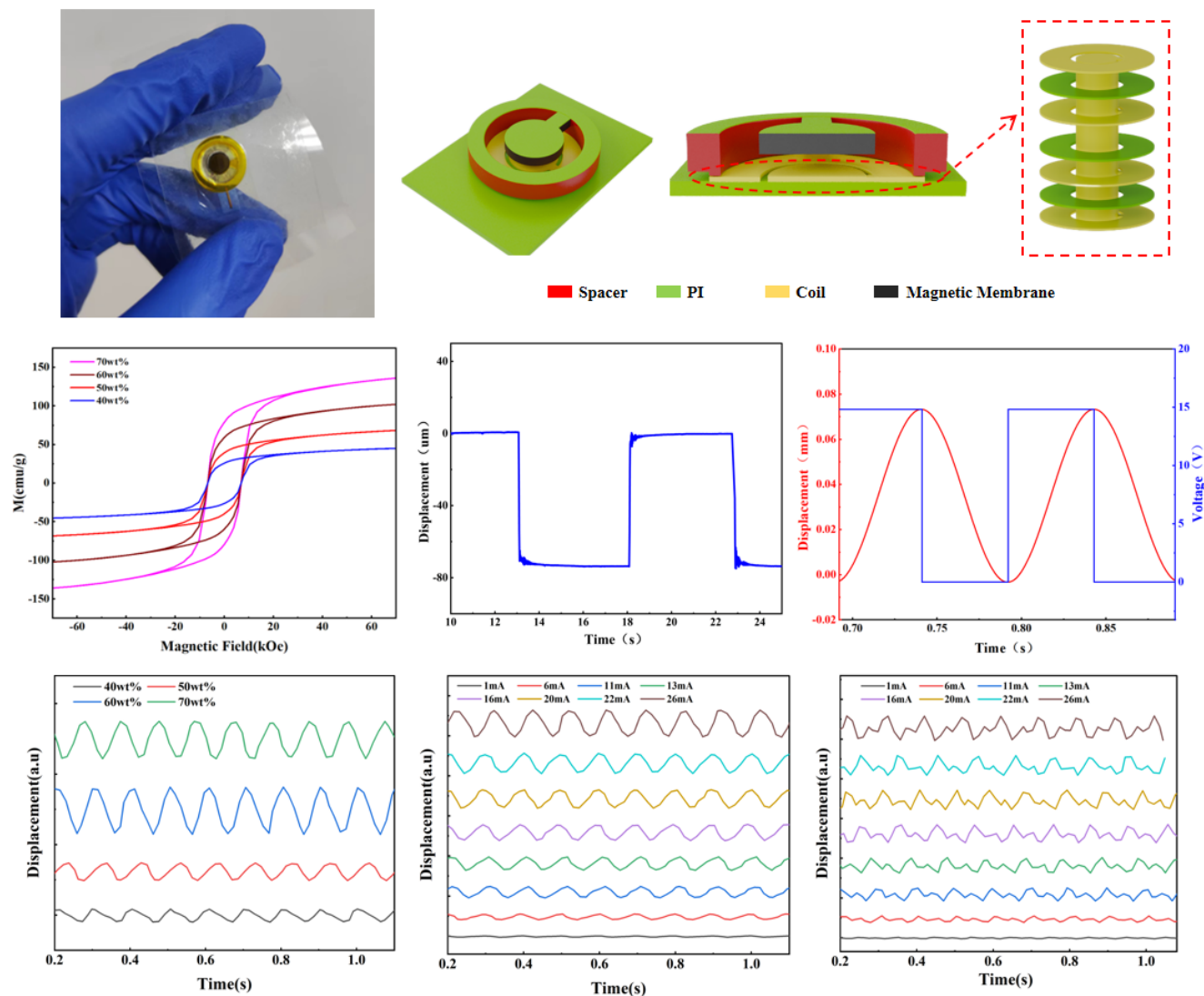
(1. 杭州电子科技大学 材料与环境工程学院, 杭州 310018;

2. 钱塘科技创新中心 芯片与智能微系统研究所, 杭州 310018;

3. 浙江清华柔性电子技术研究院, 浙江嘉兴 314000)

随着虚拟现实技术 (VR) 的发展, 触觉反馈引起了人们对视觉和听觉模拟的极大兴趣。目前, 触觉反馈大多是基于刚性装置, 难以满足舒适性的要求。本文提出了一种完全柔性的电磁致动器, 其磁膜悬浮在由软电磁感应线圈支撑的柔性电磁感应线圈上。这种制造策略允许执行器的整个体积减少到一个小的尺寸 $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ 。该复合磁性膜由 NdFeB 磁性粒子以一定比例嵌入到 PDMS 聚合物基质中。采用物理气相沉积和光刻技术制备了一个尺寸为 $150 \text{ nm} \times 7$ 层的三维线圈。该致动器允许两种振动和非振动状态的运动, 这是通过改变用于测试磁膜变形特性的电流类型来实现的。当膜厚度为 $500 \mu\text{m}$ 时, NdFeB 在磁膜中的质量比为 60% wt 时, 可获得最佳性能。位移和激励电流之间的线性关系范围 $1 \text{ mA} \sim 26 \text{ mA}$ 磁膜在振动状态和非振动状态允许我们控制位移大小通过调节输入电流, 这证明了潜在的灵活的电磁致动器触觉反馈应用。这种柔性电磁致动器可用于触觉反馈, 其中振动模式可以有效地产生触觉信号, 而非振动模式可以有效地控制触觉信号的大小。

关键词: 柔性电磁致动器; 电磁感应; 复合磁膜; 运动模式; 触觉反馈



44-16

基于芯片表面施加保护力的新型柔性芯片剥离工艺

孔子文 1, 史柯文 1, 陈思宇 1*

1 同济大学航空航天与力学学院, 上海 邮编: 200092

*邮箱: sychen@tongji.edu.cn

柔性超薄芯片的剥离拾取与转移是电子封装的核心技术之一, 直接影响到电子器件封装成品的成本、可靠性与寿命。对于芯片的剥离过程, 学者大多将其看作芯片脱粘和芯片碎裂两者间的竞争关系。在芯片剥离过程中造成的任何细微损坏都可能导致超薄芯片失效或损坏, 若要从根本上解决超薄芯片难剥离的问题, 则有必要从理论上理解芯片剥离工艺机理, 创新剥离工艺, 并定量地给出行之有效的优化准则。

现有的工艺常采用顶针推顶与真空拾取配合来实现芯片的剥离, 剥离过程中芯片上表面常由于拉应力过大而产生破坏。本研究以此为基础对芯片上表面施加下压保护力, 创新地提出基于保护力的超薄芯片的剥离优化工艺。本文从理论上解释基于保护力的芯片剥离工艺机理, 建立芯片脱粘与碎裂的耦合关系。针对保护力作用下的芯片剥离工艺中的力学优化问题进行了深入、系统的理论研究和数值仿真, 并通过实验加以验证。本文首次提出了无量纲保护指数的概念, 通过理论建模与无量纲分析, 揭示了保护力分布形式、粘接结构几何尺寸以及材料属性等因素对芯片剥离中保护力的影响机制。研究表明: 1. 保护力最佳作用位置为芯

片中心处；2. 保护力最优取值仅受基底与芯片长度比值 $l_{\text{substrate}}/l_{\text{chip}}$ 的影响；3. 在最优保护力取值下，仅靠保护力与顶针推力配合完成芯片剥离即可，无需切换真空拾取工艺辅助剥离。最后通过改装真空探头进行实验，在芯片剥离过程中同步施加顶针推力和保护力，验证了施加保护力的工艺方法的可行性与有效性。

关键词：柔性电子，超薄芯片，能量释放率，粘接结构，保护指数

参考文献

[1]Siyu C,Wenhan L,Gang W, et al. Mechanics analysis of ultra-thin chip peeling from substrate under multi-needle-ejecting and vacuum-absorbing[J]. International Journal of Solids and Structures,2021,224.