

算法赋能的 CMOS 成像等离子激元超表面癌症筛查系统

简介： 面向基层与现场肿瘤标志物辅助筛查，本作品融合功能化透射式等离子激元芯片、窄带光源、无镜头 CMOS 图像读出及多模态算法，实现生物标志物信号的便携采集、定量分析与结果输出。

创新关键词： 等离子激元超表面；CMOS 图像传感；灰度—浓度定量；多模态降噪；即时检测

1.应用背景与关键问题：

现有化学发光免疫分析（CLIA）、酶联免疫吸附试验（ELISA）及光谱式表面等离子激元共振（SPR）检测，多依赖大型设备、专业操作人员和稳定实验环境，难以兼顾高灵敏定量与基层现场部署。图像式等离子激元检测虽具微型化潜力，仍面临两项关键问题：一是图像灰度与生物标志物浓度之间缺少可解释的定量映射；二是

光照不均、芯片缺陷及样本杂质会影响复杂场景下的检测一致性。



图 1 图像式等离子激元超表面生物传感系统实物及组成

2.技术方案与系统架构：

目标生物分子在功能化超表面芯片上发生特异性结合，引起局域折射率及共振响应变化；固定波长照明将该变化转换为透射光强和 CMOS 图像灰度变化。采集图像经平场校正、噪声掩膜和有效区域提取后，由灰度—浓度模型换算标志物浓度并输出检测结果，形成“超表面感应—图像采集—算法校正—浓度定量”的一体化流程。

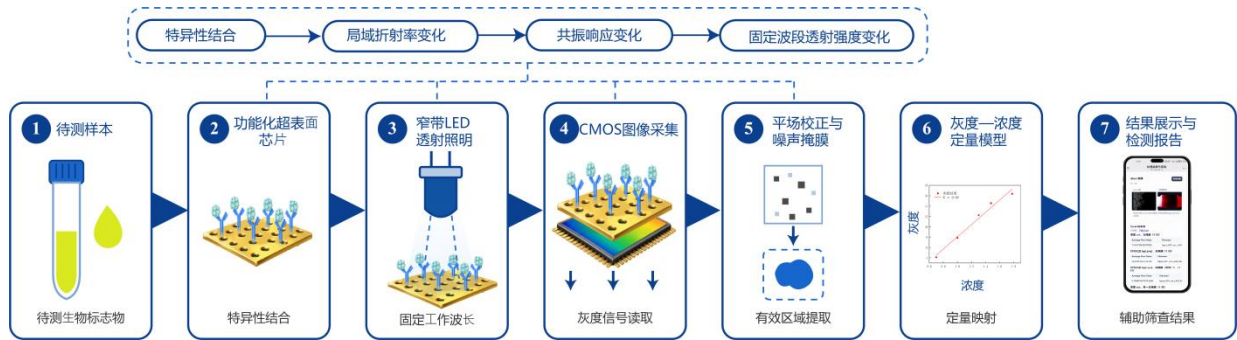


图 2 作品系统架构及图像式定量检测流程

3.核心创新：

灰度—浓度定量映射方法

综合光源光谱、超表面透射响应和 CMOS 光电响应，建立图像灰度与生物标志物浓度之间的定量映射，使图像式检测由变化识别转变为浓度计算。

面向复杂环境的多模态鲁棒算法

融合平场校正、阈值分割、小波处理和形态学运算，识别并剔除光照不均、条纹划痕及样本杂质噪声，提高有效区域提取的一致性。

超表面芯片与无镜头终端集成

采用透射式纳米孔超表面、无镜头近距离 CMOS 读出及抽屉式芯片载盘，减少光谱仪、镜头组与调焦机构，形成便携式图像定量检测终端。

4.主要技术指标与实验效果

灰度—浓度模型 $R^2 = 0.994$	复杂环境抗扰效果 $Pearson\ r: 0.972 \rightarrow 0.987r$	临床对照相关性 $Pearson\ r = 0.976$
CEA 检测限 $0.56\ ng/mL$	PSA 检测限 $0.26\ ng/mL$	平均绝对偏差 $\approx 6\%$

5. 实验与应用验证

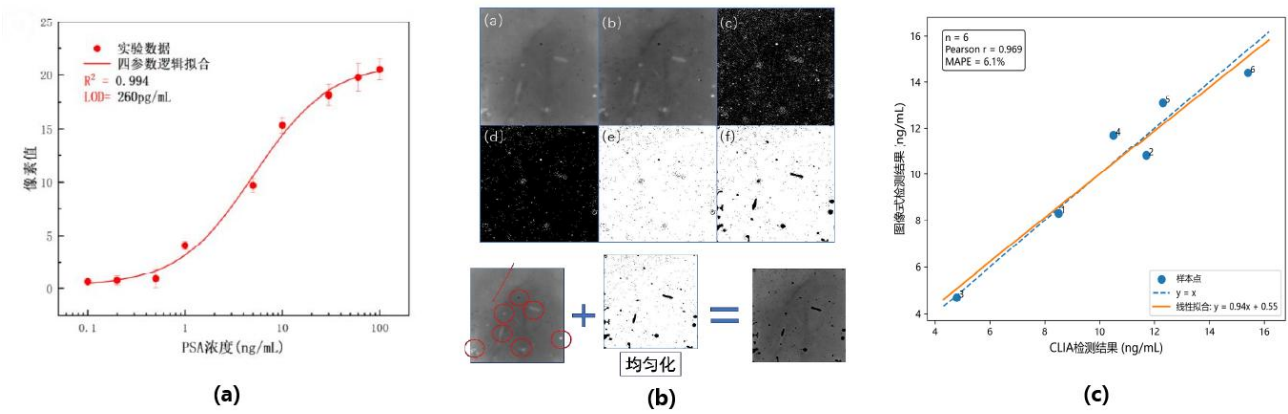


图 3 图像式定量检测及应用验证结果。（a）PSA 浓度与 CMOS 灰度响应；（b）复杂噪声识别与有效区域提取；（c）图像式检测结果与 CLIA 标准检测对照线性拟合效果。

6. 同类技术对比

表 1 典型肿瘤标志物检测技术路线对比

对比维度	中心实验室免疫分析	光谱式 SPR	本作品
典型方式	CLIA、ELISA	光谱共振峰读取	CMOS 图像灰度读取
定量依据	标准曲线/发光信号	共振波长或角度偏移	灰度—浓度模型
大型仪器依赖	较高	依赖光谱仪	不依赖光谱仪
环境要求	标准实验室	对光源、温度和振动敏感	算法校正复杂噪声
现场部署	较弱	较弱	不依赖光谱仪，模组 $<12 \times 8 \times 12\ cm^3$
本作品实测依据	—	光谱对照	$(R^2 = 0.994)$ ， $(r = 0.987)$

7.应用场景与推广价值

科研与检测机构： 用于蛋白、外泌体及肿瘤标志物浓度检测，为科研实验和第三方检测提供便携式图像读出工具。

基层与 POCT 场景： 完成相应医疗器械注册后，可部署于基层医院、体检机构及现场辅助筛查场景。

平台拓展： 通过更换功能化芯片，可进一步拓展多靶标检测、疾病风险监测和远程结果管理。

8. 成果基础

- 1 套 完整样机系统
- 10 项 相关发明专利
- 4 篇 相关 SCI 论文
- 2 项 机构应用证明