

3D打印微流控芯片与FPC的高可靠 软硬异质集成及界面调控研究

尹梦晗, 张 荣

长春理工大学物理学院物理学光波导实验室, 吉林 长春

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年4月29日; 发布日期: 2026年5月11日

摘 要

微全分析系统的集成化发展, 对3D打印微流控芯片与柔性电路板(FPC)的异质集成提出更高要求, 但二者集成存在界面粘附性差、胶液易毛细堵塞流道的问题, 严重影响器件性能。针对此, 本文提出界面复合改性及溶剂辅助边缘清除的复合封装工艺, 构建软硬异质集成架构。采用无水乙醇超声25 min联合氧等离子体处理3 min改性FPC聚酰亚胺表面, 提升界面润湿性与机械互锁能力; 通过溶剂辅助技术在流道边缘构建1 mm“无胶缓冲区”, 杜绝胶液堵塞。实验表明, 该工艺实现芯片共形密封, 器件稳定运行寿命从不足24 h延长至7天以上, 电极导通性能稳定, 为微流控系统高可靠软硬异质集成提供了有效技术方案。

关键词

3D打印微流控, 柔性电路板, 异质集成, 界面改性

Research on High-Reliability Rigid-Flexible Heterogeneous Integration and Interface Regulation of 3D-Printed Microfluidic Chips with FPC

Menghan Yin, Rong Zhang

Optical Waveguide Laboratory of Physics, School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: March 23, 2026; accepted: April 29, 2026; published: May 11, 2026

Abstract

The integrated development of micro total analysis systems (μ TAS) has put forward higher requirements for the heterogeneous integration of 3D-printed microfluidic chips and flexible printed circuits (FPC). However, the poor interfacial adhesion and the easy capillary blockage of microchannels by adhesive during the integration seriously impair the device performance. To address these issues, this paper proposes a composite packaging process combining interfacial composite modification and solvent-assisted edge cleaning, and constructs a rigid-flexible heterogeneous integration architecture. The polyimide surface of FPC was modified by ultrasonic treatment with anhydrous ethanol for 25 minutes combined with oxygen plasma treatment for 3 minutes to improve the interfacial wettability and mechanical interlocking capability. A 1 mm “adhesive-free buffer zone” was constructed at the edge of microchannels via solvent-assisted technology to completely eliminate adhesive blockage. Experimental results show that this process achieves conformal sealing of the chip, extending the stable operation lifetime of the device from less than 24 hours to more than 7 days with stable electrode conduction performance. This study provides an effective technical solution for the high-reliability rigid-flexible heterogeneous integration of microfluidic systems.

Keywords

3D-Printed Microfluidics, Flexible Printed Circuit, Heterogeneous Integration, Interface Modification

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微全分析系统的集成化与微型化发展, 推动了微流控芯片与电子传感模块的深度耦合[1]。正如 Selemani 等人在 2024 年关于 3D 打印电化学分析器件的最新综述中所指出的[2], 虽然目前已发展出外部耦合、导电材料原位打印及嵌入式集成等多种手段, 但如何在确保微通道结构完整性的同时, 实现异质界面的高强度、高稳定性密封, 仍是当前该领域的共性挑战。在众多的集成方案中, 3D 打印微流控芯片结合柔性电路板(FPC)电极阵列的异质集成方案, 兼具微通道设计灵活性与优异电学性能[3] [4], 成为构建一体化检测平台的有效途径。但二者异质封装仍存在关键技术瓶颈。首先, FPC 聚酰亚胺基材化学惰性强, 与光敏树脂的界面粘附力弱; 铜线路形成的微观形貌差异易引发密封失效、漏液。此外, 过量涂胶还会因毛细作用侵入微流道造成堵塞, 严重制约器件可靠性与使用寿命。针对上述问题, 本文提出界面复合改性及溶剂辅助边缘清除的高可靠封装工艺。通过实验研究了乙醇超声与等离子体协同改性机理以及无胶缓冲区的构建方法, 实现了低成本、长寿命的异质集成微流控芯片制造。

2. 芯片结构与异质封装工艺

2.1. 异质集成架构设计

本文设计一种叠层异质集成架构, 如图 1 所示, 以解决芯片与电路互联的紧凑性与信号完整性问题。该架构自上而下由三部分组成: 顶层采用高透明光敏树脂一体化打印的流道盖板[5]。内部集成有十字型开放式微通道, 其优异的光学透过率可满足电泳过程的实时观测需求; 中间层为实现密封的紫外固化胶

黏剂层, 利用固化前胶液的微流控特性, 该层能够自动填充并补偿底层 FPC 表面因铜线路蚀刻形成的微观阶梯间隙, 确保软硬异质界面的高强度气密性封装; 底层采用定制化 FPC, 利用其集成的裸露铜电极阵列直接作为流体驱动的接触界面, 实现信号的直接引入。该方案巧妙地利用 FPC 同时承担了密封基底与电路载体的双重功能。相比于传统封装中复杂的金属丝键合或外接导线工艺, 本架构大幅压缩了系统体积, 规避了信号传输中的分压损耗, 显著提升了微全分析系统的集成度与运行可靠性。

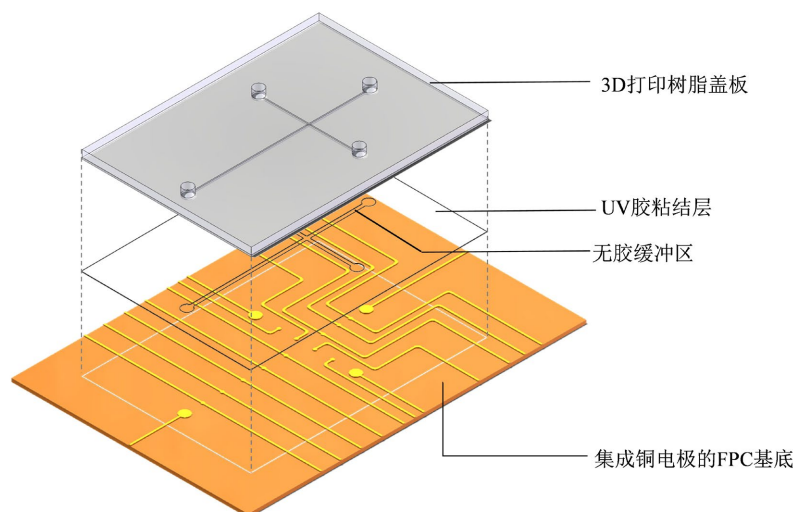


Figure 1. Heterogeneous integration architecture and design schematic of the chip
图 1. 芯片异质集成架构与设计图

2.2. 芯片组件设计与加工优化

本文采用光固化 3D 打印机(迅新 GK3PRO), 二次固化机(迅新 Cure3)制备微通道盖板, 所用材料为高透明光敏树脂(讯新 T01)。受设备成型分辨率限制, 流道设计深度 H 统一设定为 $300\ \mu\text{m}$ 。底层基板选用市售单面聚酰亚胺(PI)覆铜板(立创商城定制, 1/3 oz 铜箔), 实测铜层及镀层总高度约为 $15\ \mu\text{m}$ 。封装胶材选用紫外固化型 CV3001UV 胶。实验涉及的关键设备包括超声波清洗机(冠博仕, 中国)以及真空等离子清洗机(东信高科, 中国)。

基于上述材料与设备基础, 本文进一步优化流道盖板制备工艺: 采用光固化 3D 打印制备十字流道盖板($H = 300\ \mu\text{m}$)。针对原始树脂表面粗糙度高、干扰光学探测的问题, 引入 UV 光油二次涂覆工艺(厚度 $10\sim 20\ \mu\text{m}$), 显著提升了光学透过率, 满足共聚焦荧光检测需求(如图 2(a)所示)。流道截面规整, 实测宽度与设计一致, 为低压环境下的稳定传输提供了保障。底层 FPC 采用“宽电极 - 窄流道”的冗余设计逻辑。如图 2(b)所示, FPC 上的驱动电极直径定为 $1\ \text{mm}$, 远大于 $300\ \mu\text{m}$ 的流道宽度。这一设计在允许 $\pm 0.3\ \text{mm}$ 手动封装对准公差的前提下, 确保了电极表面能完全覆盖微通道底面, 保证了驱动电场在横向上的均匀性, 同时极大地降低了电极表面的电流密度, 有效抑制了低压驱动下的电解气泡成核[6]。

2.3. 界面复合改性 with 异质封装

完成芯片组件的设计与加工后, 针对 FPC 聚酰亚胺表面疏水、与 UV 胶界面结合力弱的问题, 开展界面复合改性研究, 为后续异质封装奠定基础。聚酰亚胺(PI)是 FPC 的绝缘基材, 热稳定性优异但分子链缺极性基团, 疏水性强(原始水接触角 71.3°), 未经处理时 UV 胶难以充分浸润并形成化学键合, 高压流体驱动下易发生界面剥离。

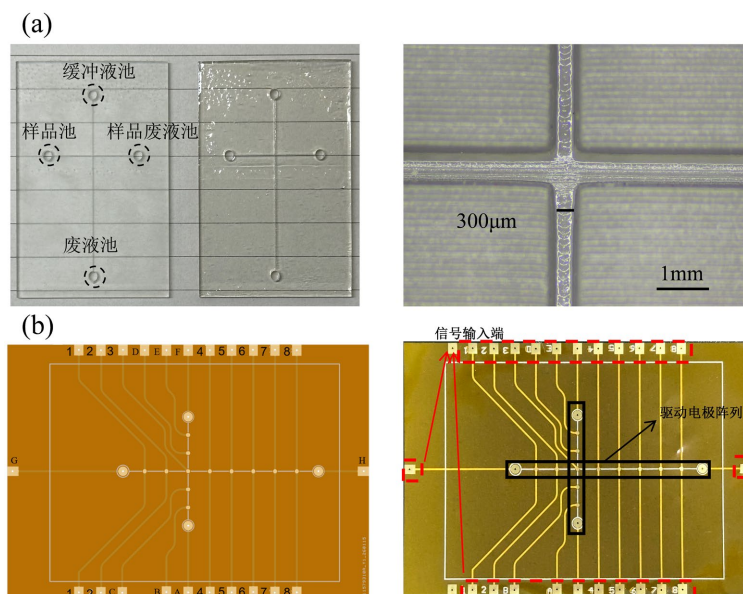


Figure 2. Design and physical characterization of key chip components: (a) Physical photograph and microscopic morphology of the 3D-printed microchannel cover plate; (b) Comparison between the design drawing and physical object of the FPC electrode array

图 2. 芯片关键组件设计与加工实物表征: (a) 3D 打印流道盖板实物及微通道显微形貌 (b) FPC 电极阵列设计图与实物对比

本工艺先将 FPC 经无水乙醇超声处理, 通过对比实验确定了最佳改性时间[7]。如图 3 所示, 实验结果表明, 随超声时间增加, PI 表面残留的脱模剂及杂质逐渐清除, 水接触角在前 20 min 内快速下降; 至 25 min 时, 接触角降至 64.1° , 表面自由能提升至 45.4 mJ/m^2 , 随后曲线趋于平台期。这表明 25 min 已足以完成表面物理去污与初步溶胀, 继续增加时间对性能提升有限。因此, 选定 25 min 作为后续复合改性的基础参数。

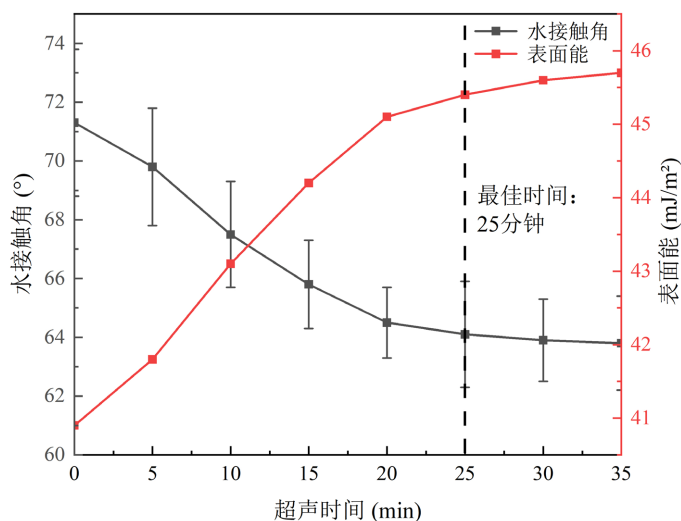


Figure 3. Effect of ultrasonication time on the surface contact angle and surface free energy of the PI substrate

图 3. 超声处理时间对 PI 基底表面接触角及表面能的影响

再对界面进行 180 s 氧等离子体轰击, 高能氧离子打破 PI 表面 C-C、C-N 键产生高活性自由基, 其

与氧原子结合后接枝-OH、-COOH等极性亲水官能团[8]-[10],经该复合处理,PI表面水接触角降至13.7°,实现从疏水到超亲水的转变,本质是表面自由能大幅提升(图4)。

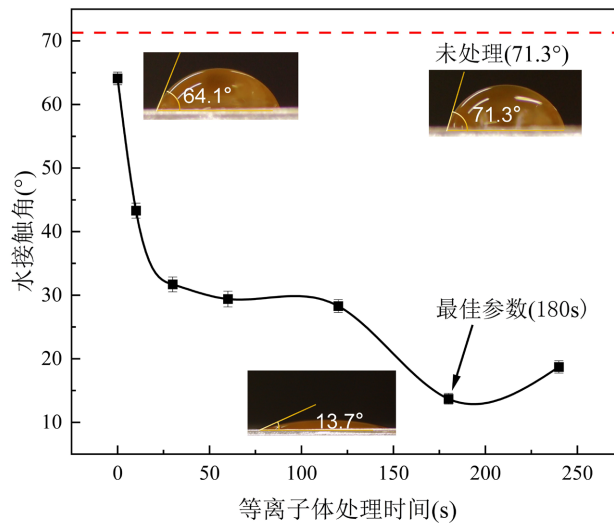


Figure 4. Variation of water contact angle as a function of oxygen plasma treatment time
图 4. 水接触角随等离子体处理时间的变化曲线

为了定量评估改性效果,本文引入了 Neumann 状态方程对基底表面自由能 γ_s 进行估算[11][12]:

$$\cos \theta = -1 + 2 \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_L} e^{-\beta(\gamma_L - \gamma_s)^2}} \quad (1)$$

其中, γ_L 为测试液(去离子水)的表面张力(72.8 mJ/m²)。如表 1 所示,计算结果表明,改性后界面自由能从 40.9 mJ/m² 提升至 70.9 mJ/m²,增幅高达 73.3%。高表面能确保了低粘度的 UV 固化胶能够克服毛细阻力,自动渗透并完全填充 FPC 表面因 15 μ m 线路引起的所有微观缝隙,从而从物理层面消除了潜在的泄漏通道。

Table 1. Effects of different surface treatment processes on the wettability and bonding quality of the PI substrate
表 1. 不同表面处理工艺对 PI 基底润湿性及键合质量的影响

| 处理工艺方案 | 接触角(°) | 表面能(mJ·m ⁻²) | 键合界面状态 |
|------------|------------|--------------------------|--------|
| 未处理(原始 PI) | 71.3 ± 2.5 | 40.9 | 极易分层 |
| 仅无水乙醇超声 | 64.1 ± 1.8 | 45.4 | 结合力弱 |
| 仅等离子体处理 | 28.5 ± 1.2 | 65.3 | 易发生剥离 |
| 复合改性工艺 | 13.7 ± 0.6 | 70.9 | 致密且共形 |

微流控芯片异质集成中,胶液的精准分布是提升成品率的关键。本研究采用的 FPC 基底因铜线路存在 15 μ m 物理阶梯,传统贴合易在阶梯边缘形成微缝隙引发高压渗漏,盲目增厚胶层又会因毛细力导致 UV 胶侵入 300 μ m 宽的微流道造成堵塞,为此本文提出“无胶缓冲区”构建工艺。

如图 5 所示,该工艺流程为:先在复合改性后的 FPC 表面旋涂低粘度 UV 胶,利用胶液流动性填充铜线路微观空隙,初步消除泄漏通道;再以微量无水乙醇为剥离溶剂,在显微视觉辅助下定点清除流道周边多余胶液,在流道边缘构建 1 mm “无胶缓冲区”,从源头阻断胶液毛细溢入流道的路径;最后将 3D 打印树脂盖板与 FPC 精准对准贴合,经真空除泡、紫外固化,实现芯片的无损气密性异质封装。

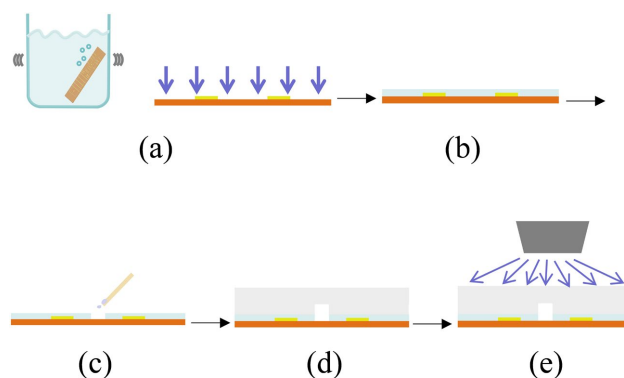


Figure 5. Schematic of the composite packaging process: (a) Synergistic modification; (b) Adhesive coating; (c) Edge cleaning; (d) Alignment and bonding; (e) UV curing

图 5. 复合封装工艺流程示意图 (a) 协同改性处理 (b) 胶水涂覆 (c) 边缘清除 (d) 对准贴合 (e) 紫外固化

缓冲区宽度的精准控制是无损封装的核心, 如图 6 所示, 本文通过对比实验确定最优擦除边界: 1 mm 组经真空贴合挤压后, UV 胶液面恰好延伸至流道投影边缘, 密封性良好且无溢胶堵塞; 2 mm 组胶液面前沿距流道边缘仍有 450 μm 空隙。

实验表明本工艺下 UV 胶压力平均横向溢流距离约 1.55 mm, 1 mm 组胶液虽理论铺展距离超预设, 但 FPC 电极 15 μm 台阶形成的几何不连续性, 会改变液滴接触角平衡产生表面张力阻滞, 使胶面精准停滞在流道边缘。

综上, 1 mm 是缓冲区最佳宽度, 既为操作留安全余量, 又能借助台阶效应实现自对准封装, 利用胶液自然溢流实现流道边缘零距离密封; 而 2 mm 缓冲区过宽, 残留空隙易成为高压下的压力薄弱点, 增加芯片爆裂或渗漏风险。

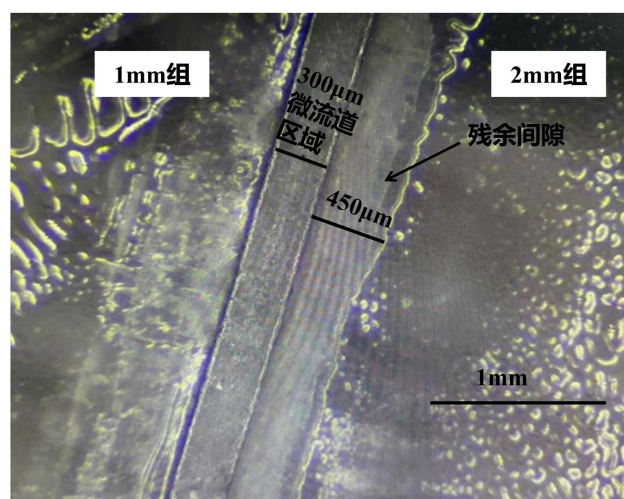


Figure 6. Microscopic comparison of the effects of different buffer zone widths on the overflow behavior of UV adhesive

图 6. 不同缓冲区宽度对 UV 胶溢流行为影响的显微对比图

值得注意的是, 实验进一步验证了界面改性与控制工艺之间的强耦合关系。在复合改性但无缓冲区的对照实验中, 虽然 PI 表面的亲水性提升显著, 但根据拉普拉斯压力公式, 极小的接触角显著增大了芯片压合瞬间界面处的毛细驱动力。在缺乏 1 mm 缓冲区物理阻断的情况下, 低粘度的 UV 胶液在毛细作用下迅速失控并溢流至 300 μm 宽的微流道内。

实验观察到, 该组样片在紫外固化后流道呈现完全封死状态, 无法通过高压泵通入任何检测溶液, 导致器件功能彻底丧失。这一结果有力地证明了: 对于超亲水表面的异质集成, 1 mm 无胶缓冲区并非可选的辅助手段, 而是确保流道结构完整性与芯片功能化的核心先决条件。

因此, 本文最终确立了以 1 mm 为核心、结合显微对准的精准擦除工艺。通过复合改性工艺改善界面微观形貌, 再结合溶剂辅助边缘清除技术, 本文成功实现了 3D 打印树脂盖板与 FPC 基底的高可靠异质集成, 集成后的器件实物如图 7(a)所示。

为验证密封效果与流道完整性, 我们进行了流体导通测试, 当红色染料指示流体流经 15 μm 高的铜电极台阶时, 流体边界始终保持清晰锐利, 未观察到任何毛细渗漏或胶液溢出现象, 如图 7(b)。这一结果表明, 该集成工艺不仅成功解决了 3D 打印硬质树脂与 FPC 软质基底之间的物理密封难题, 更通过精准的控胶技术, 保障了 300 μm 微流道的结构完整性, 为后续流体稳定传输与检测奠定了基础。

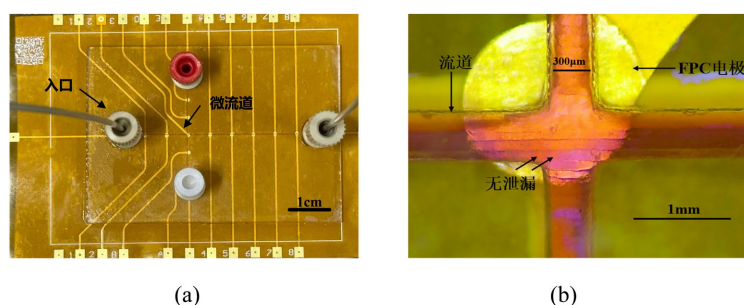


Figure 7. Physical and microscopic morphology of the heterogeneously integrated microfluidic chip: (a) Photograph of the fully packaged chip; (b) Microscopic image of the intersection area between the microchannel and the electrode
图 7. 异质集成微流控芯片实物及微观形貌 (a) 芯片整体封装实物图 (b) 流道与电极交叉区域显微照片

3. 芯片测试

3.1. 封装强度耐压测试

为定量评估复合改性工艺对异质界面键合强度的提升效果, 本文搭建了基于极限流速法的耐压测试平台, 如图 8 所示, 该系统由高精度注射泵、光学显微镜和待测芯片组成, 以深红色墨水为指示流体, 芯片进出口连接出口管长 20 cm, 内径 0.5 mm 的 PEEK 导管, 借其流阻形成稳定背压, 便于监测内部流体压力。

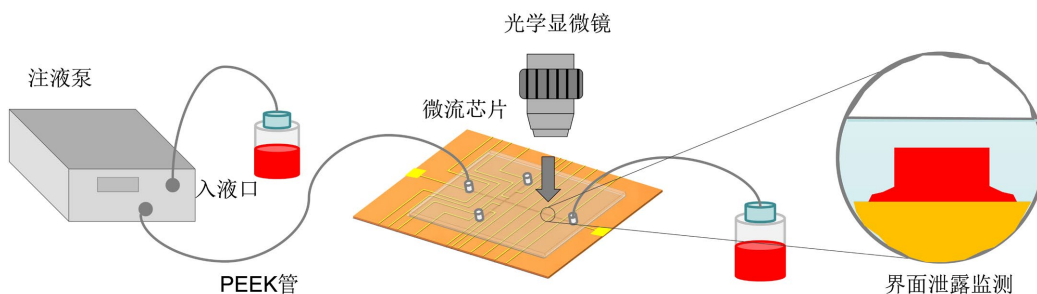


Figure 8. Schematic of the pressure resistance test system for chip packaging strength based on the limit flow velocity method
图 8. 基于极限流速法的芯片封装强度耐压测试系统示意图

测试分预充填和阶梯式加压两步: 先以 100 $\mu\text{L}/\text{min}$ 低流速注液, 排尽气体且出口流液稳定后, 从 1

mL/min 初始流速开始, 以 1 mL/min 梯度每 30 s 递增, 直至显微镜观测到墨水渗漏, 记录此时的最大耐受流速(Q_{\max}); 对未处理、仅乙醇处理、仅等离子体处理、复合改性四组样品, 各做 5 次重复实验以消除随机误差。

根据微流体力学原理, 芯片内部所承受的等效爆破压力(P_{\max})可通过测得的最大耐受流速(Q_{\max})利用泊肃叶定律进行理论估算[13]:

$$P_{\max} = \frac{128\mu L Q_{\max}}{\pi D^4} \quad (2)$$

其中, μ 为流体动力粘度, 约为 1×10^{-3} Pa·s, L 与 D 分别为出口 PEEK 导管 0.2 m 的长度与 0.5×10^{-3} m 的内径。该模型将动态流速定量转化为静态压力值, 为不同工艺方案的强度对比提供了标准尺度。

实验数据如表 2 所示。测试结果表明, 未经处理的原始 PI 基材由于界面相容性极差, 爆破压力仅为 0.11 MPa。采用本文提出的复合改性工艺后, 芯片的最大耐受流速提升至 147.2 mL/min, 对应理论爆破压力达到 0.32 MPa。相较于未处理组和单一等离子体处理组, 键合强度分别提升了约 191%和 45.5%。

Table 2. Comparison of chip pressure resistance under various processing schemes

表 2. 不同处理工艺方案下芯片的耐压性能对比实验数据

| 处理工艺方案 | 最大耐受流速(Q_{\max}) | 爆破压力(P_{\max}) |
|------------|----------------------|--------------------|
| 未处理(原始 PI) | 50.6 mL/min | 0.11 MPa |
| 仅无水乙醇超声 | 69.0 mL/min | 0.15 MPa |
| 仅等离子体处理 | 101.2 mL/min | 0.22 MPa |
| 复合改性工艺 | 147.2 mL/min | 0.32 MPa |

3.2. 电学稳定性测试

为验证异质集成芯片在实际生化分析中的长期可靠性, 本文搭建电化学在线监测平台, 如图 9 所示, 以 0.01 MPBS 缓冲液(pH7.4)为测试介质, 将芯片接入直流稳压电源与数字万用表的监测回路, 在恒定电场应力下连续评估其密封完整性。

测试选定 50 V 恒定驱动电位, 此时电极边缘平均电流密度 38 A/m^2 , 低于 45 A/m^2 的气泡成核阈值, 避免微气泡累积中断实验, 保障 168 h (7 天) 室温连续监测。研究引入归一化电流系数 $\text{Stability} = I(t)/I_0$ 表征电学稳定性, $I(t)$ 为实时电流, I_0 为通电 1 h 后的稳定平均电流, 规定系数跌落至 0.1 以下即为封装失效。

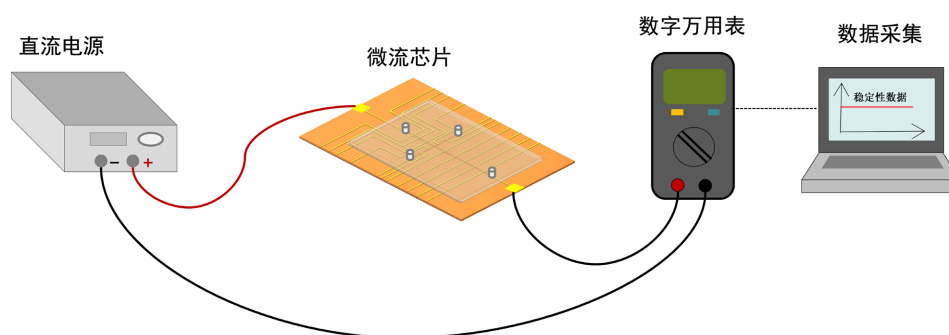


Figure 9. Architecture of the monitoring system for the long-term electrical stability of the chip

图 9. 芯片长期运行电学稳定性监测系统架构图

如图 10 所示, 测试结果显示, 未改性对照组芯片电流初期波动显著, 运行约 18 h 后近乎归零而失效, 原因为液体沿铜线路侧壁毛细渗漏, 造成界面剥离、电路断路; 而复合改性实验组芯片在 168 h 内, 归一化电流始终稳定在 1.0 附近无衰减, 证实物理粗糙化和化学活化的界面改性, 结合 1 mm 无胶缓冲区的防毛细回流设计, 成功解决电极阶梯引发的渗漏问题, 保障了芯片在复杂电场下的结构完整性, 满足生化连续检测对器件高稳定性的要求。

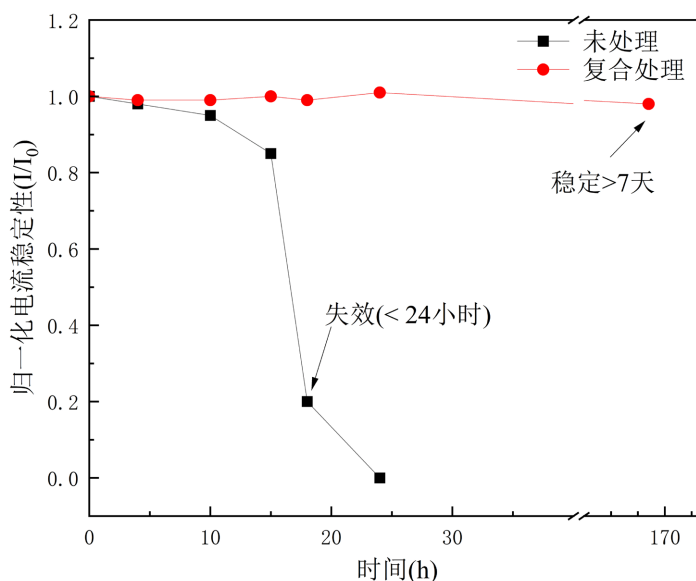


Figure 10. Comparison of normalized current fluctuation curves for the chip over 168 hours of operation using the original PI and the composite modification process

图 10. 原始 PI 与复合改性工艺下芯片运行 168 小时的归一化电流波动曲线对比

4. 结论

本文针对 3D 打印微流控芯片与柔性电路板(FPC)的软硬异质集成难题, 研发了一套界面改性 with 精准封装相结合的一体化工艺。该工艺通过 25 min 无水乙醇超声与 180 s 氧等离子体的协同改性, 实现了 FPC 聚酰亚胺基底的润湿性与表面粗糙度双重优化, 彻底解决了异质材料间的界面粘接问题; 同时结合溶剂辅助边缘清除技术构建的 1 mm 无胶缓冲区, 有效填补了铜线路的微观高差, 既保障了界面密封可靠性, 又从源头杜绝了胶液毛细堵塞流道的风险。实验验证表明, 该工艺制备的异质集成微流控芯片密封性能与电学稳定性优异, 稳定运行寿命突破 7 天。尽管表现优异, 但该工艺对部分低硬度树脂的溶胀影响以及 UV 胶在长时细胞培养等特定生化场景下的生物兼容性仍需进一步评估。未来研究将引入高精度自动化控胶技术提升一致性, 并将该集成架构拓展至 POCT 或可穿戴汗液监测等特定场景, 利用 FPC 电路集成优势构建具备无线传输功能的高集成化微全分析系统, 为柔性微流控系统的规模化制备与应用提供更普适性的技术参考。

参考文献

- [1] Manz, A., Graber, N. and Widmer, H.M. (1990) Miniaturized Total Chemical Analysis Systems: A Novel Concept for Chemical Sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **1**, 244-248. [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(90\)80209-j](https://doi.org/10.1016/0925-4005(90)80209-j)
- [2] Selemani, M.A., Cenhrang, K., Azibere, S., Singhateh, M. and Martin, R.S. (2024) 3D Printed Microfluidic Devices with Electrodes for Electrochemical Analysis. *Analytical Methods*, **16**, 6941-6953. <https://doi.org/10.1039/d4ay01701c>
- [3] Bhattacharjee, N., Urrios, A., Kang, S. and Folch, A. (2016) The Upcoming 3D-Printing Revolution in Microfluidics.

- Lab on a Chip*, **16**, 1720-1742. <https://doi.org/10.1039/c6lc00163g>
- [4] Nielsen, A.V., Beauchamp, M.J., Nordin, G.P. and Woolley, A.T. (2020) 3D Printed Microfluidics. *Annual Review of Analytical Chemistry*, **13**, 45-65. <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-091619-102649>
- [5] 4Gong, H., Woolley, A.T. and Nordin, G.P. (2016) High Density 3D Printed Microfluidic Valves, Pumps, and Multiplexers. *Lab on a Chip*, **16**, 2450-2458. <https://doi.org/10.1039/c6lc00565a>
- [6] 6Voldman, J. (2006) Electrical Forces for Microscale Cell Manipulation. *Annual Review of Biomedical Engineering*, **8**, 425-454. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.8.061505.095739>
- [7] Guedri-Knani, L., Touati, Z., Sahraoui, M., Yaakoubi, N. and Dridi, C. (2025) Structural and Optical Characteristics Modifications of Surface Polyimide Films by Ultrasonic Chemical Treatment. *Indian Journal of Physics*, **99**, 3509-3521. <https://doi.org/10.1007/s12648-025-03568-2>
- [8] Liston, E.M., Martinu, L. and Wertheimer, M.R. (1993) Plasma Surface Modification of Polymers for Improved Adhesion: A Critical Review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, **7**, 1091-1127. <https://doi.org/10.1163/156856193x00600>
- [9] Sun, X., Bu, J., Liu, W., Niu, H., Qi, S., Tian, G., *et al.* (2015) Surface Modification of Polyimide Fibers by Oxygen Plasma Treatment and Interfacial Adhesion Behavior of a Polyimide Fiber/Epoxy Composite. *Science and Engineering of Composite Materials*, **24**, 477-484. <https://doi.org/10.1515/secm-2015-0092>
- [10] 张兴涛, 吴广宁, 吴旭辉, 等. 聚酰亚胺薄膜的等离子体改性及其机理探究[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 208-214.
- [11] Gindl, M., Sinn, G., Gindl, W., Reiterer, A. and Tschegg, S. (2001) A Comparison of Different Methods to Calculate the Surface Free Energy of Wood Using Contact Angle Measurements. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **181**, 279-287. [https://doi.org/10.1016/s0927-7757\(00\)00795-0](https://doi.org/10.1016/s0927-7757(00)00795-0)
- [12] 12Kwok, D.Y. and Neumann, A.W. (1999) Contact Angle Measurement and Contact Angle Interpretation. *Advances in Colloid and Interface Science*, **81**, 167-249. [https://doi.org/10.1016/s0001-8686\(98\)00087-6](https://doi.org/10.1016/s0001-8686(98)00087-6)
- [13] 5Kirby, B.J. (2010) *Micro- and Nanoscale Fluid Mechanics: Transport in Microfluidic Devices*. Cambridge University Press, 55-80.