



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 121230921 A

(43) 申请公布日 2025. 12. 30

(21) 申请号 202511447601.1

(22) 申请日 2025.10.11

(71) 申请人 浙江理工大学

地址 310000 浙江省杭州市钱塘区白杨街
道2号大街928号

(72) 发明人 刘爱萍 王光超 周家豪 程琳

(74) 专利代理机构 杭州敦和专利代理事务所
(普通合伙) 33296

专利代理师 冯海军

(51) Int. Cl.

G01L 1/14 (2006.01)

B82Y 40/00 (2011.01)

B82Y 15/00 (2011.01)

G01L 9/12 (2006.01)

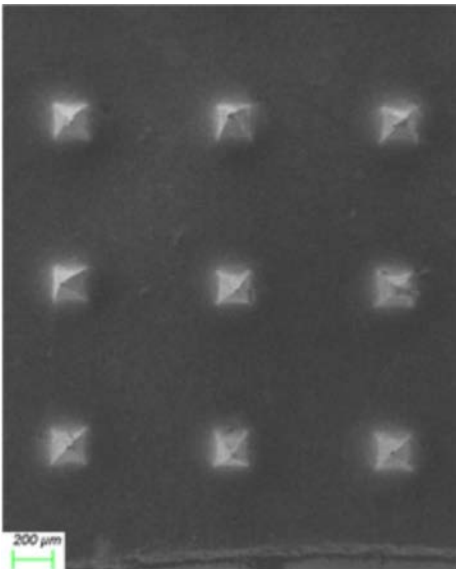
权利要求书1页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于FPC技术的电容式柔性传感阵列及其制备方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于FPC技术的电容式柔性传感阵列及其制备方法,将特定质量比的PVDF-TrFE与离子盐[BMIM/Br]在交联剂作用下制备成离子薄膜介电层,通过微针结构模具赋予其特定的四棱锥微结构;并结合FPC技术制备通道复用的上下电极层,最终通过真空热压键合封装成传感阵列。本发明的核心创新在于通过离子双电层效应、微结构应力集中与FPC电极复用设计三者的协同作用,同时实现了超高灵敏度(0-20kPa区间灵敏度 $>30\text{ kPa}^{-1}$)与低串扰(阵列串扰率 $<5\%$)。所述微针结构的局域化形变特性有效约束了边缘电场扩散,从物理结构上解决了高密度阵列的串扰难题,为柔性电子在精密触觉感知领域的应用提供了关键技术。



1. 一种基于FPC技术的电容式柔性传感阵列的制备方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1. 介电层离子溶液的制备:将浓度为99.1~99.7%的N,N-二甲基甲酰胺(DMF)作为溶剂,称取PVDF-TrFE和离子盐[BMIM/Br]加入到溶剂中,搅拌溶解离子盐后,加入己二胺(HMDA)作为交联剂,置于60℃水浴锅中恒温搅拌10-12h,得到离子盐溶液;所述PVDF-TrFE与[BMIM/Br]的质量比为(0.5-0.7):(0.3-0.5);

S2. 介电层离子薄膜的制备:将离子盐溶液经过预热后均匀的滴至微针结构模具;然后将模具放入真空机中抽真空处理;随后,将带着离子盐溶液的模具放入烘箱中进行烘干,待其完全固化后,将其从模具上剥脱,得到带微结构的离子薄膜;

S3. FPC电极层的制备:在PI基材表面涂覆光刻胶,利用紫外曝光将电极图案转印至光刻胶层,经显影后形成抗蚀刻掩膜;通过氯化铁溶液对未保护区域的铜箔进行选择去除;完成蚀刻后,采用沉金工艺对裸露铜层进行化学镀镍浸金处理,形成一定厚度的镍金复合保护层;通过层压工艺在电极表面覆盖PI保护膜,并利用激光钻孔或机械冲孔实现上下电极层的导通孔加工;最后,将制备完成的FPC电极层与介电层进行对准贴合,在真空热压条件下完成界面键合与传感器封装;

S4. FPC基电容式柔性压力传感阵列的制备:将介电层按照电极层采集区域大小通过紫外切割成相应的方形,置于两个FPC电极层中间,并采用紫外切割而成的EVA海绵双面胶作为封装,在真空热压条件下完成键合封装,得到所述高灵敏度和稳定性的电容式柔性传感器阵列。

2. 根据权利要求1所述的基于FPC技术的电容式柔性传感阵列的制备方法,其特征在于:S3中镍金复合保护层的厚度为0.05~0.15 μm 。

3. 根据权利要求1所述的基于FPC技术的电容式柔性传感阵列的制备方法,其特征在于,S2中所述四棱锥形微结构的高度(H)为50-200 μm ,底面间距(Dp)为800-1000 μm ,纵横比(高度与底边宽度之比)为1.5:1至3:1。

4. 一种由权利要求1-3任一项所述方法制备的电容式柔性传感阵列,其特征在于,该阵列在0-20kPa压力区间的灵敏度高于30 kPa^{-1} ,且在工作状态下,其单元间的电容串扰率低于5%。

一种基于FPC技术的电容式柔性传感阵列及其制备方法

技术领域

[0001] 本发明涉及离子电子与柔性传感技术领域,具体地涉及基于FPC技术的电容式柔性传感阵列的制备方法。

背景技术

[0002] 在离子电子与柔性传感技术领域,双电层电容效应(EDL)的离子电子传感技术为柔性电子领域带来了革命性突破。该技术通过电解质-电极界面形成的纳米级电荷分离层,可在微小压力下产生显著的电容变化。这种界面超电容效应使得单位面积电容值提升达三个数量级,同时兼具优异的抗电磁干扰特性。通过引入空气间隙和梯度介电结构设计,不仅能降低传感器初始刚度,还能在压力作用下实现介电常数动态调制,这种双重增效机制为灵敏度提升开辟了新维度。

[0003] 在实现本发明的过程中,发明人发现现有技术至少存在以下问题:1.柔性传感器在性能优化与应用拓展上受限,其主要体现在两个方面:①柔性传感器需在复杂环境中工作并承受各类形变,稳定性与可靠性方面存在不足。②重复的拉伸和弯曲操作极易致使传感器性能下滑,这严重限制了其在长期稳定工作场景中的应用。2.在密度柔性传感阵列里,串扰问题较为突出。相邻传感器单元间因电场边缘效应容易产生信号串扰,进而降低传感器的空间分辨率与测量精度,特别是在需要精准感知并区分多个触觉点的应用场景中,如机器人精密抓取、触觉映射等,现有技术难以在保证高灵敏度的同时实现低串扰,成为制约其高端应用的关键瓶颈。

发明内容

[0004] 针对现有技术的不足,本发明提供了一种基于FPC技术的电容式柔性传感阵列的制备方法,其技术特征在于采用PVDF-TrFE/[BMIM/Br]复合介电层并通过微针模具赋予四棱锥微结构,结合FPC电极层实现阵列化封装,从而获得高灵敏度和低串扰。。

[0005] 为了实现上述目的,本发明采用的技术方案如下:一种基于FPC技术的电容式柔性传感阵列的制备方法,包括以下步骤:

[0006] S1.介电层离子溶液的制备:将浓度为99.1~99.7%的N,N-二甲基甲酰胺(DMF)作为溶剂,称取PVDF-TrFE和离子盐[BMIM/Br]加入到溶剂中,搅拌溶解离子盐后,加入己二胺(HMDA)作为交联剂,置于60℃水浴锅中恒温搅拌10-12h,得到离子盐溶液;所述PVDF-TrFE与[BMIM/Br]的质量比为(0.5-0.7):(0.3-0.5);

[0007] S2.介电层离子薄膜的制备:将离子盐溶液经过预热后均匀的滴至微针结构模具;然后将模具放入真空机中抽真空处理;随后,将带着离子盐溶液的模具放入烘箱中进行烘干,待其完全固化后,将其从模具上剥脱,得到带微结构的离子薄膜;

[0008] S3.FPC电极层的制备:在PI基材表面涂覆光刻胶,利用紫外曝光将电极图案转印至光刻胶层,经显影后形成抗蚀刻掩膜;通过氯化铁溶液对未保护区域的铜箔进行选择去除;完成蚀刻后,采用沉金工艺对裸露铜层进行化学镀镍浸金处理,形成一定厚度的镍金

复合保护层;通过层压工艺在电极表面覆盖PI保护膜,并利用激光钻孔或机械冲孔实现上下电极层的导通孔加工;最后,将制备完成的FPC电极层与介电层进行对准贴合,在真空热压条件下完成界面键合与传感器封装;

[0009] S4.FPC基电容式柔性压力传感阵列的制备:将介电层按照电极层采集区域大小通过紫外切割成相应的方形,置于两个FPC电极层中间,并采用紫外切割而成的EVA海绵双面胶作为封装,在真空热压条件下完成键合封装,得到高灵敏度和稳定性的电容式柔性传感器阵列。

[0010] 进一步地,S3中镍金复合保护层的厚度为 $0.05\sim 0.15\mu\text{m}$ 。

[0011] 进一步地,S2中所述四棱锥形微结构的高度(H)为 $50\sim 200\mu\text{m}$,底面间距(Dp)为 $800\sim 1000\mu\text{m}$,纵横比(高度与底边宽度之比)为 $1.5:1$ 至 $3:1$ 。

[0012] 一种电容式柔性传感阵列,该阵列在 $0\sim 20\text{kPa}$ 压力区间的灵敏度高于 30 kPa^{-1} ,且在工作状态下,其单元间的电容串扰率低于5%。

[0013] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0014] 1.本发明的离子薄膜电容式应变传感器通过离子-电子耦合机制实现了创新性传感模式。当极化电压作用于电极时,电解质中的反离子在界面处定向排列,形成具有纳米级间距的双电荷层结构。这种独特的双电层结构使界面电容值达到传统平板电容器千倍以上。离子薄膜电容式传感器通过体电导效应构建动态电阻-电容耦合网络,不仅具有超高灵敏度,还可通过电荷屏蔽效应抑制环境电磁干扰。

[0015] 2.本发明通过构建PVDF-TrFE、[BMIM/Br]离子盐复合体系,结合微针阵列结构,揭示了双电层电容效应主导的应变-电容动态响应机制:离子盐质量分数为30%时,介电层在 50 kPa 压力下电容变化率达275%,微针结构通过应力集中效应增强局部形变并促进空气间隙的动态闭合,实现了 $0\sim 15\text{ kPa}$ 低压区间的超高灵敏度(灵敏度为 12.7 kPa^{-1})。

[0016] 3.本发明通过设计与优化介电层表面的四棱锥微结构,发现其具备优异的抗串扰特性。该微结构在受压时产生的形变高度局域化,其形变区域半径远小于单元间距,有效约束了传感单元边缘电场的扩散,从物理结构上显著降低了单元间的电容耦合。实验表明,本发明制备的电容式柔性传感阵列,其单元串扰率可低至5%以下,实现了在高密度阵列条件下的低串扰和高信号保真度,适用于高分辨率柔性触觉感知应用。

附图说明

[0017] 图1是本发明中具有微锥形状的离子薄膜SEM示意图;

[0018] 图2是本发明中不同[BMIM/Br]与PVDF-TrFE质量比和离子电容薄膜性能关系示意图;

[0019] 图3是本发明的传感阵列在不同压力下相应灵敏度示意图;

[0020] 图4是本发明中介电层材料制备流程示意图;

[0021] 图5是本发明的柔性压力传感阵列的制备流程示意图;

[0022] 图6是本发明的制备方法流程示意图。

具体实施方式

[0023] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完

整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0024] 实施例一:

[0025] 如图1-图6所示,本实施例提供一种基于FPC技术的电容式柔性传感阵列的制备方法,包括以下步骤:

[0026] S1.介电层离子溶液的制备:量取9ml、浓度为99.3%的N,N-二甲基甲酰胺(DMF)作为溶剂,称取0.7g的PVDF-TrFE和0.3g离子盐[BMIM/Br]加入到溶剂中,搅拌溶解离子盐后,称取0.01g的己二胺(HMDA)作为交联剂,加入到上述溶液中,并将溶液置于水浴锅中加热到60℃,恒温搅拌12h后,得到离子盐溶液;

[0027] S2.介电层离子薄膜的制备:首先,制备具有四棱锥凸起阵列的PDMS柔性模具,该模具的微结构单元高度(H)为100μm,底面间距(Dp)为900μm,纵横比(高度与底边宽度之比)为2:1。将离子盐溶液经过预热后均匀的滴至微针结构模具;然后将模具放入真空机中抽真空30秒放气重复3次;随后,将带着离子盐溶液的模具放入70℃烘箱中进行烘干,待其完全固化后,将其从模具上剥脱,最终得到具有与模具互补的四棱锥凹坑阵列的离子薄膜;

[0028] S3.FPC电极层的制备:在PI基材表面涂覆光刻胶,利用紫外曝光将电极图案转印至光刻胶层,经显影后形成抗蚀刻掩膜;通过氯化铁溶液对未保护区域的铜箔进行选择去除;完成蚀刻后,采用沉金工艺对裸露铜层进行化学镀镍浸金处理,形成0.05μm的镍金复合保护层;通过层压工艺在电极表面覆盖PI保护膜,并利用激光钻孔或机械冲孔实现上下电极层的导通孔加工;最后,将制备完成的FPC电极层与介电层进行对准贴合,在真空热压条件下完成界面键合与传感器封装;

[0029] S4.FPC基电容式柔性压力传感阵列的制备:将介电层按照电极层采集区域大小通过紫外切割成相应的方形,置于两个FPC电极层中间,并采用紫外切割而成的EVA海绵双面胶作为封装,将三层结构封装在一起,得到高灵敏度和稳定性的传感器阵列。

[0030] 为了验证基于FPC技术的电容式柔性传感阵列抗串扰性能的优势,开展了抗串扰性能测试实验

[0031] 1.实验目的

[0032] 验证本发明制备的柔性传感阵列相较于传统无结构或大间距结构阵列在抑制信号串扰方面的优势。

[0033] 2.测试样品

[0034] 实验组:实施例一制备的传感阵列(微针结构,H=100μm, Dp=900μm)。

[0035] 对照组:采用完全相同的材料和工艺制备,但介电层为无微结构的平整离子薄膜。

[0036] 3.测试方法

[0037] 参照典型触觉传感串扰测试方法。将传感阵列水平固定,使用球形探针向中心单元施加50kPa的准静态压力。使用精密LCR表同步记录被加压的中心单元及其四周相邻的单元的电容变化量(ΔC)。每组实验重复 5 次。串扰率(CT)计算公式为:

$$CT = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta C_{\text{adjacent},i} / n}{\Delta C_{\text{center}}} \times 100\% ,$$

[0038] 其中 ΔC_{adjacent,i} 为相邻单元的最大电容变化量, ΔC_{center} 为中心单元的电容变

化量,本实施例中 $n=4$ 。

[0039] 4.测试结果:

[0040]	样品类型	中心单元 ΔC (pF)	最大相邻单元 ΔC (pF)	平均串扰率 CT_{avg} (%)	最大串扰率 CT_{max} (%)
	本发明(实施例一)	12.5 ± 0.3	0.41 ± 0.05	3.28 ± 0.4	3.7
	对比例(无微结构)	8.7 ± 0.4	1.52 ± 0.12	17.47 ± 1.2	18.3

[0041] 实施例一的有益效果:实施例1制备的柔性传感阵列具有微锥形状的离子薄膜SEM结构如图1所示,图像显示介电层表面的微结构呈锥四棱锥形结构,根据电镜扫描图可知棱锥的整体纵横比约为2:1这样的纵横比使得棱锥在受压时的纵向形变量会相对较大,从而具备更优的缓冲与形变适应能力。两个微结构间的间距为 $900 \mu m$,微结构单元间呈较密集的排布。这种特定的结构不仅在保证良好力学性能的同时提升表面响应灵敏度,其局域化形变特性(形变区域半径远小于单元间距)更成为抑制单元间电场串扰的关键。与无微结构对照组相比,本发明所设计的四棱锥微结构介电层在相同单元间距下,将最大串扰率从约18%显著降低至4%以下,实现了在高密度阵列条件下的低串扰和高信号保真度,验证了其在结构设计上对于解决串扰问题的独特性和创造性。

[0042] 实施例二

[0043] 本实施例提供一种基于FPC技术的电容式柔性传感阵列的制备方法,其步骤与实施例一基本相同,区别在于微结构参数和离子溶液配比,以探究不同参数下的性能:

[0044] S1.介电层离子溶液的制备:量取9ml、浓度为99.5%的N,N-二甲基甲酰胺(DMF)作为溶剂,称取0.6g的PVDF-TrFE和0.4g离子盐[BMIM/Br]加入到溶剂中,搅拌溶解离子盐后,称取0.01g的己二胺(HMDA)作为交联剂,加入到上述溶液中,并将溶液置于水浴锅中加热到 $60^{\circ}C$,恒温搅拌11h后,得到离子盐溶液;

[0045] S2.介电层离子薄膜的制备:首先,制备具有四棱锥凸起阵列的PDMS柔性模具,该模具的微结构单元高度(H)为 $150 \mu m$,底面间距(Dp)为 $850 \mu m$,纵横比为2.5:1。将离子盐溶液经过预热后均匀的滴至微针结构模具;然后将模具放入真空机中抽真空30秒放气重复3次;随后,将带着离子盐溶液的模具放入 $70^{\circ}C$ 烘箱中进行烘干,待其完全固化后,将其从模具上剥脱;

[0046] S3.FPC电极层的制备:在PI基材表面涂覆光刻胶,利用紫外曝光将电极图案转印至光刻胶层,经显影后形成抗蚀刻掩膜;通过氯化铁溶液对未保护区域的铜箔进行选择去除;完成蚀刻后,采用沉金工艺对裸露铜层进行化学镀镍浸金处理,形成 $0.09 \mu m$ 的镍金复合保护层;通过层压工艺在电极表面覆盖PI保护膜,并利用激光钻孔或机械冲孔实现上下电极层的导通孔加工;最后,将制备完成的FPC电极层与介电层进行对准贴合,在真空热压条件下完成界面键合与传感器封装;

[0047] S4.FPC基电容式柔性压力传感阵列的制备:将介电层按照电极层采集区域大小通过紫外切割成相应的方形,置于两个FPC电极层中间,并采用紫外切割而成的EVA海绵双面胶作为封装,将三层结构封装在一起,得到高灵敏度和稳定性的传感器阵列。

[0048] 实施例二的有益效果:实施例二制备的柔性传感阵列在不同[BMIM/Br]与PVDF-TrFE质量比和离子电容薄膜性能如图2所示,力学性能测试显示,离子盐的塑化效应导致材料弹性模量呈系统性下降,这一现象源于离子液体分子对聚合物链段运动的增塑作用削弱了材料的结构刚性,但在相同压力下随着离子液体浓度的不断增加,介电层的双电层电容

效应显著增强,介电层薄膜的相对电容变化在不断增大。其作用机制可归因于离子浓度的提升增加了电极界面处可迁移电荷载流子密度,从而强化了双电层界面的极化响应。此外,因其微结构具有更高的纵横比,在低压下具有更极端的应力集中效应,有助于获得更高的初始灵敏度。同时,保持适中的单元间距,在空间分辨率和抗串扰性能之间取得良好平衡。

[0049] 实施例三

[0050] 本实施例提供一种基于FPC技术的电容式柔性传感阵列的制备方法,包括以下步骤:

[0051] S1.介电层离子溶液的制备:量取9ml、浓度为99.7%的N,N-二甲基甲酰胺(DMF)作为溶剂,称取0.5g的PVDF-TrFE和0.5g离子盐[BMIM/Br]加入到溶剂中,搅拌溶解离子盐后,称取0.01g的己二胺(HMDA)作为交联剂,加入到上述溶液中,并将溶液置于水浴锅中加热到60℃,恒温搅拌10h后,得到离子盐溶液;

[0052] S2.介电层离子薄膜的制备:首先,制备具有四棱锥凸起阵列的PDMS柔性模具,该模具的微结构单元高度(H)为70μm,底面间距(D_p)为950μm,纵横比为1.5:1。将离子盐溶液经过预热后均匀的滴至微针结构模具;然后将模具放入真空机中抽真空30秒放气重复3次;随后,将带着离子盐溶液的模具放入70℃烘箱中进行烘干,待其完全固化后,将其从模具上剥脱;

[0053] S3.FPC电极层的制备:在PI基材表面涂覆光刻胶,利用紫外曝光将电极图案转印至光刻胶层,经显影后形成抗蚀刻掩膜;通过氯化铁溶液对未保护区域的铜箔进行选择性的去除;完成蚀刻后,采用沉金工艺对裸露铜层进行化学镀镍浸金处理,形成0.08μm的镍金复合保护层;通过层压工艺在电极表面覆盖PI保护膜,并利用激光钻孔或机械冲孔实现上下电极层的导通孔加工;最后,将制备完成的FPC电极层与介电层进行对准贴合,在真空热压条件下完成界面键合与传感器封装;

[0054] S4.FPC基电容式柔性压力传感阵列的制备:将介电层按照电极层采集区域大小通过紫外切割成相应的方形,置于两个FPC电极层中间,并采用紫外切割而成的EVA海绵双面胶作为封装,将三层结构封装在一起,得到高灵敏度和稳定性的传感器阵列。

[0055] 实施例三的有益效果:实施例三制备的传感阵列在不同压力下相应灵敏度示意图如图3所示,可以看到,传感器灵敏度呈现显著的非线性双阶段特征:在0~20 kPa低压区间内,灵敏度高达37.35 kPa⁻¹,此时介电层微结构处于弹性变形阶段,[BMIM/Br]离子薄膜微结构形变,在电极间形成动态导电通路,通过双电层效应显著提升界面电荷密度,驱动电容值随压力快速线性增长。当压力超过临界值20 kPa后,灵敏度急剧下降至2.48 kPa⁻¹,表明介电层微结构已完全压缩,电极与介电层接触面积达到饱和状态。表明通过调控接触界面的应力分布梯度,诱导局部弹性变形集中效应,为高灵敏度宽量程检测提供了新策略。此外,其微结构纵横比较低,具备更好的机械鲁棒性和使用寿命,同时较大的单元间距为低串扰提供了先天优势,非常适合对可靠性要求高的应用场景。

[0056] 为了验证实施例一至实施例三柔性传感阵列在力学性能及电学灵敏度的优势,设置了以下对比实验:

[0057] 1.实验目的

[0058] 验证实施例一至实施例三柔性传感阵列在力学性能及电学灵敏度方面的优势,对比现有技术(纯PVDF-TrFE及纯[BMIM/Br]复合材料)的局限性。

[0059] 2. 实验组与对照组

组别	材料组成	制备参数	实验编号
实施例一	99.3%DMF+0.7gPVDF-TrFE+0.3g [BMIM/Br]	交联条件:60℃,12h	Exp-1
实施例二	99.5%DMF+0.6gPVDF-TrFE+0.4g [BMIM/Br]	交联条件:60℃,11h	Exp-2
实施例三	99.7%DMF+0.5gPVDF-TrFE+0.5g [BMIM/Br]	交联条件:60℃,10h	Exp-3
对照组1	纯PVDF-TrFE介电层(无[BMIM/Br])	PVA 1g,同实施例二条件	Control-1
对照组2	纯[BMIM/Br]离子薄膜(无PVDF-TrFE)	[BMIM/Br]1g,干燥成膜	Control-2
现有技术*	一种柔性电容式触觉传感阵列及工艺方(CN113155160A)	交联条件:60-100℃,30m-2H	Prior Art

[0061] 3. 实验步骤及参数

[0062] (1) 力学性能测试

[0063] 测试设备:力学试验机(MX-0350)。

[0064] 测试参数:拉伸速率为10 mm/min。

[0065] 刚度系数:记录应变可承受前的压力-应力曲线斜率。

[0066] 拉伸强度:试样断裂前的最大应力值。

[0067] (2) 电学灵敏度测试

[0068] 测试设备:LCR数字电桥。

[0069] 测试参数:3×3传感器阵列。

[0070] 测试方法:首先,将3×3传感阵列样品水平固定于测试平台,确保压力均匀作用于各单元。然后,通过加载装置对阵列施加阶梯式循环压力,0至100 kPa,压力梯度10 kPa,在每个压力梯度点执行5次加载-卸载循环。同步使用LCR测试系统实时记录各传感单元的电容变化。

[0071] 基于测试数据:(1) 分析各单元在相同压力点P下5次循环的 $\Delta C/C_0$ 变化,评估信号重复性;(2) 计算各单元在各压力点P下 $\Delta C/C_0$ 的平均值,以压力为横坐标、平均 $\Delta C/C_0$ 为纵坐标进行线性拟合,所得拟合斜率即定义为该单元的灵敏度系数(S),其表达式为:

$$[0072] \quad S = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta P}$$

[0073] (3) 微观形貌表征

[0074] 测试设备:场发射扫描电镜(FE-SEM, FEI Nova NanoSEM 450)。

[0075] 制样条件:纳米压印制锥四棱锥介电层,表面喷金处理。

[0076] 4. 实验结果对比分析

性能指标	Exp-1	Exp-2	Exp-3	Control-1	Control-2	Prior Art
刚度系数	390	595	761	215	973	434±25
压力强度(KPa)	14	10	18	11	7	10±5
S(0-20KPa)	37.75	32.91	34.03	<5(无功能)	10.24	30.18
形状恢复率(%)	98.5	92.5	94.5	40.25	无塑性变形能力	85.0±5
响应时间(ms)	125	174	113	470	-	200

[0078] 5. 结论

[0079] 实施例一至三通过调节PVDF-TrFE和[BMIM/Br]配比及交联条件,显著提升传感阵列的力学强度及电学灵敏度。

[0080] 介电层的薄膜的四棱锥形结构(图1 SEM)通过应力集中效应增强局部形变并促进

空气间隙的动态闭合,实现超高灵敏度。

[0081] 对比现有技术,本发明的S值提升35%以上,响应时间缩短至150ms以内,且形状恢复率达98.5%,满足高精度传感器需求。

[0082] 数据支持:实验结果与实施例一至三的附图及描述一致,验证了技术方案的创新性和实用性。

[0083] 尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,对于本领域的技术人员来说,其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

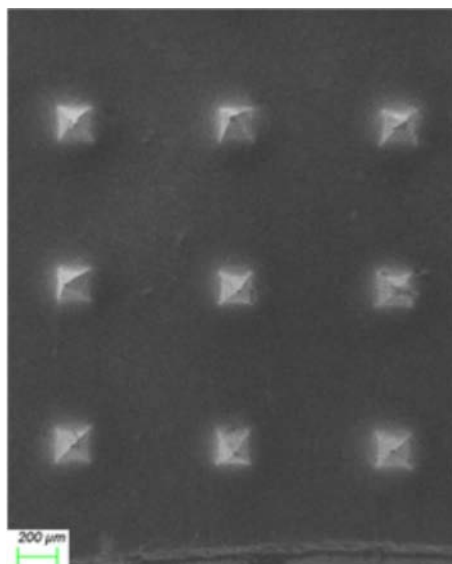


图1

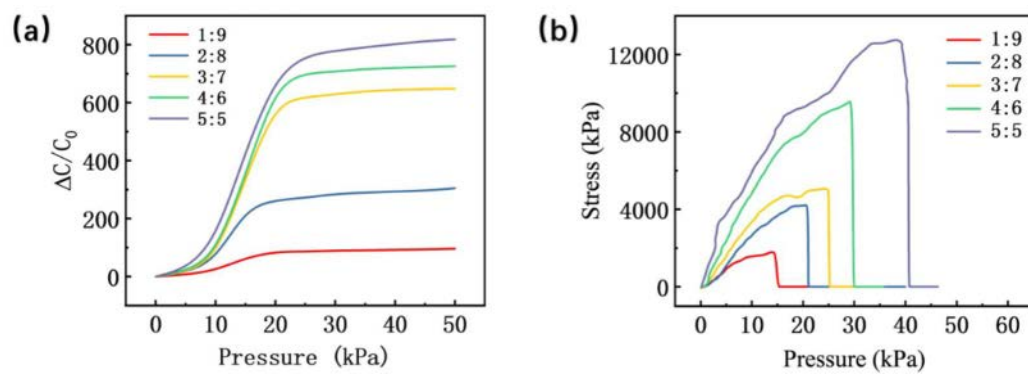


图2

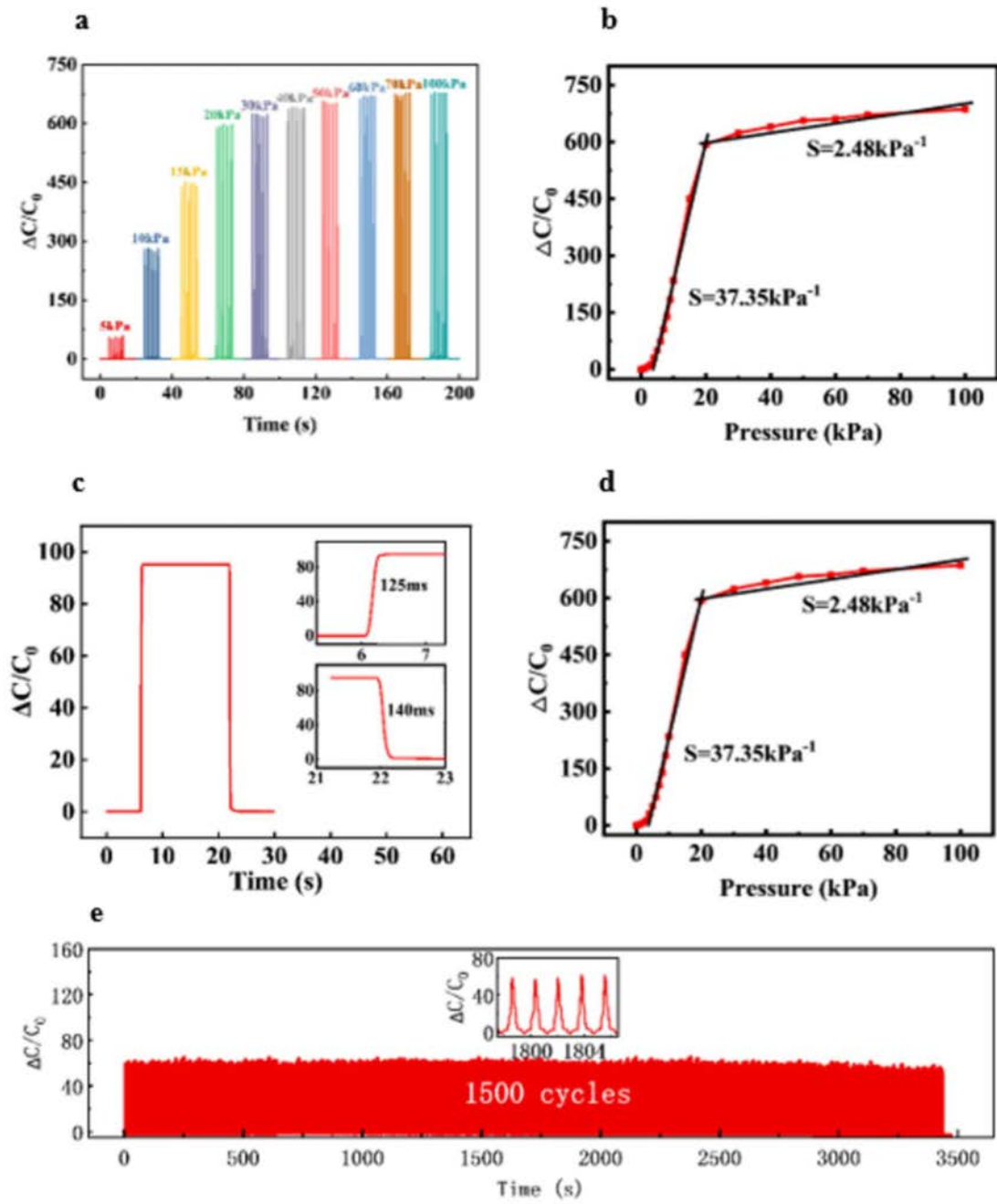


图3

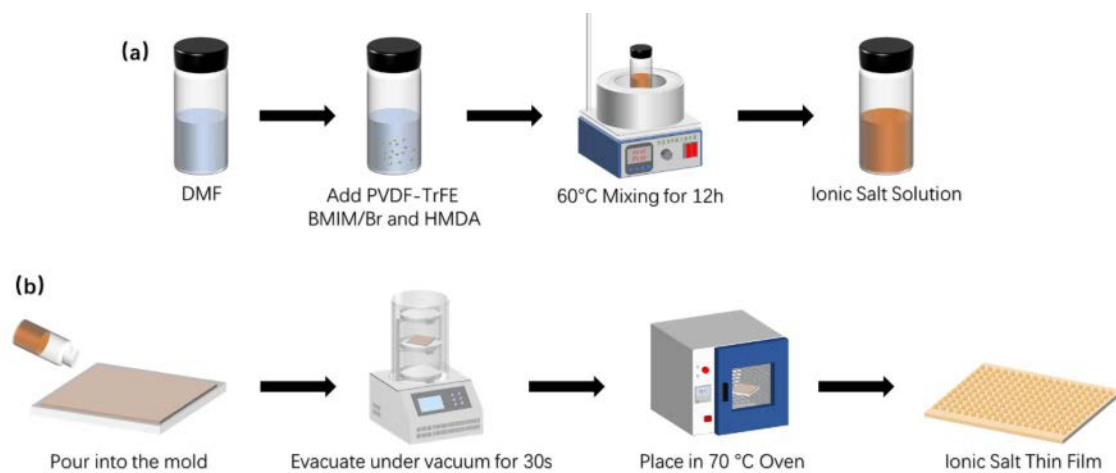


图4

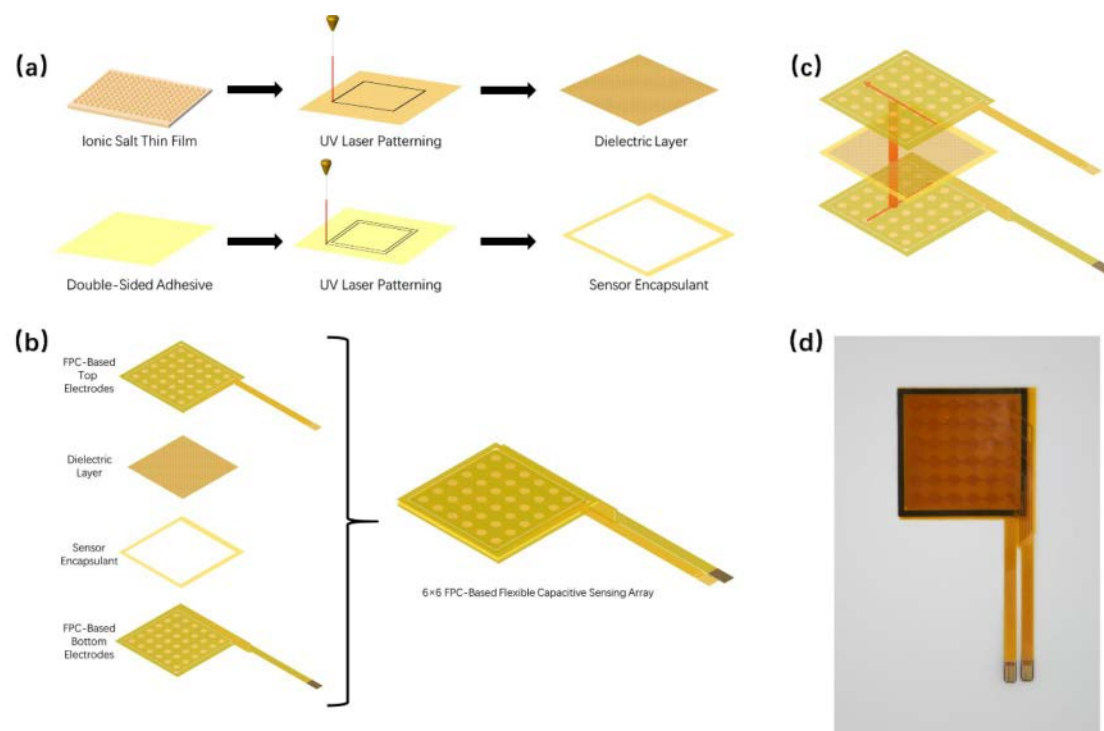


图5

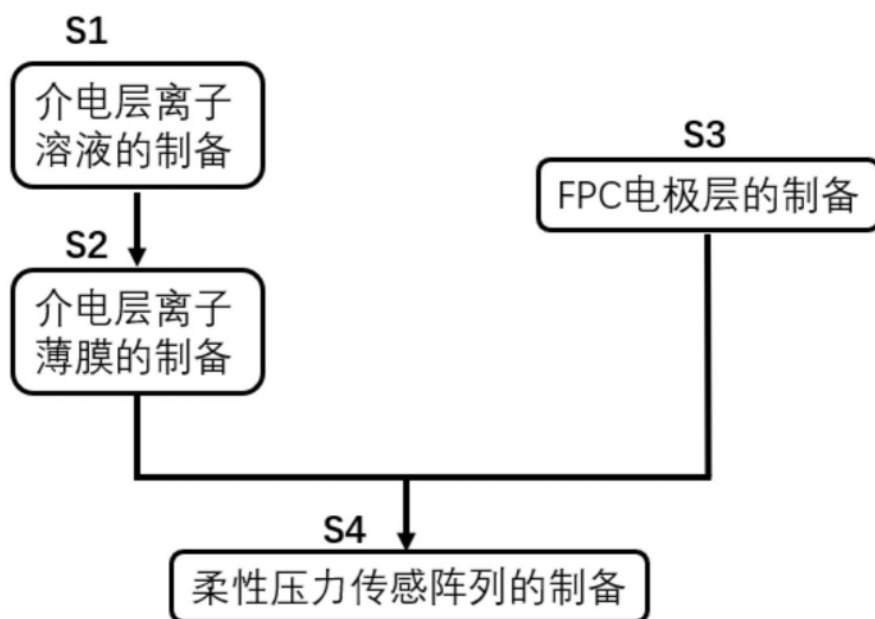


图6