

IGZO 薄膜晶体管生物传感器无标记检测 强直性脊柱炎

吕腾博¹, 刘嘉乐^{1,2}, 刘丽³, 李昕¹, 韩传余¹, 王小力^{1,2}

(1. 西安交通大学微电子学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学物理学院, 710049, 西安;

3. 沈阳大学师范学院, 110003, 沈阳)

摘要: 为了快速检测强直性脊柱炎血清学分子标志物人体白细胞抗原(HLA-B27), 开发了一种基于人体白细胞抗原 B27(HLA-B27)功能化的氧化铟镓锌(IGZO)薄膜晶体管生物传感器。利用射频磁控溅射技术和微纳加工工艺制备了 IGZO 薄膜晶体管(IGZO TFT), 采用 3-氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)和抗体对 IGZO TFT 进行修饰, 制备出针对 HLA-B27 检测的生物传感器。实验结果表明, 功能化的 IGZO TFT 生物传感器具有稳定的电学特性和传感性能。传感器对 HLA-B27 的检测极限为 1 pg/mL, 在 1 pg/mL 至 100 ng/mL 的范围内均有良好的线性响应。这说明所设计的高性能生物传感器能够有效检测出强直性脊柱炎的标志物。此外, IGZO TFT 可以扩展为传感器阵列平台, 实现对某种疾病多种标志物的联合检测, 在便携式床旁诊断设备的应用中具有巨大潜力。

关键词: IGZO; 薄膜晶体管; 生物传感器; 强直性脊柱炎; 人体白细胞抗原 B27

中图分类号: TP212.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/jxtxb202402016 **文章编号:** 0253-987X(2024)02-0157-07

Label-Free Detection of Ankylosing Spondylitis by IGZO Thin-Film Transistor Biosensor

LÜ Tengbo¹, LIU Jiale^{1,2}, LIU Li³, LI Xin¹, HAN Chuanyu¹, WANG Xiaoli^{1,2}

(1. School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Normal College, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: In this paper, the IGZO thin-film transistor biosensor based on functionalized human leukocyte antigen B27 (HLA-B27) is developed for rapid detection of the HLA-B27, a serological molecular marker for ankylosing spondylitis. The fabrication of IGZO thin-film transistors (IGZO TFT) using radio-frequency magnetron sputtering technology and micro-nano-processing is described. The IGZO TFT is modified with 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES) and antibodies to prepare biosensors for HLA-B27 detection. The experimental results show that the functionalized IGZO TFT biosensor has stable electrical characteristics and sensing performance. The sensor shows a detection limit of 1 pg/mL for HLA-B27, and its linear response within the concentration range of 1 pg/mL to 100 ng/mL is good. These results indicate that the proposed high-performance biosensor can effectively detect biomarker of ankylosing spondylitis. In addition, the IGZO TFT can be expanded into a sensor array platform to realize combined detection of multiple markers for a certain

收稿日期: 2023-08-07。 作者简介: 吕腾博(1996—), 男, 博士生; 王小力(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62174130); 装备预研基金资助项目(2022-JCJQ-JJ-1099); 陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBSF-407)。

网络出版时间: 2023-10-31 网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231031.1131.005>

disease, which has great potential in the application of portable bedside diagnostic devices.

Keywords: indium gallium zinc oxide; thin film transistors; biosensors; ankylosing spondylitis; human leukocyte antigen B27

强直性脊柱炎(ankylosing spondylitis, AS)是一种慢性、进行性的系统性炎症性关节病,主要影响脊柱和骨盆区域。该疾病通常在青少年或青壮年阶段开始,并呈慢性进行性发展,可能导致持续的脊柱僵硬、疼痛和功能障碍^[1-3]。除了脊柱受累外,强直性脊柱炎还可能累及其他关节、眼睛和心血管系统等。强直性脊柱炎的病因尚未完全明确,但存在遗传易感性和环境因素的相互作用。目前,AS尚无根治方法,但通过早期诊断、综合治疗和康复措施可以缓解疼痛、减轻炎症反应,早期干预和定期监测是管理该疾病的关键。当前AS诊断方法主要包括临床表现、影像学检查、病理学检查、血清学检查等。但AS属于一种慢性炎症,其症状易与关节炎或者其他慢性疼痛病症,如纤维肌痛、慢性疼痛综合征等相重叠。在诊断过程中,需要综合考虑患者的症状、体征、家族史、影像学检查和实验室检查等多方面信息,以排除其他疾病并最终确定强直性脊柱炎的诊断。

研究表明,人体免疫系统异常和HLA-B27基因的相关性是该疾病发生的重要因素^[4-5]。HLA-B27基因阳性与AS的发病率显著相关,可以作为AS早期诊断的血清学分子标志物之一,通过检测患者的HLA-B27抗原,可以对强直性脊柱炎的可能性进行初步筛查。目前,临床针对HLA-B27的检测方法主要有:酶联免疫吸附试验(ELISA)或荧光免疫分析(FIA)检测抗原是否存在,聚合酶链反应(PCR)技术检测HLA-B27基因的存在与否,免疫组化方法对滑膜组织或关节液检测基因的表达情况等。但这些检测方法耗时费力、受引物影响较大且检测成本高。

近年来,由于体积小、灵敏度高、响应速度快、成本低等诸多优点,基于场效应晶体管的生物传感器取得了许多重要进展^[6-9]。目前,生物传感器大都采用二维材料(石墨烯^[10]、二硫化钼^[11]、碳纳米管^[12]等)作为沟道材料,亦或是采用AlGaN/GaN HEMT^[13],虽然这些FET的电子迁移率可以达到很高的数值,且在众多的研究中都展示出了良好的传感性能,但仍存在制备工艺相对复杂、器件一致性不足、制备成本高等挑战。非晶氧化物半导体的TFT由于制备温度低、迁移率高、均匀性好等优势受到了学术界和工业界的广泛关注。目前,在各类TFT中,非晶的铟镓锌氧化物薄膜晶体管(IGZO TFT)的研究最为成熟,IGZO是一种新型的n型半导体材料,被广泛应用于液晶显示器等领域^[14-17]。

相比于传统的非晶硅薄膜晶体管,IGZO TFT具有更高的电子迁移率、更低的漏电流和良好的透光率,可以显著提高TFT的开关速度、降低功耗、提高显示器的分辨率和色彩饱和度^[11-12]。研究表明,IGZO TFT不仅可以应用于显示领域,而且基于其对光、压力、pH及气体等参数具有可区分敏感性的优势,IGZO TFT在神经形态电子学^[18]及包括光学^[19]、生物^[20-21]、气敏^[22-23]及压力^[24-25]等在内的传感器领域也具有重要的研究和应用意义。

本文提出了一种IGZO TFT生物传感器,用于定量检测强直性脊柱炎血清学分子标志物,HLA-B27抗体功能化的IGZO TFT具有良好的可靠性和高灵敏度,所制备的生物传感器可以定量检测HLA-B27的质量浓度,检测极限低至1pg/mL。本文设计的高性能生物传感器有望扩展为传感器阵列平台,实现对某种疾病多种标志物的联合检测,在便携式床旁诊断设备的应用中具有巨大潜力。

1 实验部分

1.1 IGZO TFT的制备

采用背栅顶接触结构制造a-IGZO TFT,实验具体流程如下:选用电阻率低于 $0.005\ \Omega\cdot\text{cm}$ 的p型重掺杂硅作为衬底和栅电极,在硅上有一层300 nm厚的热氧化 SiO_2 ,作为器件的栅介质层,首先对衬底进行标准清洗,利用光刻技术和射频磁控溅射沉积IGZO薄膜,其中In、Ga、Zn三者的原子比为1:1:1;为了保证薄膜优异的半导体性质,溅射过程中的Ar和 O_2 的流量比为24:1.2,沉积气压设置为0.8 Pa,沉积功率设置为50 W;在沉积了50 nm的IGZO有源层之后,在空气下进行350℃热退火处理1 h;利用电子束蒸发技术,在表面选择性沉积了10 nm厚的钛(Ti)和100 nm厚的金(Au)作为源极(S)和漏极(D),其中器件沟道宽长比 $W/L=100/40$;最后,利用SU-8光刻胶对金属电极进行钝化,利用光刻工艺将沟道区域暴露出来以便后续的修饰过程。

1.2 功能化修饰

将暴露出的传感区域浸入到5%的3-氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)溶液中孵育1 h,用乙醇清洗,并在110℃的烘箱中静置30 min,使APTES的硅烷化作用更强;然后将APTES-IGZO表面浸入5%的戊二醛溶液中,在摇床上孵育2 h,完成后用PBS缓冲液冲洗并用氮气吹干;再将其用10 $\mu\text{g/mL}$ 的HLA-

B27 抗体溶液在 4℃下孵育 24 h,用去离子水冲洗并用氮气吹干;最后,在 4℃下用 0.01 g/mL 的 BSA 溶液孵育 1 h,用于钝化表面并减少非特异性吸附。修饰后的传感器原理如图 1 所示。

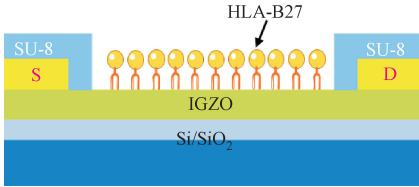


图 1 功能化的 IGZO TFT 生物传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the functionalized IGZO TFT biosensor

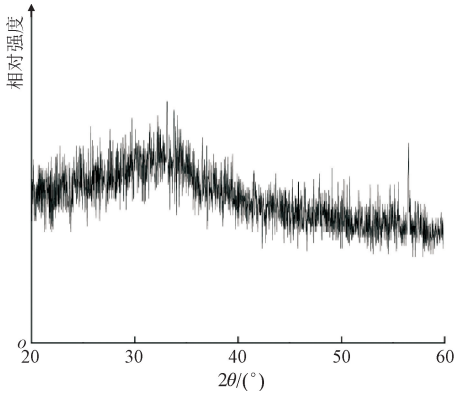
1.3 测试与表征

分别采用 X 射线衍射(XRD)和 X 射线光电子谱(XPS)对薄膜的性质进行了探究,采用半导体器件测试系统(Keithly 4155)表征传感器的输出和转移特性曲线。

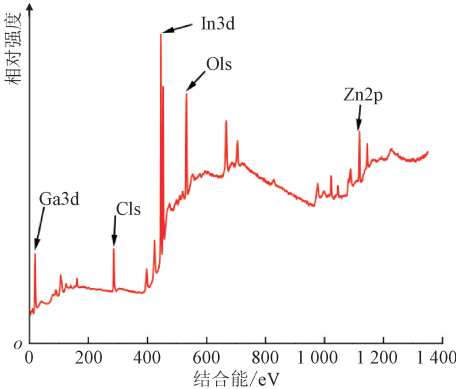
2 结果与讨论

2.1 IGZO 薄膜的特性分析

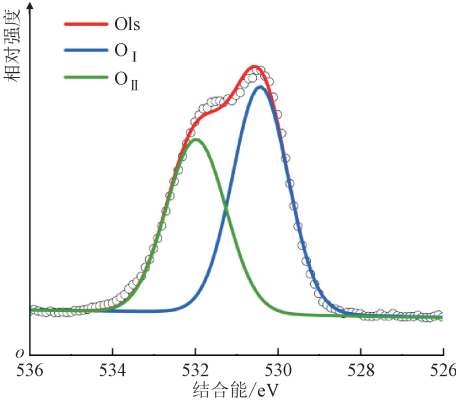
首先对磁控溅射的 IGZO 薄膜进行特性分析,采用 XRD 验证 IGZO 薄膜是否为非晶态,如图 2(a)所示。可以看出,薄膜未表现出尖锐的晶态峰,只有散射峰存在,说明薄膜的形态和内部结构一致,利用磁控溅射制备的 IGZO 薄膜呈现非晶态,这是因为在室温状态下,O 原子不足以与 In、Ga、Zn 原子形成晶体结构。非晶态的 IGZO 薄膜没有明显的晶界,表面平整度相对较好。使用 XPS 对薄膜的性质进行探究,未退火条件下的 IGZO 薄膜的 XPS 能谱图如图 2(b)所示,其中 In3d、Ga3d、Zn2p 和 O1s 的特征峰明显,基本无其他杂质,其中的 C 元素为 XPS 图谱定标时所用,结合能用 284.8 eV 的 C1s 峰为基准校正。由于 IGZO 是一种 N 型半导体材料,主要依靠浅能级氧空位提供自由电子,薄膜中氧空位含量会影响其导电性,进而影响器件的性能。随后对比了退火前后薄膜内部氧空位含量的差异,使用 XPS 对未退火和空气下 400℃退火 30 min 的 O1s 能谱进行测量,测量完成后将每个 O1s 能谱分为晶格氧 O_I 和空位氧 O_{II} 能谱,结果如图 2(c)、2(d)所示。未退火时氧空位为 44.54%,退火后氧空位降至 35.97%,表面退火处理后薄膜内部的氧空位含量大幅度降低,退火能够有效消除薄膜的内部缺陷,改善薄膜质量^[26]。



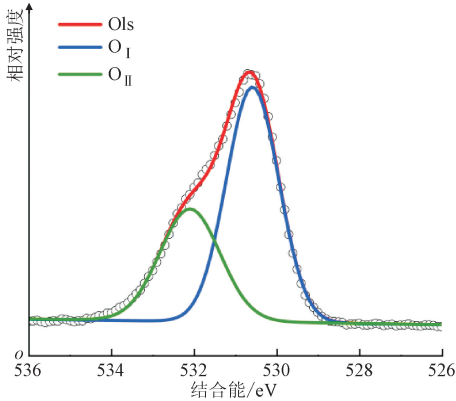
(a)IGZO 薄膜的 XRD 图谱



(b)a-IGZO 薄膜的 XPS 能谱图



(c)不退火条件的 O1s 能谱



(d)空气 400℃退火 30 min 的 O1s 能谱

图 2 磁控溅射制备的 IGZO 薄膜特性

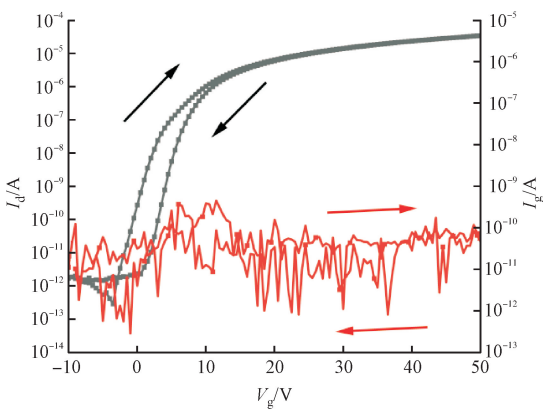
Fig. 2 Characterization of IGZO films prepared by sputtering

2.2 IGZO TFT 的电学性能

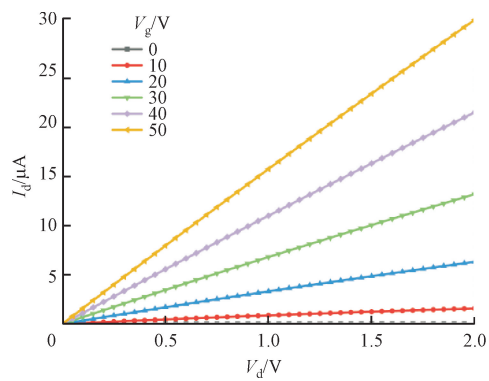
对于生物传感器,IGZO TFT 器件本征的性能是作为传感器的基础,首先对 IGZO TFT 的电学特性进行了测量,由于 IGZO 薄膜在空气中比较稳定,所以测试在空气中进行。对器件施加 2 V 的漏极电压,测量器件的场效应特性,包括件的转移特性曲线和输出特性曲线,结果如图 3(a)、3(b)所示,图中 I_g 为栅漏电流。从转移曲线中看到,IGZO TFT 存在一定的迟滞窗口,由于有源层是通过物理沉积方法制备的,有源层与绝缘栅介质的界面处存在一定的缺陷,缺陷捕获载流子再释放,从而导致了器件的回滞现象。为了评价器件性能的优劣^[27-29]需计算出器件的场效应迁移率,即

$$\mu_{FE} = \frac{g_m L}{W V_d C_{ox}} = \frac{dI_d}{dV_g} \frac{L}{W V_d C_{ox}} \tag{1}$$

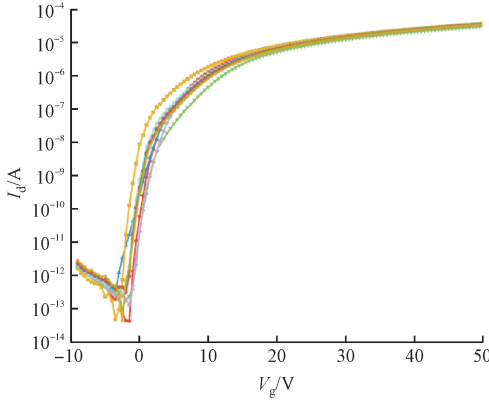
式中: W 、 L 分别为 TFT 沟道的宽和长; C_{ox} 为单位栅氧化物电容; g_m 为 TFT 的跨导。计算可得 $\mu_{FE} = 15.43 \text{ cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$, 电流开关比 $I_{on}/I_{off} = 7.3 \times 10^8$, 动态交换容量亚阈值摆幅 $S = 0.71 \text{ V}$ 。这说明制备的 IGZO TFT 具有优异的电学特性,且相比文献中报道的迁移率还要高^[20,23,29-31]。为了研究器件的均一性,在相同的氧化硅衬底上制备了 9 个 IGZO TFT 测试了转移特性曲线,如图 3(c)所示,可知不同器件的曲线基本一致。上述结果表明,IGZO TFT 具有优异的场效应特性和均一性。器件的偏压稳定性结果如图 3(d)所示,当施加了一段时间的正偏压后,器件阈值电压向右漂移,对于迁移率和亚阈值摆幅并没有太大的影响,阈值电压增大是 IGZO TFT 一直存在的问题。引起阈值电压变大的原因是界面缺陷态捕获电荷以及电荷进入栅绝缘层。在正偏压下,陷阱态处的电子对栅压有部分抵消作用,导致沟道中有效电场变小^[32-33]。



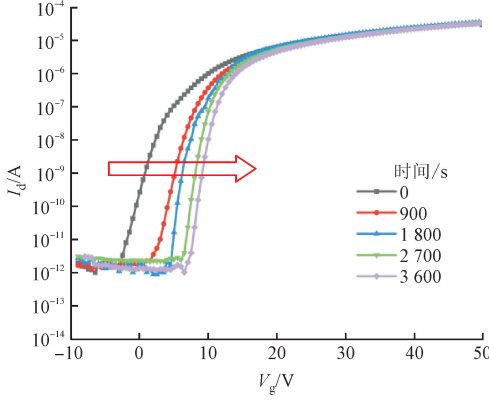
(a)IGZO TFT 的转移特性



(b)IGZO TFT 的输出特性



(c)IGZO TFT 器件的均一性



(d)栅极正偏压下 IGZO TFT 转移特性

图 3 $V_d = 2 \text{ V}$ 时 IGZO TFT 的转移特性和输出特性曲线
Fig. 3 Transfer characteristics and output characteristics of IGZO TFT with $V_d = 2 \text{ V}$

2.3 IGZO TFT 用于 HLA-B27 的检测

利用 APTES 修饰的 IGZO TFT 可以锚定抗体在沟道表面,抗体功能化后的 IGZO TFT 能够特异性的检测强直性脊柱炎血清学分子标志物 HLA-B27 抗原。图 4 展示了修饰前后 IGZO TFT 的转移特性曲线的变化,施加源漏电压 $V_D = 0.2 \text{ V}$,可知,经过 APTES 修饰后的开态电流下降,这是因为在 APTES 分子中,氨基基团(NH_2)具有一对孤立的电子,使其成为一个碱性基团。在水或其他极性

溶剂中,氨基会与溶剂中的负离子发生相互作用,从而通过捐赠一个电子对来形成正电荷,这使得 APTES 具有带正电的性质,电流的降低说明在 IGZO 表面发生了 p 型掺杂。而经过 HLA-B27 抗体修饰后,电流进一步降低,这是因为蛋白质分子上有氨基酸残基,与 IGZO 表面的载流子相互作用,同时还会造成载流子的散射,从而降低了载流子的迁移和导电能力。

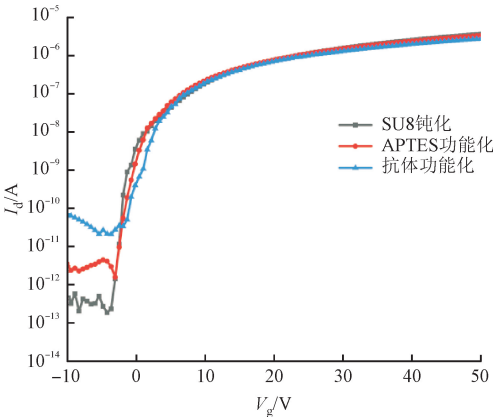


图 4 功能化修饰后 IGZO TFT 的转移特性曲线
Fig. 4 Transfer characteristics of IGZO TFT after functionalized

随后测试了 IGZO TFT 对抗原的电流响应。将器件置于开启状态,施加栅压在 25~35 V 的范围,对传感器进行了一系列质量浓度的 HLA-B27 抗原(1~100 ng/mL)的检测,结果如图 5 所示。抗体修饰的 IGZO TFT 生物传感器在识别带负电的质量浓度为 1 pg/mL 的 HLA-B27 抗原溶液后,电流下降了 0.41 μA 。随着 HLA-B27 抗原质量浓度不断增加,电流逐渐降低,说明 IGZO TFT 生物传感器对 HLA-B27 具有有效识别和传感特性。电流降低的原因是由于 n 型沟道表面结合蛋白后,由于蛋白质在 PBS 缓冲液中呈现电负性,会产生一个负栅压,降低了 IGZO 薄膜表面的载流子质量浓度,随着蛋白质质量浓度的增高,负栅压效应就会更大,因此电流降低会越明显。电流的变化取决于蛋白在传感器表面与抗体的结合数量,因此可以建立电流变化($\Delta I_d/I_0$)与 HLA-B27 抗原质量浓度($c_{\text{HLA-B27}}$)之间的关系。图 6 展示出了 IGZO TFT 生物传感器 $\Delta I_d/I_0$ 与 $c_{\text{HLA-B27}}$ 的线性曲线,传感器的响应随着被测物质量浓度的降低而逐渐减小,拟合得到的线性响应曲线为(拟合度 $R^2=0.985$)

$$\Delta I_d/I_0 = 0.302 + 0.019\lg(c_{\text{HLA-B27}}) \quad (2)$$

因此,根据传感器的响应可以通过式(2)来定量计算得到 HLA-B27 抗原的质量浓度。

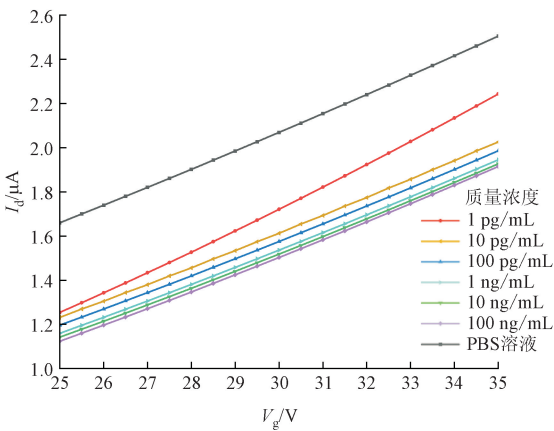


图 5 IGZO TFT 对不同质量浓度 HLA-B27 溶液的电学响应
Fig. 5 Electrical response of IGZO TFT to different concentrations of HLA-B27 solutions

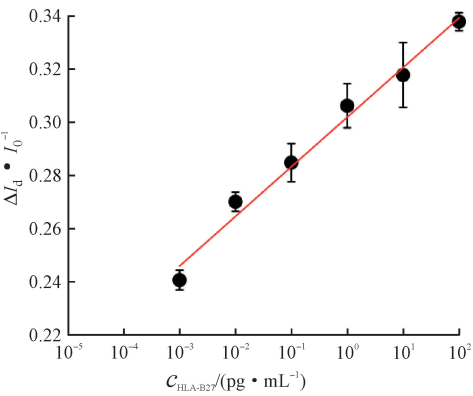


图 6 IGZO TFT 生物传感器电流变化与 HLA-B27 质量浓度的关系
Fig. 6 Relationship between current changes and HLA-B27 concentration in IGZO TFT biosensor

为了评估设计的 IGZO TFT 生物传感器的特异性和选择性,分别测试了 HLA-B27 抗体功能化修饰后的 IGZO TFT 生物传感器对人体白细胞抗原 HLA-B7、HLA-B13、HLA-B27、HLA-B40 的响应。从图 7 可以看出,对比高浓度的非特异性抗原和低浓度的特异性抗原,特异性抗原响应值约为非特异性抗原的 6~7 倍,说明 HLA-B27 抗体功能化修饰后的 IGZO TFT 生物传感器对 HLA-B27 抗原具有优异的选择性,能够特异性识别抗原,从而进一步确保了生物传感器在复杂环境中识别目标分子的能力。

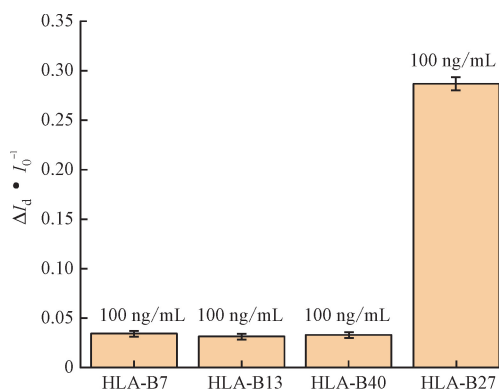


图7 IGZO TFT生物传感器对低质量浓度特异性抗原和高质量浓度非特异性抗原的响应对比

Fig. 7 Comparison of IGZO TFT biosensor response to low concentration of specific antigen and high concentration of non-specific antigen

3 结论

本文设计并制备了具有高迁移率和高开关比的IGZO TFT生物传感器,并将其应用于强直性脊柱炎血清学分子标志物 HLA-B27 的检测。实验结果表明,制备的生物传感器具有很高灵敏的灵敏度,能够对目标分子特异性识别,对 1 pg/mL 至 100 ng/mL 范围内的抗原均有良好的线性响应,检测极限为 1 pg/mL。利用晶体管作为生物标志物痕量检测的装置,具有高灵敏度和高特异性,提高了检测效率,高性能的传感器能够进一步扩展为传感器阵列,可以同时检测多种目标分子,包括核酸、蛋白质、细胞等,能够实现对某种疾病多种标志物的联合检测,在下一代即时检测中具备了良好的应用前景,有望在便携式床旁诊断设备中发挥巨大潜力。

参考文献:

- [1] TAUROG J D, CHHABRA A, COLBERT R A. Ankylosing spondylitis and axial spondyloarthritis [J]. *New England Journal of Medicine*, 2016, 374 (26): 2563-2574.
- [2] 刘越, 赵艳梅, 夏群. 强直性脊柱炎的诊断与治疗进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2015, 23(3): 235-238.
LIU Yue, ZHAO Yanmei, XIA Qun. Progress on diagnosis and treatment of ankylosing spondylitis [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2015, 23(3): 235-238.
- [3] 朱洪民. 强直性脊柱炎早期诊断的临床研究 [D]. 广州: 南方医科大学, 2011.
- [4] CHEN Bin, LI Jia, HE Chongru, et al. Role of HLA-B27 in the pathogenesis of ankylosing spondylitis [J].

- Molecular Medicine Reports*, 2017, 15(4): 1943-1951.
- [5] BENJAMIN R, PARHAM P. Guilt by association: HLA-B27 and ankylosing spondylitis [J]. *Immunology Today*, 1990, 11(4): 137-142.
- [6] WADHERA T, KAKKAR D, WADHWA G, et al. Recent advances and progress in development of the field effect transistor biosensor: a review [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2019, 48(12): 7635-7646.
- [7] SYU Y C, HSU W E, LIN C T. Field-effect transistor biosensing: devices and clinical applications [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2018, 7(7): Q3196.
- [8] VU C A, CHEN W Y. Field-effect transistor biosensors for biomedical applications: recent advances and future prospects [J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4214.
- [9] CHAO Lemeng, LIANG Ying, HU Xiao, et al. Recent advances in field effect transistor biosensor technology for cancer detection: a mini review [J]. *Journal of Physics: Applied Physics*, 2021, 55(15): 153001.
- [10] NOVODCHUK I, BAJCSY M, YAVUZ M. Graphene-based field effect transistor biosensors for breast cancer detection: a review on biosensing strategies [J]. *Carbon*, 2021, 172: 431-453.
- [11] SAMY O, ZENG S, BIROWOSUTO M D, et al. A review on MoS₂ properties, synthesis, sensing applications and challenges [J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 355.
- [12] TRAN T T, MULCHANDANI A. Carbon nanotubes and graphene nano field-effect transistor-based biosensors [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2016, 79: 222-232.
- [13] UPADHYAY K T, CHATTOPADHYAY M K. Sensor applications based on AlGaIn/GaN heterostructures [J]. *Materials Science and Engineering*, 2021, 263: 114849.
- [14] MA Qungang, WANG Haihong, ZHOU Liufei, et al. Robust gate driver on array based on amorphous IGZO thin-film transistor for large size high-resolution liquid crystal displays [J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2019, 7: 717-721.
- [15] IWASE Y, TAGAWA A, TAKEUCHI Y, et al. A novel low-power gate driver architecture for large 8 K 120 Hz liquid crystal display employing IGZO technology [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(5): 304-313.
- [16] HSIEH H H, LU H H, TING H C, et al. Development of IGZO TFTs and their applications to next generation flat: panel displays [J]. *Journal of Information Display*, 2010, 11(4): 160-164.
- [17] WU G M, LIU C Y, SAHOO A K. RF sputtering

- deposited a-IGZO films for LCD alignment layer application [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 354: 48-54.
- [18] HE Yongli, NIE Sha, LIU Rui, et al. Dual-functional long-term plasticity emulated in IGZO-based photoelectric neuromorphic transistors [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(5): 818-821.
- [19] SEN A, PARK H, PUJAR P, et al. Correction to probing the efficacy of large-scale nonporous IGZO for visible-to-NIR detection capability: an approach toward high-performance image sensor circuitry [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(10): 17478.
- [20] SHEN Yichun, YANG C H, CHEN Shuwen, et al. IGZO thin film transistor biosensors functionalized with ZnO nanorods and antibodies [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2014, 54: 306-310.
- [21] LI Yingxue, ZENG Bo, YANG Yujie, et al. Design of high stability thin-film transistor biosensor for the diagnosis of bladder cancer [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2020, 31(6): 1387-1391.
- [22] SHIN W, KWON D, RYU M, et al. Effects of IGZO film thickness on H₂S gas sensing performance: response, excessive recovery, low-frequency noise, and signal-to-noise ratio [J]. *Sensors and Actuators: Chemical*, 2021, 344: 130148.
- [23] TANG Hongyu, LI Yutao, SOKOLOVSKIY R, et al. Ultra-high sensitive NO₂ gas sensor based on tunable polarity transport in CVD-WS₂/IGZO p-N heterojunction [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(43): 40850-40859.
- [24] XIN Chen, CHEN Longlong, LI Tongkuai, et al. Highly sensitive flexible pressure sensor by the integration of microstructured PDMS film with a-IGZO TFTs [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, 39(7): 1073-1076.
- [25] GENG Di, HAN Songyi, SEO H, et al. Piezoelectric pressure sensing device using top-gate effect of dual-gate a-IGZO TFT [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(3): 585-586.
- [26] MUDGAL T, WALSH N, MANLEY R G, et al. Impact of annealing on contact formation and stability of IGZO TFTs [J]. *ECS Transactions*, 2014, 61(4): 405.
- [27] 孟帅, 李浩宇, 黄超宁, 等. 基于 MoS₂ 场效应晶体管的生物传感器用于无标记检测 [J]. *光散射学报*, 2023, 35(2): 135-141.
- MENG Shuai, LI Haoyu, HUANG Chaoning, et al. MoS₂ field-effect transistor-based biosensor for label-free detection [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2023, 35(2): 135-141.
- [28] LI Yingxue, ZENG Bo, YANG Yujie, et al. Design of high stability thin-film transistor biosensor for the diagnosis of bladder cancer [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2020, 31(6): 1387-1391.
- [29] 吴捷, 门传玲. 有源层厚度对氧化铜铟锌薄膜晶体管性能的影响 [J]. *电子元件与材料*, 2016, 35(6): 44-47.
- WU Jie, MEN Chuanling. Effect of active layer thickness on the performance of IGZO thin-film-transistors [J]. *Electronic Components and Materials*, 2016, 35(6): 44-47.
- [30] 刘翔, 张盛东, 薛建设, 等. 高性能金属铜铟锌氧化物 TFT 的研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2014, 34(2): 130-133.
- LIU Xiang, ZHANG Shengdong, XUE Jianshe, et al. Improvement of indium gallium zinc oxide thin film transistor with etch-stop layer of bottom-gate [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2014, 34(2): 130-133.
- [31] DU Xiaosong, LI Yajuan, MOTLEY J R, et al. Glucose sensing using functionalized amorphous In-Ga-Zn-O field-effect transistors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(12): 7631-7637.
- [32] SURESH A, MUTH J F. Bias stress stability of indium gallium zinc oxide channel based transparent thin film transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(3): 033502.
- [33] LEE J M, CHO I T, LEE J H, et al. Bias-stress-induced stretched-exponential time dependence of threshold voltage shift in InGaZnO thin film transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(9): 093504.

(编辑 赵炜 陶晴)