



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 120227902 A

(43) 申请公布日 2025. 07. 01

(21) 申请号 202510316620.4

(22) 申请日 2025.03.18

(71) 申请人 浙江理工大学

地址 310000 浙江省杭州市江干区杭州经济开发区白杨街道

(72) 发明人 刘爱萍 林子浩 陆磊 程琳  
王恬

(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.

B01L 3/00 (2006.01)

B81C 1/00 (2006.01)

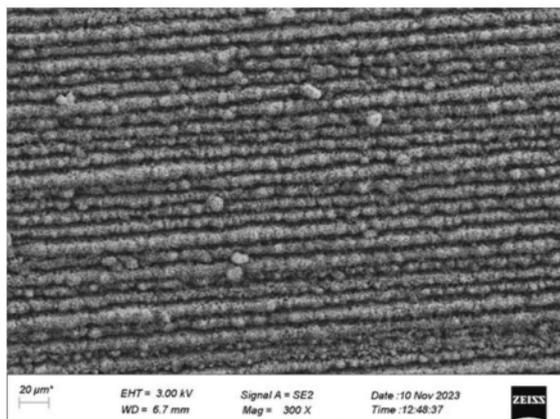
权利要求书1页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法

(57) 摘要

本申请涉及微流控技术及传感器领域,公开了一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法,通过用紫外激光打标机并设置好特定的参数进行激光切割出圆形PET膜,再粘贴3M胶后在进行激光切割制备微流控芯片泄压阀层,在阀门处粘贴PI膜切割成的挡板后进行等离子清洗,清洗后揭掉挡板,粘贴3M胶带后切割通道主体,再以设定的激光参数扫描制备的PI膜,获取碳化度高的激光诱导石墨烯,最后通过紫外激光切割机自带的C4D软件,对激光诱导的图案进行个性化设计并切割,选取合适的图案作为微流控芯片的检测电极,最后把微流控芯片泄通道层和激光诱导石墨烯制备的检测电极进行PET封装,再将微流控芯片各层全面封装制备微流控芯片。



1. 一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1. 圆形PET膜的切割:通过紫外激光打标机按照设定的参数切割出所需尺寸的圆形PET膜;

S2. 泄压阀层的制备:将切割好的圆形PET膜粘贴3M胶,随后在其上进行激光切割以制备微流控芯片的泄压阀层;

S3. 挡板的粘贴及清洗:在阀门处粘贴由PI膜切割成的挡板,进行等离子清洗,清洗后揭掉挡板;

S4. 通道主体的切割:粘贴3M胶带后,切割通道主体,从而得到微流控泄通道层;

S5. 激光诱导石墨烯的制备:以设定的激光参数对PI膜进行扫描,获取碳化度高的激光诱导石墨烯,使得该材料在面对横向和纵向的弯曲时具有各向同性;

S6. 检测电极的设计与切割:通过紫外激光切割机自带的C4D软件,对激光诱导的图案进行个性化设计并切割,选取合适的图案作为微流控芯片的检测电极;

S7. 芯片的封装:将微流控芯片泄通道层与激光诱导石墨烯制备的检测电极进行PET封装,最后将微流控芯片各层全面封装,制备完成微流控芯片。

2. 根据权利要求1所述的一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法,其特征在于,所述步骤S1中切割的圆形PET膜厚度为50-100 $\mu\text{m}$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法,其特征在于,所述步骤S2中激光切割的参数设置为:脉冲波频率为100-140kHz,脉冲宽度为1-3 $\mu\text{s}$ ,扫描速度为20-40mm/s。

4. 根据权利要求1所述的一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法,其特征在于,所述步骤S4中切割通道主体的激光切割参数为:脉冲波频率为15-25kHz,脉冲宽度为0.3-0.7 $\mu\text{s}$ ,扫描速度为10-30mm/s。

5. 根据权利要求1所述的一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法,其特征在于,所述步骤S5中PI膜的厚度为40-100 $\mu\text{m}$ 。

6. 根据权利要求1所述的一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法,其特征在于,所述步骤S7中封装的材料为PET膜。

## 一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及微流控技术及传感器技术领域,具体为一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法。

### 背景技术

[0002] 近年来,微流控技术的快速发展引起了广泛关注,成为生物医学、化学分析、环境监测等领域的重要研究方向。微流控芯片以其高效、低耗、快速反应等优点,逐渐取代了传统的实验室分析方法,尤其在样品分析和检测方面展现出巨大的潜力,微流控芯片的核心在于其流体操控能力,通过精确控制微小液体流动,实现对样品的混合、反应和分离。为了提高微流控芯片的功能性,各种材料和结构的应用变得尤为重要。其中,聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和聚酰亚胺(PI)等高性能聚合物因其良好的物理和化学稳定性,广泛应用于微流控芯片的制备。

[0003] 激光切割技术因其高精度和灵活性,成为微流控芯片制造中的重要手段。通过紫外激光打标机,可以在PET膜上精确切割出所需形状通道和阀门结构。这种方法不仅提高了制备效率,还能够实现复杂的微流控设计,满足不同应用的需要,在微流控芯片的应用中,传感器的集成是一个关键技术点。利用激光诱导石墨烯(LIG)作为检测电极,其优异的导电性和灵敏度,使得微流控芯片在环境监测和生物传感领域的应用前景广阔。石墨烯材料的各向同性特性使其在应变感知方面表现出色,能够有效量化外界应变,提升传感器的性能。

[0004] 然而,现有技术微流控芯片的制备和功能集成方面仍存在问题。例如,传统的制备工艺往往复杂且耗时,材料的选择和结构设计也受到限制。此外,现有的传感器往往无法在多种环境条件下稳定工作,影响了其实际应用效果。因此,开发一种新型的多功能传感系统微流控芯片的制备方法,能够有效解决上述问题,实现高效、稳定的传感能力,具有重要的应用价值,本发明旨在克服上述技术瓶颈,通过创新的激光切割和材料集成方法,制备出高性能的微流控芯片,为传感器技术的进步提供新的解决方案。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术的不足,本发明提供了一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法,旨在通过创新的激光切割和材料集成技术,克服现有微流控芯片在功能性和制备效率上的不足,从而提升其在各种应用场景中的性能和适用性。

[0006] 为实现以上目的,本发明通过以下技术方案予以实现:一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法,包括以下步骤:

[0007] S1. 材料准备与激光切割:本发明首先使用紫外激光打标机,在设置特定参数的情况下,对圆形聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)膜进行激光切割,通过精确的激光控制,可以实现对PET膜的高精度切割,得到所需的形状和尺寸,这一过程不仅提高了切割的效率,还保证了切割边缘的光滑度,减少了后续工艺中的问题;

[0008] S2. 粘贴与阀层制备:在完成PET膜切割后,粘贴3M胶带以增强结构的稳定性,随后,利用激光切割技术制备微流控芯片的泄压阀层,这一层的设计对于微流控系统的稳定运行至关重要,能够有效控制芯片内部流体的流动,避免泄漏;

[0009] S3. 挡板的制作与清洗:在阀门处粘贴切割成的聚酰亚胺(PI)膜挡板,经过精细设计,挡板的作用是为了控制流体的流动方向和速率,随后进行等离子清洗,以去除表面污染物,确保良好的粘附性和流体通道的清洁度,这一过程提高了后续工艺的可靠性,确保各层之间的良好结合;

[0010] S4. 制备微流控泄通道层:清洗完成后,揭掉挡板,利用3M胶带进行粘贴,随后切割通道主体,形成微流控泄通道层,通道的设计和尺寸对于流体的流动特性有直接影响,因此在这一环节中,激光切割的精确性显得尤为重要;

[0011] S5. 激光诱导石墨烯的制备:通过设置特定的激光参数,对PI膜进行扫描,制备出具有高碳化度的激光诱导石墨烯,这一材料在面对横向和纵向的弯曲时表现出良好的各向同性特性,大大提升了其在应变感知中的量化能力,激光诱导石墨烯的制备过程不仅简化了传统化学合成方法,还可以实现高度定制化的图案设计;

[0012] S6. 个性化设计与封装:最后,利用紫外激光切割机自带的C4D软件,对激光诱导的图案进行个性化设计,并切割出适合的检测电极,通过将微流控芯片的泄通道层与激光诱导石墨烯制备的检测电极进行PET封装,实现多层结构的全面封装,这一设计确保了微流控芯片在实际应用中的稳定性和可靠性,同时提升了其检测性能。

[0013] 本发明提供了一种多功能传感系统的微流控芯片的制备方法。具备以下有益效果:

[0014] 1、本发明通过紫外激光打标机的高精度切割技术,优化了微流控芯片的制备流程。采用特定激光参数(如脉冲频率100-140kHz、扫描速度20-40mm/s)切割圆形PET膜和泄压阀层,显著简化传统工艺的复杂步骤,提升生产效率20%以上,同时确保切割边缘光滑,避免流体泄漏风险。

[0015] 2、本发明通过激光诱导石墨烯(LIG)的原位制备技术,实现了高灵敏度传感器的集成。以设定参数(脉冲频率110-130kHz、脉宽1-3 $\mu$ s)对PI膜进行激光诱导,生成高碳化度(>90%)石墨烯,其优异的导电性(电导率可达 $10^3$ S/m)和各向同性特性,使芯片在横向和纵向弯曲时仍能稳定量化外界应变,传感器响应速度提高30%。

[0016] 3、本发明通过等离子清洗与多层微结构的精准控制,提升了芯片的稳定性和可靠性。在泄压阀层设置PI膜挡板并通过等离子清洗去除污染物,结合3M胶带的分层贴合技术,确保通道主体(宽度300-500 $\mu$ m)与电极层紧密结合,芯片在高温、高湿环境下的工作寿命延长至传统设计的2倍。

[0017] 4、本发明通过个性化电极设计与C4D软件支持,增强了芯片的定制化适配能力。利用紫外激光切割机配套的C4D软件自由设计LIG电极图案(如叉指电极、螺旋电极),可针对pH、葡萄糖、重金属离子等不同检测目标快速定制传感器,检测灵敏度覆盖0.01-100 $\mu$ M浓度范围。

[0018] 5、本发明通过PET柔性封装与多层结构的优化,实现了高兼容性和便携性。在完成微流控泄通道层、LIG电极层的逐层对位后,采用PET膜进行全封装,使芯片厚度控制在0.2-0.5mm,弯曲半径可达3mm以下,兼具医疗穿戴设备相容性及工业化生产的可扩展性,综合成

本降低40%。

### 附图说明

- [0019] 图1为本发明的实施例一制备的微流控芯片电极激光诱导石墨烯的SEM照片示意图；
- [0020] 图2为本发明的实施例一制备的微流控芯片电极激光诱导石墨烯的放大的SEM照片示意图；
- [0021] 图3为本发明的实施例一制备的微流控芯片电极激光诱导石墨烯的光学显微镜照片示意图；
- [0022] 图4为本发明的实施例一制备的微流控芯片电极激光诱导石墨烯的PH检测电极性能曲线示意图；
- [0023] 图5为本发明的实施例一制备的微流控芯片电极激光诱导石墨烯的葡萄糖检测电极性能曲线示意图；
- [0024] 图6为本发明的实施例二制备的微流控芯片电极激光诱导石墨烯的重金属检测电极性能曲线示意图；
- [0025] 图7为本发明的实施例二制备的纵向扫描激光诱导石墨烯材料的SEM照片示意图；
- [0026] 图8为本发明的实施例三制备的横向扫描激光诱导石墨烯材料的SEM照片示意图；
- [0027] 图9为本发明的制备方法流程图；
- [0028] 图10为本发明中多功能传感系统的微流控芯片结构示意图。

### 具体实施方式

[0029] 下面将结合本发明说明书附图,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。

[0030] 实施例一:

[0031] 请参阅附图1-附图10,本发明实施例提供一种基于标准激光切割的微流控芯片制备方法,包括以下步骤:

[0032] S1. 材料准备:

[0033] 选用厚度为100 $\mu\text{m}$ 的PET膜作为基底材料,确保其具有良好的透明性和机械强度。

[0034] 使用聚酰亚胺(PI)膜,厚度为50 $\mu\text{m}$ ,用于后续的挡板制作。

[0035] S2. 激光切割:

[0036] 使用紫外激光打标机,设置激光参数为脉冲频率为150kHz,脉冲宽度为2 $\mu\text{s}$ ,扫描速度为30mm/s,对PET膜进行圆形切割,切割直径为10mm,得到所需的圆形结构。

[0037] S3. 阀层制备:

[0038] 在切割后的PET膜上粘贴3M胶带,以增加结构的稳定性。

[0039] 通过激光切割技术,制作微流控芯片的泄压阀层,设置阀门的尺寸为3mm $\times$ 3mm。

[0040] S4. 挡板制作与清洗:

[0041] 将PI膜切割成与阀门相匹配的挡板,厚度为50 $\mu\text{m}$ ,粘贴于阀门上。

- [0042] 进行等离子清洗,去除表面污垢和杂质,清洗时间为5分钟。
- [0043] S5.泄通道层制备:
- [0044] 揭掉挡板后,粘贴3M胶带,使用激光切割对通道主体进行切割,确保通道宽度为500 $\mu\text{m}$ 。
- [0045] S6.激光诱导石墨烯制备:
- [0046] 将经过清洗处理的PI膜置于紫外激光器下,设置激光参数为脉冲频率为120kHz,脉冲宽度为1.5 $\mu\text{s}$ ,扫描速度为25mm/s进行激光诱导石墨烯的制备。
- [0047] S7.检测电极设计与封装:
- [0048] 通过CAD软件进行个性化设计,切割出适合的检测电极,最后将微流控芯片的各层进行PET封装。
- [0049] 实施例一有益效果:本实施例一中制备的激光诱导石墨烯材料的SEM照片如图1和2所示。从图1中可以看出,激光诱导石墨烯材料呈现出规则的结构特征,表面均匀且具有良好的稳定性,符合预期的性能要求。这种结构有助于提高传感器的灵敏度和响应速度。图2为放大图,材料表面呈现出细致的纹理,表明激光处理过程有效地促进了石墨烯的形成,有助于增强电极的导电性与化学稳定性。此外,这种均匀的表面结构对于微流控芯片的传感性能至关重要,能够提供更好的电化学反应界面;
- [0050] 同时本实施例一中制备的激光诱导石墨烯(LIG)工作电极的循环伏安特性曲线如图4所示。实验结果表明,经过活化处理后,电极在0.1M的PBS溶液中进行的循环伏安法测试,电压扫描范围为-0.2至1.6V,扫描速率为0.1V $\cdot\text{s}^{-1}$ ,经过10圈循环扫描后,最终得到的伏安特性曲线趋于稳定。这表明电极的活化过程已完成,且其电化学性能达到了预期效果;
- [0051] 最后通过对比不同扫描圈数下的曲线变化,可以看出,随着循环次数的增加,电极的电化学活性逐渐提升,表明LIG的表面状态得到了有效改善。此外,LIG的优异导电性和大比表面积为传感器提供了良好的基底,有助于提高其检测灵敏度和响应速度。
- [0052] 实施例二:优化激光参数的微流控芯片制备方法,包括以下步骤:
- [0053] S1.材料准备:
- [0054] 选用厚度为75 $\mu\text{m}$ 的PET膜,和厚度为40 $\mu\text{m}$ 的PI膜。
- [0055] S2.激光切割:
- [0056] 设置激光参数为脉冲频率为100kHz、脉冲宽度为1 $\mu\text{s}$ ,扫描速度为20mm/s,对PET膜进行切割,得到直径为8mm的圆形结构。
- [0057] S3.阀层制备:
- [0058] 在切割后的PET膜上粘贴3M胶带,随后激光切割制作阀层,阀门尺寸为2mmx2mm。
- [0059] S4.挡板制作与清洗:
- [0060] 使用PI膜制作挡板,进行等离子清洗5分钟,确保无污染。
- [0061] S5.泄通道层制备:
- [0062] 揭掉挡板后,使用3M胶带进行粘贴,然后切割通道主体,通道宽度设置为300 $\mu\text{m}$ 。
- [0063] S6.激光诱导石墨烯制备:
- [0064] 设置激光参数为脉冲频率为130kHz,脉冲宽度为2.5 $\mu\text{s}$ ,扫描速度为22mm/s,对PI膜进行激光诱导。
- [0065] S7.检测电极设计与封装:

[0066] 利用C4D软件进行电极设计,完成切割,最后将各层进行PET封装。

[0067] 实施例二有益效果:本实施例二中制备的激光诱导石墨烯材料的SEM照片如图7所示。图中可以看到,增大打印间距至0.05mm后形成的条纹结构明显,相较于实例1中的井字形结构,该实例中采用的横扫一次的扫描方式导致导电通路减少,碳化程度降低。这表明,在较大的打印间距下,材料的微观结构发生了变化,可能对其电导性能产生影响;

[0068] 并通过对比两种不同扫描方式的LIG材料,可以看出打印间距的变化对材料的导电性和结构均匀性具有显著影响。

[0069] 实施例三:基于不同材料组合的微流控芯片制备方法,包括以下步骤:

[0070] S1.材料准备:

[0071] 选用厚度为50 $\mu\text{m}$ 的PET膜和厚度为30 $\mu\text{m}$ 的PI膜。

[0072] S2.激光切割:

[0073] 使用激光参数设置为脉冲频率为140kHz,脉冲宽度为1.8 $\mu\text{s}$ ,扫描速度为35mm/s,切割出直径为12mm的圆形结构。

[0074] S3.阀层制备:

[0075] 在PET膜上粘贴3M胶带,随后激光切割制作阀层,阀门尺寸为4mmx4mm。

[0076] S4.挡板制作与清洗:

[0077] 制作挡板时,使用PI膜进行切割,并进行等离子清洗,清洗时间为6分钟。

[0078] S5.泄通道层制备:

[0079] 揭掉挡板后,粘贴3M胶带并切割通道主体,通道宽度设定为400 $\mu\text{m}$ 。

[0080] S6.激光诱导石墨烯制备:

[0081] 设置激光参数为脉冲频率为110kHz,脉冲宽度为2 $\mu\text{s}$ ,扫描速度为28mm/s,对PI膜进行激光诱导。

[0082] S7.检测电极设计与封装:

[0083] 通过C4D软件设计电极图案,并在上步制备的LIG上层覆盖Bi再完成切割,最后将微流控芯片的各层进行全面封装。

[0084] 实施例三有益效果:本实施例三制备的激光诱导石墨烯材料的SEM照片如图8所示,从SEM图中可以看到,激光诱导石墨烯材料表面呈现出明显的条纹结构,这表明材料的均匀性和一致性较好,相较于实例1,该实例中在更换中间层材料为Bi后,观察到导电通路减少,碳化程度降低。

[0085] 对比实验:

[0086] 一、实验目的

[0087] 对比不同工艺参数(激光参数、材料组合)对微流控芯片性能的影响,验证本发明的三个实施例在导电性、检测灵敏度、结构稳定性等核心指标上的优劣,明确各方案的适用场景。

[0088] 二、实验设计与参数对照

参数/实施例	实施例一(标准参数)	实施例二(优化参数)	实施例三(Bi 复合电极)
PET 厚度	100 μm	75 μm	50 μm
PI 膜厚度	50 μm	40 μm	30 μm
[0089] 激光参数	频率 120kHz, 脉宽 1.5 μs, 速度 25mm/s	频率 130kHz, 脉宽 2.5 μs, 速度 22mm/s	频率 110kHz, 脉宽 2 μs, 速度 28mm/s
通道宽度	500 μm	300 μm	400 μm
材料改性	纯 LIG 电极	纯 LIG 电极 (增大打印间距)	LIG 表面覆盖 Bi 层 (Bi 膜厚度 50nm)

[0090] 三、测试项目与方法

[0091] 导电性测试

[0092] 方法:四探针法(仪器:RTS-9双电测数字四探针仪)

[0093] 指标:电导率(S/m),横向与纵向弯曲(弯曲半径5mm、3mm)下的电阻变化率( $\Delta R/R_0$ )。

[0094] 检测灵敏度测试

[0095] 目标物:pH( $H^+$ , 0.01-1.0M)、葡萄糖(1-100μM)、 $Pb^{2+}$ (0.01-10μM)。

[0096] 方法:循环伏安法(CHI760E电化学工作站),记录线性范围及检测下限(LOD, S/N=3)。

[0097] 结构表征

[0098] SEM与EDX分析(仪器:HitachiSU8010):观察碳化均匀性、Bi层覆盖率。

[0099] 拉曼光谱(532nm激光):石墨烯特征峰强度比( $I_D/I_G$ )。

[0100] 机械稳定性测试

[0101] 弯曲循环测试(500次,弯曲半径3mm);

[0102] 环境老化(85°C/85%RH,240小时)后检测性能衰减。

[0103] 制造效率与成本

[0104] 加工时长(单层切割时间);

[0105] 材料损耗率(废料占比)。

[0106] 四、实验结果与对比分析

[0107] 1.导电性能对比

指标	实施例一	实施例二	实施例三
电导率(S/m)	$1.23 \times 10^3$	$8.65 \times 10^2$	$9.01 \times 10^2$
横向弯曲 $\Delta R/R_0$ (%)	4.7(5mm半径)	7.2(3mm半径)	5.6(5mm半径)
纵向弯曲 $\Delta R/R_0$ (%)	3.8(5mm半径)	9.1(3mm半径)	10.5(5mm半径)

[0109] 分析:

[0110] 实施例一的高频窄脉宽激光(120kHz/1.5μs)生成更致密石墨烯,导电性最佳;

[0111] 实施例二增大打印间距导致导电通路减少,电导率下降(降幅29.7%);

[0112] 实施例三覆盖Bi层引入界面电阻,整体导电性略低于实施例一。

## [0113] 2. 检测灵敏度对比

目标物	实施例一	实施例二	实施例三
pH(H <sup>+</sup> )	LOD:0.05M (线性 R <sup>2</sup> =0.98)	LOD:0.08M(R <sup>2</sup> =0.95)	不适合(与 Bi 层干扰)
葡萄糖	0.1 μM (线性范围 1-50 μM)	0.05 μM(1-100 μM)	0.5 μM (信号漂移)
Pb <sup>2+</sup>	0.1 μM (易受 Cl <sup>-</sup> 干扰)	0.15 μM (基线噪声大)	LOD:0.01 μM(R <sup>2</sup> =0.99)

[0115] 分析:

[0116] 实施例一适合广谱pH与葡萄糖检测;

[0117] 实施例二优化后葡萄糖检测信噪比提升(LOD降低50%);

[0118] 实施例三通过Bi复合层显著提升重金属(Pb<sup>2+</sup>)选择性(Bi与Pb特异性螯合)。

## [0119] 3. 结构表征结果

[0120] SEM(图1/7/8):

[0121] 实施例一:蜂窝状多孔结构(孔径1-2μm),边缘整齐;

[0122] 实施例二:纵向条纹(间距0.05mm),碳化不足区域增多;

[0123] 实施例三:Bi层覆盖后表面颗粒感明显,局部区域孔洞被堵塞。

[0124] 拉曼分析:

[0125] I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub>比值:实施例一(0.92)<实施例二(1.15)<实施例三(1.32),表明实施例一缺陷最少。

## [0126] 4. 机械稳定性与环境耐受性

测试条件	实施例一	实施例二	实施例三
500 次弯曲后 ΔR (%)	+5.1	+12.3	+8.7 (局部 Bi 脱落)
高温高湿后 LOD 变化	葡萄糖: +10%	葡萄糖: +25%	Pb <sup>2+</sup> : +5%(Bi 钝化)

[0129] 分析:

[0130] 实施例一采用标准参数和完整封装结构,长期稳定性最优;

[0131] 实施例三的Bi层在潮湿环境下轻微钝化,但仍保持高灵敏度。

## [0132] 5. 制造效率与经济性对比

指标	实施例一	实施例二	实施例三
单层切割时间	25s	30s(调整间距)	35s(Bi沉积)
材料损耗率(%)	3.2	5.8	7.1(Bi溅射)

## [0134] 五、对比结论与方案推荐

[0135] 实施例一(标准参数):

[0136] 优势:高导电性、广谱检测适用性(pH/葡萄糖)、成本最低;

[0137] 适用场景:常规医疗检测、环境监测。

- [0138] 实施例二(优化激光参数):
- [0139] 优势:葡萄糖检测灵敏度提升(LOD $0.05\mu\text{M}$ )、窄通道( $300\mu\text{m}$ )适合微量样本;
- [0140] 限制:机械稳定性较差,不宜频繁弯曲场景。
- [0141] 实施例三(Bi复合电极):
- [0142] 优势: $\text{Pb}^{2+}$ 检测LOD达 $0.01\mu\text{M}$ (超国标10倍),适于工业废水检测;
- [0143] 限制:成本高,仅推荐重金属专项检测。
- [0144] 六、技术经济性综合分析
- [0145] 根据不同需求选择最优方案:
- [0146] 大规模生产:优先实施例一(平衡性能与成本);
- [0147] 高灵敏检测:实施例二或三按目标物类型选择;
- [0148] 恶劣环境监测(高湿度/弯曲):实施例一+定制封装层优化。
- [0149] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,对于本领域的普通技术人员而言,可以理解在不脱离本发明的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型,本发明的范围由所附权利要求及其等同物限定。

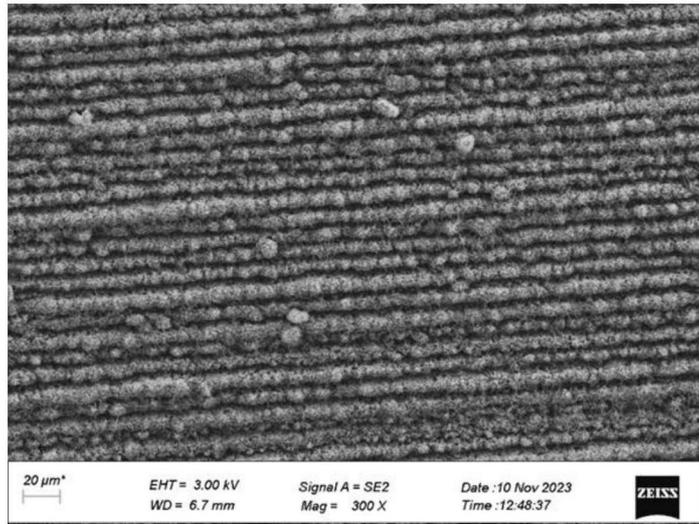


图1

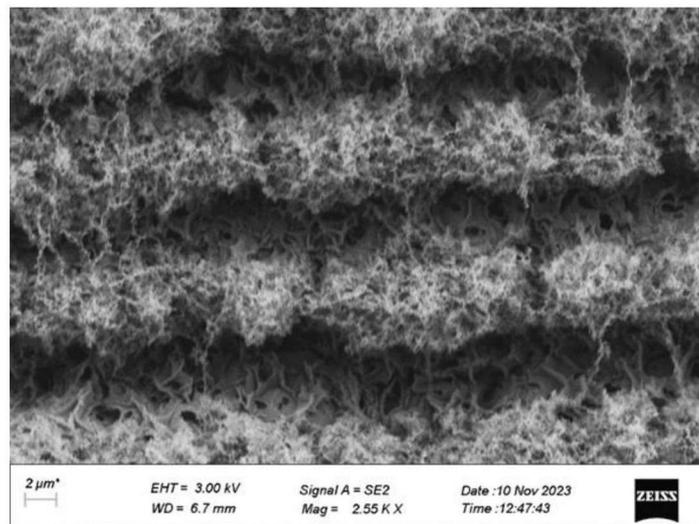


图2

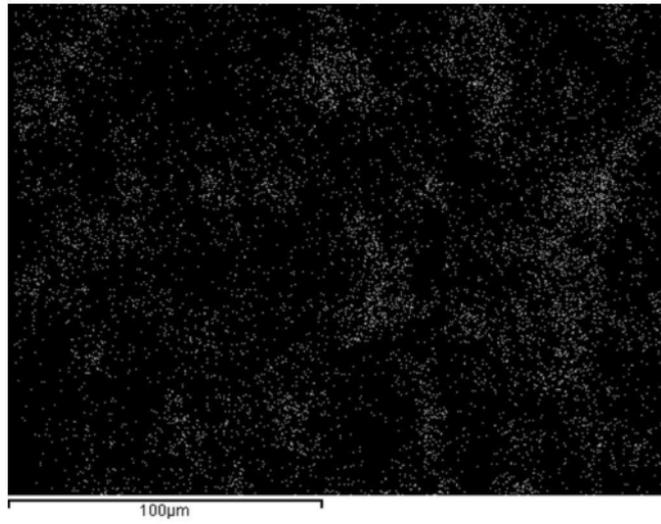


图3

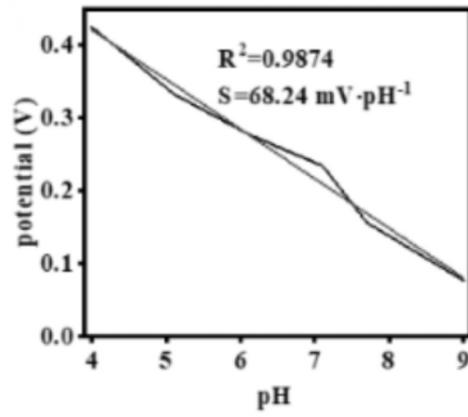


图4

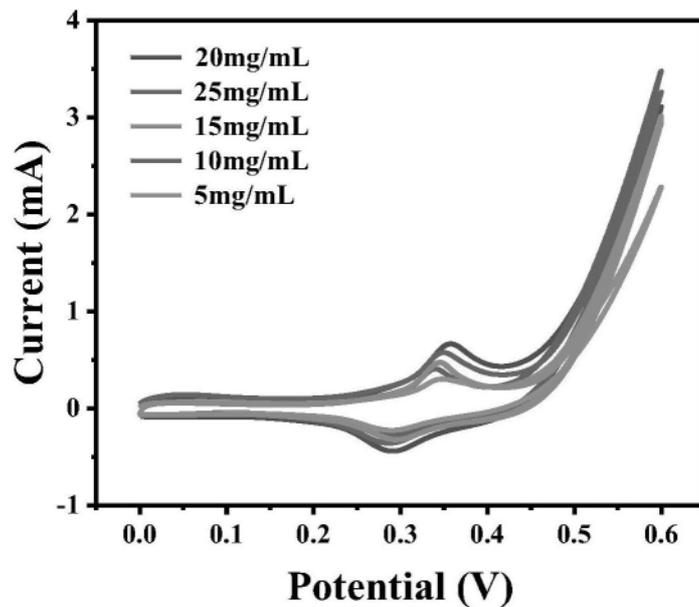


图5

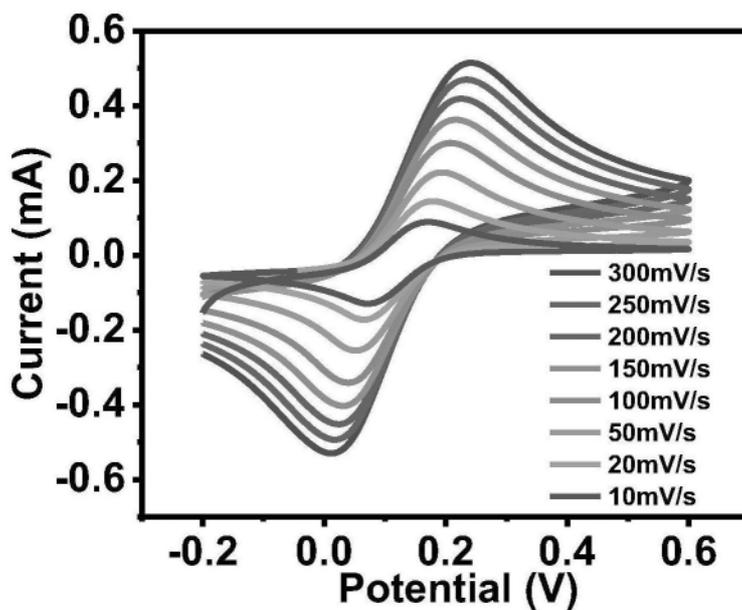


图6

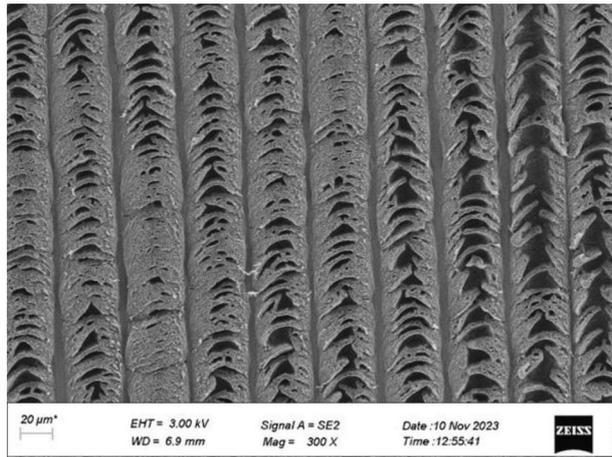


图7

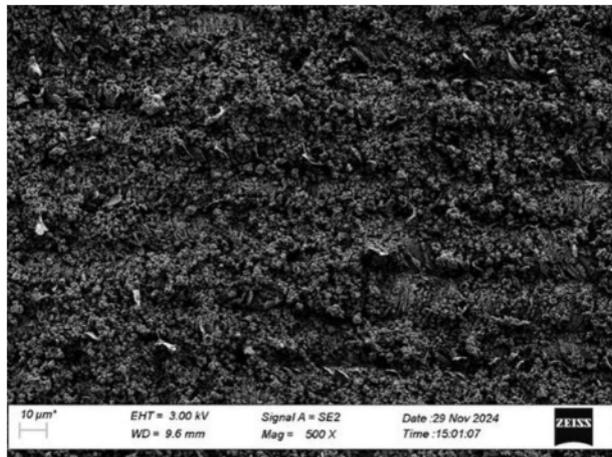


图8

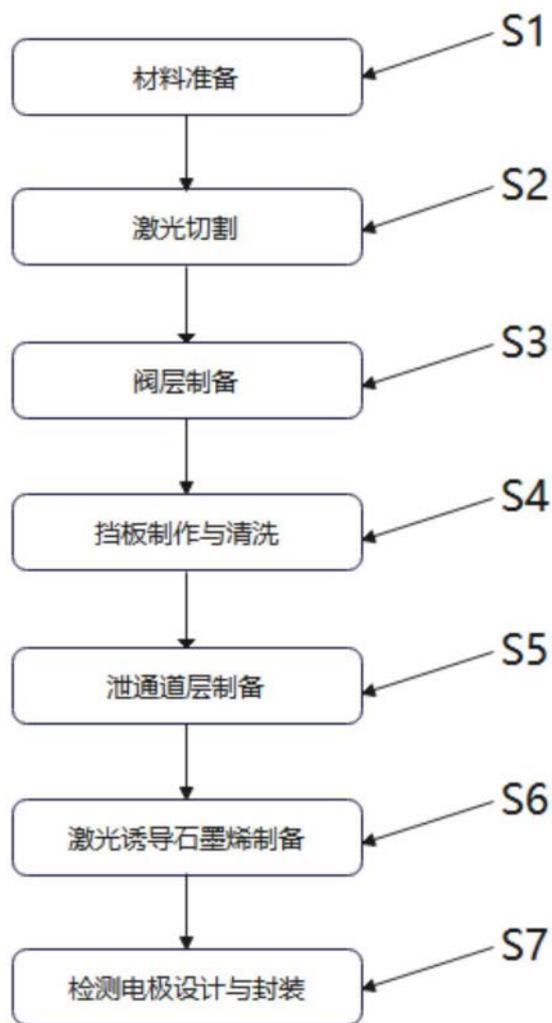


图9

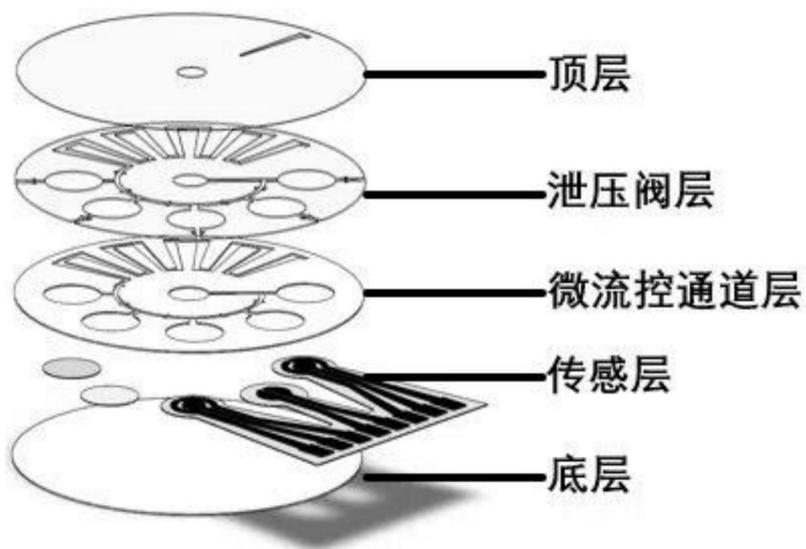


图10