



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research MEMS Sensors—Article

基于自解耦三明治结构的横向运动栅场效应晶体管微机电系统微力传感器

高文迪^{a,b,c,d}, 乔智霞^e, 韩香广^{a,b}, 王小章^{a,b}, Adnan Shakoor^{f,g}, 刘存朗^a, 卢德江^{a,b,*}, 杨萍^{a,b}, 赵立波^{a,b,*}, 王永录^{a,b}, 王久洪^{a,b}, 蒋庄德^{a,b}, 孙东^{a,g}

^a State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, International Joint Laboratory for Micro/Nano Manufacturing and Measurement Technologies, Overseas Expertise Introduction Center for Micro/Nano Manufacturing and Nano Measurement Technologies Discipline Innovation, Xi'an Jiaotong University (Yantai) Research Institute for Intelligent Sensing Technology and System, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

^b Shandong Laboratory of Yantai Advanced Materials and Green Manufacturing, Yantai 265503, China

^c Beijing Advanced Innovation Center for Intelligent Robots and Systems, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

^d State Key Laboratory of Robotics and Systems, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China

^e Eleventh Research Institute, Sixth Academy of China Aerospace Science and Technology Co., Xi'an 710100, China

^f Department of Control and Instrumentation Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia

^g Department of Biomedical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 September 2021

Revised 8 March 2022

Accepted 5 June 2022

Available online 13 August 2022

关键词

微力传感器

横向运动栅极

场效应管

柔性光刻胶 SU-8

生物医学显微操作

摘要

本文介绍了一种基于横向运动栅极场效应晶体管(LMGFET)的新型微型力传感器。文中提出了一种用于小型LMGFET器件性能评估的电气模型,与以前的模型相比,其具有更高精度。由此设计了一种新型的三明治夹层结构,该结构由跨轴解耦Au-栅极阵列层和两个柔性光刻胶SU-8层组成。通过所提出的双差分传感布置,LMGFET工作时受垂直干扰产生的输出电流被大大消除,所提出传感器的相对输出误差从4.53%(传统差分结构)降低到0.01%。本文还为所提出的传感器开发和模拟了一个可行的制造工艺过程。基于LMGFET的力传感器的灵敏度为 $4.65 \mu\text{A} \cdot \text{nN}^{-1}$,可与垂直可动栅极场效应晶体管(VMGFET)器件相媲美,器件的非线性度提高了0.78%,测量范围扩大为 $\pm 5.10 \mu\text{N}$ 。上述分析能够为LMGFET器件的电气和结构参数提供全面的设计优化指导,并证明了所提出的传感器在生物医学显微操作应用中具有出色的力传感潜力。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

微机电系统(MEMS)微力传感器是许多生物医学研究中有有效和必要的工具,已被用于测量活细胞或组织的杨氏模量[1–2]、黏度[3–4]和运动牵引力[5],以研究生物过程和生物医学反应。微力传感器可以在微型机器人生物医学操作中提供精确的力反馈,以提高自动化程度[6–7]和

生物物体的存活率[8–9]。最近的研究集中在细胞器或分子水平,从而增加了对亚纳牛顿水平的超低力的传感需求。目前的力传感器设备主要基于传感原理,如电容式[10–11]、压阻式[12–13]和压电式[14–15]原理。与基于其他原理的器件相比,可运动栅极场效应晶体管(MGFET)力传感器具有几个优势,例如,晶体管阵列结构带来的高灵敏度[16–17]、便捷的信号放大和集成电路调制[18],使

* Corresponding authors.

E-mail addresses: djlu@xjtu.edu.cn (D. Lu), libozhao@xjtu.edu.cn (L. Zhao).

得微纳尺度力的片上集成测量变得可行。与传统的金属氧化物半导体场效应晶体管相比, MGFET 器件在衬底沟道区域上具有浮动栅极, 并且由于气隙的存在, 可以沿三个轴运动, 如图1所示。源极和漏极之间的电流反映了所施加的外部负载。根据栅极运动方向, MGFET 器件分为两种类型: 垂直 MGFET (VMGFET) 和横向 MGFET (LMGFET)。VMGFET 具有高灵敏度, 但它们的运动范围受到小气隙厚度的限制, 测量线性随着栅极垂直变形的增加而降低。在生物医学测量过程中, 例如, 在生物细胞显微注射中的膜穿过程中[19–20], 当力的幅度急剧增加超过 VMGFET 器件的量程时, 通常会出现急剧增加的负载。在 LMGFET 中, 栅极沿沟道宽度横向运动, 空气间隙保持不变。LMGFET 的测量范围大于 VMGFET, 其输出电流在量程内呈线性变化。因此, 在生物医学测量中, 高灵敏度 LMGFET 力传感器比 VMGFET 更通用。

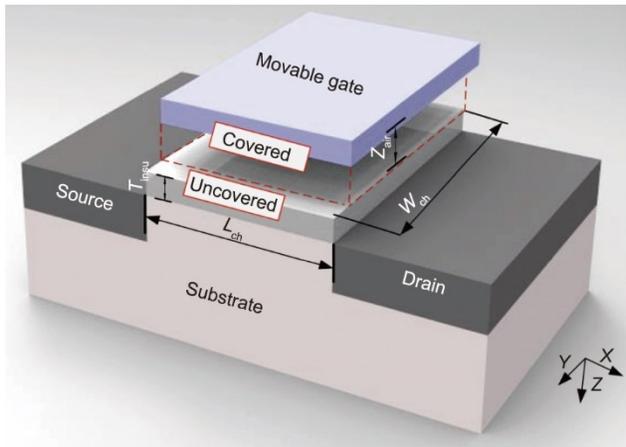


图1. MGFET 的传感单元。 T_{insu} : 绝缘体厚度; L_{ch} : 沟道长度; Z_{air} : 气隙厚度; W_{ch} : 沟道宽度。

研究人员在这两种类型的基础上开发了多种 MGFET 器件, 如基于 VMGFET 的加速度计[21–22]、差分放大器[23]和基于 LMGFET 的位移传感器[24]。现有的研究发现, 可以通过缩小晶体管尺寸提高测量灵敏度。然而, 参考文献[21–24]广泛采用了长沟道模型, 忽略了尺度效应, 对于描述 MGFET 的性能是不准确的, 尤其是对于小尺寸器件。在我们之前的研究中, 提出了小型 VMGFET 器件的精确电气模型[25]。然而, LMGFET 器件的运动栅极部分覆盖了沟道区域, 而另一部分暴露出来。LMGFET 器件的工作行为比 VMGFET 器件的工作行为相对更复杂, 使得先前的 VMGFET 模型不再适用于 LMGFET 设计。因此, 一个新的精确的电学模型对于小尺寸 LMGFET 器件的性能评估是至关重要的。此外, MGFET 的输出电流随着其栅极的横向和纵向运动而变化, 来自非工作方向的负

载会对输出信号产生较大的干扰。

工程上通常采用差分传感方法来削弱 MGFET 器件中的跨轴耦合效应[23,25]。但是, 这种方法很难对 LMGFET 产生直接效果, 因为当栅极垂直运动时, 输出电流也会发生显著变化。来自横向负载的输出变化会被垂直干扰淹没, 从而产生测量误差。因此, 当前亟需设计一种新的解耦可动结构和传感布置方案来提高测量精度。具体而言, 通过降低可动结构的刚度, 可以进一步提高 MGFET 器件的测量灵敏度。从现有的 MGFET 器件来看, 可动结构主要由刚性材料制成, 例如, 具有大刚度的硅[21]和镍[22,24], 其使得可动结构在受载时变形量很低。提高测量灵敏度的一个可行方法是用其他柔性材料代替这些刚性材料。然而, 这对于 LMGFET 器件来说是困难的, 因为它们需要高纵横比的结构以增大其他方向的刚度, 过往研究中并没有进行过这样的尝试。

本研究的主要贡献如下。首先, 提出了一种基于分离沟道的电气模型来描述小尺寸 LMGFET 器件的工作行为, 并证明了其提升的精度和用于小尺寸器件性能评估能力。其次, 充分分析了 LMGFET 单元的电气和结构参数, 以优化超低力传感应用的性能。再次, 提出了一种柔性夹层结构的 LMGFET 微力传感器, 其由一个跨轴解耦的 Au-栅极阵列层和两个柔性光刻胶 SU-8 层组成。该传感器采用新颖的双差分解耦传感布置, 具有出色的传感灵敏度和抗干扰能力。最后, 利用实际的制作工艺对所提出的 LMGFET 力传感器进行了仿真。该传感器突破了 MGFET 器件的传感精度和量程之间的限制。在 $\pm 5.10 \mu\text{N}$ 的大测量范围内, 其测量灵敏度为 $4.65 \mu\text{A} \cdot \text{nN}^{-1}$, 非线性度小于 0.78%。

本文的其余部分组织如下: 第2节模拟和分析 LMGFET 的电气行为。第3节具体介绍了提出的 LMGFET 力传感器, 描述了其机械模型和传感配置。第4节介绍了一种可行的传感器制造工艺。通过仿真和实验结果验证了理论模型, 并讨论了传感器的性能。第5节给出了结论。

2. LMGFET 的电气模型

当 LMGFET 的栅极横向移动时, 沟道宽度会发生变化, 因此 LMGFET 可以分为两个独立的部分, 即宽度为 W_{chc} 的覆盖沟道区和宽度为 W_{chu} 的未覆盖沟道区 ($W_{\text{chu}} = W_{\text{ch}} - W_{\text{chc}}$) (式中, W_{ch} 是整个沟道宽度)。这两个部分共享某些共同的参数, 如沟道长度 L_{ch} 、栅极和源极电极之间的电压差 V_{gs} 以及漏极和源极电极之间的电压差 V_{ds} 。由于不同横向位置处的栅极调制效应的差异, 每个沟道区域中的电子电导显著不同。整个沟道表现出几个独立的电参

数, 如栅极电容 C'_{eff} 、载流子迁移率 U'_{eff} 和沟道电流 I_{ds} 。因此, 为了理解 LMGFET 的工作原理, 有必要研究每个部分的电参数, 本节将给出详细的研究过程。

2.1. 有效栅极电容

当栅极横向移动时, 栅极与被覆盖和未被覆盖的沟道区域之间的电容发生变化。栅极电容表示单位面积上的电容量。更具体地, 被覆盖的沟道区域 C'_{effc} 中的有效栅极电容是气隙和栅极绝缘体的串联电容, 其可以表示如下:

$$C'_{\text{effc}} = \frac{\varepsilon_0}{\frac{\varepsilon_0 T_{\text{insu}}}{\varepsilon_{\text{insu}} + Z_{\text{air}}} + Z'_{\text{effc}}} = \frac{\varepsilon_0}{Z'_{\text{effc}}} \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-1}$, 是空气的介电常数; $\varepsilon_{\text{insu}}$ 是绝缘体的介电常数; Z_{air} 是气隙厚度; T_{insu} 是绝缘体厚度; Z'_{effc} 表示覆盖区域中的有效栅极间隙厚度。之前的一项研究假设, 在栅极移动期间, 未覆盖沟道区域 C'_{effu} 的有效栅极电容保持不变[24]; 然而, 这种假设并不符合实际, 并且会影响器件性能评估。本研究基于栅极侧壁和底部的边缘寄生效应提出了 C'_{effu} 的精确变量表达式[26–27]:

$$C'_{\text{effu}} = \frac{2\varepsilon_0}{\pi W_{\text{chu}}} \ln \left[\frac{Z'_{\text{effc}} + T'_g + \sqrt{T'^2_g + 2T'_g Z'_{\text{effc}}}}{Z'_{\text{effc}}} \right] + \frac{k\varepsilon_0}{\pi W_{\text{chu}} L_{\text{ch}}} \ln \left[\frac{\pi L_{\text{ch}}}{Z'_{\text{effc}}} \right] = \frac{\varepsilon_0}{Z'_{\text{effu}}} \quad (2)$$

式中, $T'_g = T_g e^{\left(\frac{\pi W_{\text{chu}} - \sqrt{T'^2_g + 2T'_g Z'_{\text{effc}}}}{\beta Z'_{\text{effc}}} \right)}$ 是侧壁寄生电容的有效栅极厚度; T_g 是栅极厚度; k 和 β 是拟合参数; Z'_{effu} 是未覆盖区域中的有效栅极间隙厚度。

在不同的横向和高度位置检查两个分离区域的有效栅极电容, 并与来自有限元方法 (FEM) 软件 Ansoft Maxwell 的模拟结果进行比较。在此计算中, 整个沟道宽度 W_{ch} 为 $20 \mu\text{m}$; 气隙厚度 Z_{air} 为 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$; 栅极厚度 T_g 为 $0.2 \mu\text{m}$; 栅绝缘体为氮化硅, 厚度 T_{insu} 为 100 nm ; 沟道长度 L_{ch} 为 $5 \mu\text{m}$ 。在栅极移动过程中, 大部分电势集中在被覆盖的区域, 少量电势由于边缘寄生效应而分散在边界边缘。被覆盖的沟道区域 C'_{effc} 中的有效栅极电容在全宽度上几乎保持恒定。随着覆盖区域宽度 W_{chc} 接近零, 散射电势比例增加, 并且 C'_{effu} 出现小幅度的增加, 如图2所示。然而, 当 W_{chc} 的值较小为 $1 \mu\text{m}$ 时, 在三个不同的空气间隙中, 理论模型和模拟结果之间的 C'_{effu} 的相对误差小于 3.0% 。未覆盖的沟道区 C'_{effu} 中的有效栅极电容值比 C'_{effc} 小一个数量级。未覆盖区域中的栅极电容主要来自栅极侧壁和底部的散射电势。总电势保持不变, 但在栅移动过程中, 未覆盖区域的大小会发生变化。 C'_{effu} 与覆盖区域的宽

度 W_{chc} 呈反比关系。当 W_{chc} 较低时, C'_{effu} 缓慢增加, 因为 W_{chu} 的变化不明显。然而, 当 W_{chc} 接近整个沟道宽度时, 未覆盖区域的大小变化很大, 导致 C'_{effu} 迅速增加。随着气隙 Z_{air} 减小, 散射电势增加, 然后加剧这种现象。 C'_{effu} 的计算结果也与模拟结果非常吻合, 最大相对误差小于 3.5% 。

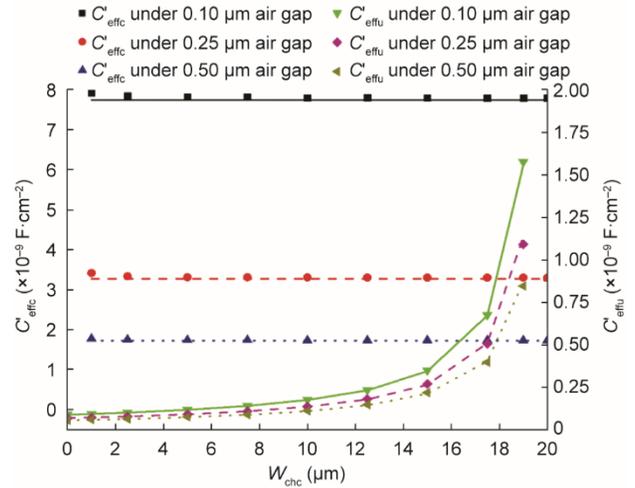


图2. 不同气隙下有效栅极电容 C'_{effc} 和 C'_{effu} 与沟道宽度之间的关系。曲线是理论计算的结果, 散点是模拟的结果。

2.2. 阈值电压

阈值电压是调节源电极和漏电极之间电流通道的关键开关参数。对于累积型 MGFET, 只有当栅极电压大于阈值电压时, 才会存在通道电流。对于耗尽型器件, 感应沟道电流最初是被诱导的, 接近阈值的栅极电压可以切断导电沟道。被覆盖和未被覆盖的沟道区域具有不同的阈值电压, 因此它们在横向和垂直栅极移动期间可以具有不同的沟道状态。考虑到短沟道和窄沟道效应, 这两个区域中的阈值电压分别建模如下:

$$V_{\text{thc}} = \varphi_{\text{MS}} + \varphi_{\text{B}} \pm F_{\text{S}} \frac{Z'_{\text{effc}} \sqrt{|2qN_{\text{a/d}} \varepsilon_{\text{si}} (\varphi_{\text{B}} - V_{\text{bs}})|}}{\varepsilon_0} \mp \frac{Q'_{\text{eff}} Z'_{\text{effc}}}{\varepsilon_0} + F_{\text{Nc}} (\varphi_{\text{B}} - V_{\text{bs}}) \quad (3)$$

$$V_{\text{thu}} = \varphi_{\text{MS}} + \varphi_{\text{B}} \pm F_{\text{S}} \frac{Z'_{\text{effu}} \sqrt{|2qN_{\text{a/d}} \varepsilon_{\text{si}} (\varphi_{\text{B}} - V_{\text{bs}})|}}{\varepsilon_0} \mp \frac{Q'_{\text{eff}} Z'_{\text{effu}}}{\varepsilon_0} + F_{\text{Nu}} (\varphi_{\text{B}} - V_{\text{bs}}) \quad (4)$$

式中, φ_{MS} 是栅极和沟道之间的功函数差; φ_{B} 是沟道内置电压, 对于 N 型沟道器件和 P 型沟道器件来说, 分别是 $\frac{k_{\text{B}} T}{q} \ln \left(\frac{N_{\text{a}}}{n_{\text{i}}^2} \right)$ 和 $-\frac{k_{\text{B}} T}{q} \ln \left(\frac{N_{\text{d}}}{n_{\text{i}}^2} \right)$; $N_{\text{a/d}}$ 分别是 P 型衬底中离子化受体的净浓度和 N 型衬底中受体的净浓度; $q = 1.6 \times$

10^{-19}C 是电子或空穴电荷的大小, n_i 是硅的固有掺杂浓度, k_B 是玻尔兹曼常量, T 是热力学温度; ϵ_{si} 是硅的介电常数; V_{bs} 是源电极和衬底电极之间的电压差; Q'_{eff} 是沟道的有效电荷密度, 式中负号和正号分别代表N沟道和P沟道器件; F_S 是沟道长度系数, 其表达式如下:

$$F_S = 1 - \frac{X_j \left[a + d_0 + d_1 \sqrt{\frac{|2\epsilon_{\text{si}}(\varphi_B - V_{\text{bs}})|}{qN_a}} + d_2 \sqrt{\frac{|2\epsilon_{\text{si}}(\varphi_B - V_{\text{bs}})|^2}{qN_a}} \right]}{L_{\text{ch}}} \times \sqrt{1 - \left[\frac{\sqrt{\frac{|2\epsilon_{\text{si}}(\varphi_B - V_{\text{bs}})|}{qN_a}}}{X_j + \sqrt{\frac{|2\epsilon_{\text{si}}(\varphi_B - V_{\text{bs}})|}{qN_a}}} \right]^2} - \frac{aX_j}{L_{\text{ch}}} \quad (5)$$

式中, X_j 是源极或漏极中P-N结的深度; a 、 d_0 、 d_1 和 d_2 是模型参数。 F_{Nc} 和 F_{Nu} 分别是覆盖和未覆盖沟道区域的沟道宽度系数, 其表达式如下:

$$F_{\text{Nc}} = \frac{\delta \pi \epsilon_{\text{si}} Z'_{\text{effc}}}{4W_{\text{chc}} \epsilon_0} \quad (6)$$

$$F_{\text{Nu}} = \frac{\delta \pi \epsilon_{\text{si}} Z'_{\text{effu}}}{4W_{\text{ch u}} \epsilon_0} \quad (7)$$

式中, δ 是沟道宽度模型系数。 F_S 项前的正号表示N沟道器件, 负号表示P沟道器件。 Q'_{eff} 项之前的符号与 F_S 项之

前的符号相反, 并且 F_S 和 Q'_{eff} 项之间的差值主要确定阈值电压的值。例如, 对于具有P型衬底的耗尽型MGFET器件, 较大的 Q'_{eff} 项会导致负的阈值电压。

尽管沟道长度系数 F_S 保持不变, 但沟道宽度系数在横向和垂直栅极移动期间会发生变化, 尤其是对于未覆盖的沟道区域, 其有效栅极间隙 Z'_{effu} 在不同位置会显著变化。因此, 阈值电压在两个沟道区会表现出不同的特性, 需要进行综合分析。首先研究了沟道 Q'_{eff} 的有效电荷密度和衬底浓度 N_a/d 。以P型衬底器件为例, 其参数如下: 沟道宽度 W_{ch} 为 $20 \mu\text{m}$, 气隙 Z_{air} 为 $0.25 \mu\text{m}$, 沟道长度 L_{ch} 为 $5 \mu\text{m}$, P-N结深度 X_j 为 $0.5 \mu\text{m}$, 本征掺杂浓度 n_i 为 $1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, 注入模型常数 $a = 0.04$, $d_0 = 0.0631353$, $d_1 = 0.8013292$, $d_2 = 0.01110777$, 功函数电压差 $\psi_{\text{MS}} = 3.83 \text{V}$ 。衬底和源极之间的电压差 $V_{\text{bs}} = 0 \text{V}$ 。其余参数与2.1节中给出的参数相同。表1从工况1到工况4研究了衬底受主浓度 N_a 的影响, 其中 N_a 从 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 增加到 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, 而 Q'_{eff} 保持在 $2.5 \times 10^{-8} \text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。工况1中 N_a 较小, 两个部分都表现为耗尽型晶体管, 并且沟道最初是导电的, 因为它们的能带已经被沟道表面中的主导电子弯曲。为了断开导电沟道, 需要负的阈值电压来吸引衬底中的空穴。然而, 当 N_a 增加到 $1.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 时, V_{thc} 变为正值, 而 V_{thu} 保持负值; 在工况2中, 被覆盖的部分变成积累型晶体管, 而未被覆盖的部分仍为耗尽型。由于其平坦的能带, 覆盖区域中的沟道在形成反型层之前是不导电的, 其中空穴在由正阈值电压 V_{thc} 产生的电势下聚集在沟道表面中。这种工况是器件设计所需要的, 因为可以消除具有非线性有效

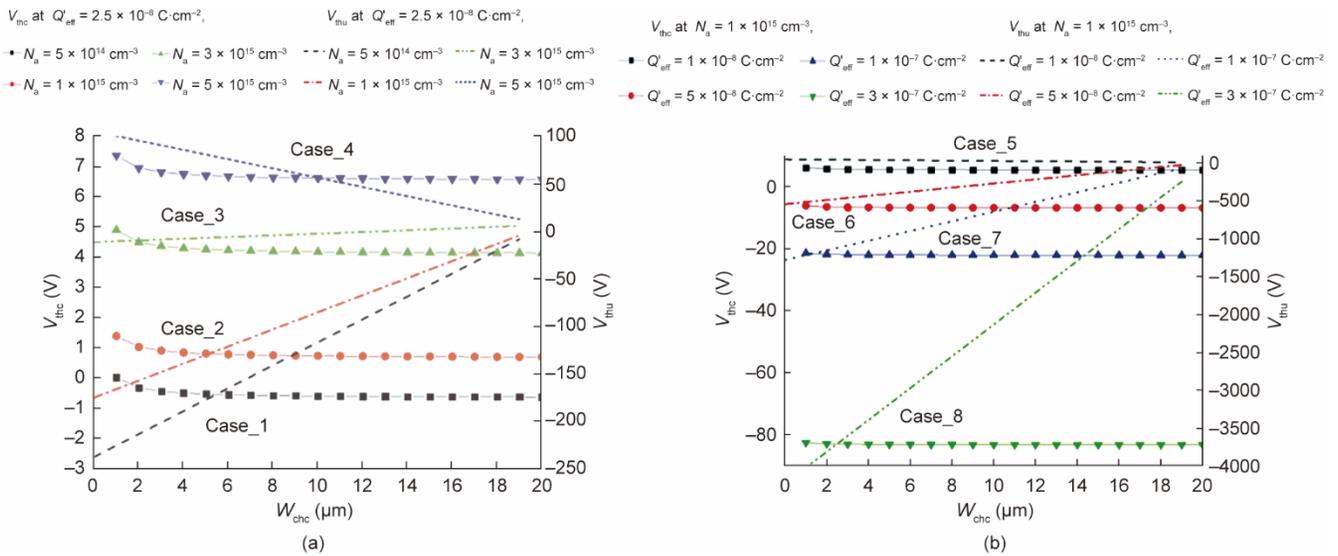


图3. 阈值电压 V_{thc} 和 V_{thu} 与不同宽度位置的电学参数之间的关系。(a) 衬底 N_a 中离子化受体的净浓度; (b) 有效沟道电荷密度 Q'_{eff} 。符号线表示被覆盖的沟道区域 V_{thc} 中的阈值电压, 虚线表示被覆盖的沟道区域 V_{thu} 中的阈值电压。工况1至工况4: N_a 从 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 增加到 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, 而 Q'_{eff} 保持在 $2.5 \times 10^{-8} \text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的低水平; 工况5至工况8: Q'_{eff} 从 $1 \times 10^{-8} \text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ 增加到 $3 \times 10^{-7} \text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$, 而 N_a 保持在 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。

栅极电容的未覆盖部分。然而，它会导致器件性能不佳，因为只有被覆盖的部分对输出电流有贡献。

在LMGFET工作期间，随着 W_{chc} 的增加， V_{thc} 略有降低，而 V_{thu} 急剧增加，这表明 V_{thu} 更容易受到沟道宽度调制的影响。更具体地说，在工况3中， V_{thu} 从 W_{chc} 为13 μm 时的0.817 V变为 W_{chc} 为14 μm 时的0.074 V。这种工况会使未覆盖区域在运行期间从耗尽型变为积累型，应该避免这种情况。当 N_a 增加到 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上时，这两个区域在工况4中变为累积型。工况5到工况8研究了有效电荷密度 Q'_{eff} 的效应，其中 Q'_{eff} 从 $1 \times 10^{-8} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增加到 $3 \times 10^{-7} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。在这些工况下， N_a 保持在 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，这是使用商用硅片通常可以获得值。工况5具有较低的 Q'_{eff} ，为 $1 \times 10^{-8} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，覆盖部分表现为积累型晶体管，而未覆盖部分为耗尽型晶体管。当 Q'_{eff} 增加到 $5 \times 10^{-8} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以上时，空穴占主导地位，使两个区域都作为耗尽型晶体管。

阈值电压 V_{th} 与几何参数 L_{ch} 和 Z_{air} 之间的关系如图4所示，式中 N_a 和 Q'_{eff} 分别设置为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 和 $2.5 \times 10^{-7} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。随着有效栅极高度 Z'_{effc} 的增加， V_{thc} 与气隙 Z_{air} 具有很强的负相关性。对于不同的沟道长度 L_{ch} ， V_{thc} 变化幅度不大。由于与 V_{thc} 相同的原因， V_{thu} 随着沟道长度 L_{ch} 的增加而缓慢增加，但是随着气隙 Z_{air} 的增加而显著降低。因此，通过分配电气和设计几何参数，可以实现期望的工作类型。在积累型器件中感应导电沟道的非零栅极电压可能会在可动栅极和衬底之间产生静电力，从而导致操作过程中不良的垂直干扰[28]。尽管电势差为零，但是耗尽型器件的沟道是导通的。因此，静电力被消除。换句话说，非常期望LMGFET器件采用耗尽型。因此，以下设计分析是基于LMGFET在固定栅极电压为0 V时不受静电力影响的准则而进行。

表1 不同电参数下覆盖沟道区和未覆盖沟道区的阈值电压

Case	$N_a \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$Q'_{\text{eff}} \text{ (C} \cdot \text{cm}^{-2}\text{)}$	$V_{\text{thc}} \text{ (V)}^a$	$V_{\text{thu}} \text{ (V)}^b$
1	5×10^{14}	2.5×10^{-8}	-	-
2	1×10^{15}	2.5×10^{-8}	+	-
3	3×10^{15}	2.5×10^{-8}	+	-/+
4	5×10^{15}	2.5×10^{-8}	+	+
5	1×10^{15}	1.0×10^{-8}	+	-
6	1×10^{15}	5.0×10^{-8}	-	-
7	1×10^{15}	1.0×10^{-7}	-	-
8	1×10^{15}	3.0×10^{-7}	-	-

^a “+” and “-” refer to accumulation and depletion types, respectively.

^b “-/+” indicates that the device changes from a depletion to accumulation type.

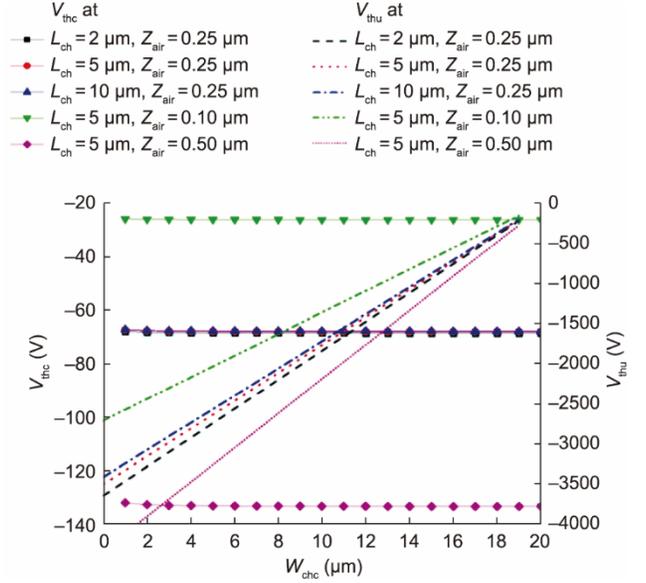


图4. 阈值电压 V_{th} 与不同宽度位置的几何参数 L_{ch} 和 Z_{air} 之间的关系。

2.3. 输出通道电流

LMGFET器件工作时两个沟道区域中的表面电流密度不同。因此，每个区域的漏极和源极之间的电流应该单独计算，总输出电流应该是它们的总和。通过对两个电极之间的沟道表面载流子的密度进行积分[29]，覆盖区域中的输出电流 I_{dsc} 和未覆盖区域中的输出电流 I_{dsu} 定义如下：

$$I_{\text{dsc}} = \frac{W_{\text{chc}} \mu'_{\text{effc}} Z'_{\text{effc}}}{L_{\text{ch}} \epsilon_0} \left(V_{\text{gs}} - V_{\text{thc}} - \frac{1 + F_{\text{Bc}}}{2} V_{\text{ds}} \right) V_{\text{ds}} \quad (8)$$

$$I_{\text{dsu}} = \frac{W_{\text{chu}} \mu'_{\text{effu}} Z'_{\text{effu}}}{L_{\text{ch}} \epsilon_0} \left(V_{\text{gs}} - V_{\text{thu}} - \frac{1 + F_{\text{Bu}}}{2} V_{\text{ds}} \right) V_{\text{ds}} \quad (9)$$

式中， $F_{\text{Bc/u}} = \frac{F_s \sqrt{2qN_a \epsilon_{\text{si}}}}{4 \sqrt{|\phi_{\text{B}} - V_{\text{bs}}|}} + F_{\text{Nc/u}}$ 是覆盖和未覆盖区域的

电压调制系数； μ'_{effc} 和 μ'_{effu} 分别为覆盖区和未覆盖区的有效载流子迁移率，可表示如下：

$$\mu'_{\text{effc}} = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\delta}{Z'_{\text{effc}}} (V_{\text{gs}} - V_{\text{thc}}) + \frac{\mu_0}{V_{\text{max}} L_{\text{ch}}} V_{\text{ds}}} \quad (10)$$

$$\mu'_{\text{effu}} = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\delta}{Z'_{\text{effu}}} (V_{\text{gs}} - V_{\text{thu}}) + \frac{\mu_0}{V_{\text{max}} L_{\text{ch}}} V_{\text{ds}}} \quad (11)$$

式中， μ_0 是低电下载流子的表面迁移率； δ 是垂直势场系数； V_{max} 是载流子的饱和速度。有效载流子迁移率主要受 $\frac{\delta}{Z'_{\text{effu/c}}} (V_{\text{gs}} - V_{\text{thu/c}})$ 和 $\frac{\mu_0}{V_{\text{max}} L_{\text{ch}}} V_{\text{ds}}$ 项（描述速度限制和横向电势退化效应）的控制[30]。当栅极转移到不同的沟道宽度和高度时， μ'_{effc} 和 μ'_{effu} 发生变化。当 V_{ds} 增加到饱和状态时， I_{ds} 接近饱和电流 I_{dsat} 的值。

正如在之前的研究[25]中所讨论的，小规模器件的饱

和电压是由饱和速度引起的。覆盖区域 V_{dsatc} 和未覆盖沟道区域 V_{dsatu} 中的饱和电压表示如下：

$$V_{\text{dsatc}} = \frac{V_{\text{gs}} - V_{\text{thc}}}{1 + F_{\text{Bc}}} + \frac{V_{\text{max}} L_{\text{ch}}}{\mu'_{\text{effc}}} - \sqrt{\left(\frac{V_{\text{gs}} - V_{\text{thc}}}{1 + F_{\text{Bc}}}\right)^2 + \left(\frac{V_{\text{max}} L_{\text{ch}}}{\mu'_{\text{effc}}}\right)^2} \quad (12)$$

$$V_{\text{dsatu}} = \frac{V_{\text{gs}} - V_{\text{thu}}}{1 + F_{\text{B}}} + \frac{V_{\text{max}} L_{\text{ch}}}{\mu'_{\text{effu}}} - \sqrt{\left(\frac{V_{\text{gs}} - V_{\text{thu}}}{1 + F_{\text{Bu}}}\right)^2 + \left(\frac{V_{\text{max}} L_{\text{ch}}}{\mu'_{\text{effu}}}\right)^2} \quad (13)$$

式中， I_{dsat} 是 LMGFET 器件的最大可控输出，直接受施加于漏电极上的阈值电压的影响。图5说明了这两个区域中的阈值电压与电参数（受主浓度 N_{a} 和有效沟道电荷密度 Q'_{eff} ）和几何参数（气隙 Z_{air} 和沟道长度 L_{ch} ）之间的关系。除了上述计算中的类似参数外，衬底和源电极之间的电压差 V_{gs} 为 0 V，载流子表面迁移率 μ_0 为 $700 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [31]，饱和速度 V_{max} 为 $8 \times 10^6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ [32]。这两个区域的饱和电压随着 N_{a} 和 Q'_{eff} 的增加而降低；它们也随着相应沟道宽度 ($W_{\text{chc}}/W_{\text{chu}}$) 的减小而减小。更具体地说，随着 N_{a} 和 Q'_{eff} 的增加，由于小宽度而减小的幅度变得明显。图5 (a) 中的绿线对应于表1中的工况2。被覆盖的沟道区域当前被断开，因此被覆盖区域中的饱和电压为0。几何参数显示出与电参数相反的影响， V_{dsatc} 随着 L_{ch} 和 Z_{air} 的增加

而增加，如图5 (b) 所示。 V_{dsatu} 随着 L_{ch} 的增加而增加，并且对气隙 Z_{air} 的变化不敏感。对于 10 m 的沟道宽度 W_{chu} ，当 Z_{air} 从 $0.1 \mu\text{m}$ 变为 $0.5 \mu\text{m}$ 时， V_{dsatu} 仅变化 0.18 V 。

所采用的饱和电压在栅极横向运动期间被设置为最低值，以分析其对应的饱和电流。同时假设如果施加的电压超过每个区域中的饱和值时电流 I_{ds} 保持恒定。由于阈值电压 V_{thc} 和 V_{thu} 的绝对值较大，较大的 Q'_{eff} 或较低的 N_{a} 在两个区域中导致较大的 I_{dsat} 。当在这种工况下只有未覆盖的沟道工作时，饱和电流近似为零，如图6 (a) 的绿线所示。沟道电流曲线的斜率定义为变形灵敏度 S ，并且可以用于评估当栅极横向移动时器件的电性能。灵敏度 S 随着沟道长度 L_{ch} 的增加而提高。对于 $0.25 \mu\text{m}$ 的气隙 Z_{air} ，当 L_{ch} 从 10 m 降至 $2 \mu\text{m}$ 时， S 从 $13.144 \mu\text{A} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 增加到 $17.140 \mu\text{A} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ，但应考虑器件的工作稳定性，因为较小的器件尺寸会在漏极和源极之间产生较大的电势场，很容易击穿器件。气隙 Z_{air} 对沟道电流 I_{ds} 和灵敏度 S 有非常大的影响，对于沟道宽度 W_{ch} 为 $10 \mu\text{m}$ 、沟道长度为 5 m 的器件，当 Z_{air} 从 0.5 降低到 $0.1 \mu\text{m}$ 时，沟道电流 I_{ds} 从 $1509.744 \mu\text{A}$ 增加到 $1796.400 \mu\text{A}$ ，在此期间， S 从 $34.634 \mu\text{A} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 降低到 $8.314 \mu\text{A} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ，如图6 (b) 所示。这种工况表明，不期望的垂直运动产生的输出电流变化是横向运动产生的几倍，因此需要去耦设计来消除垂直运动的干扰，这将在下一节讨论。

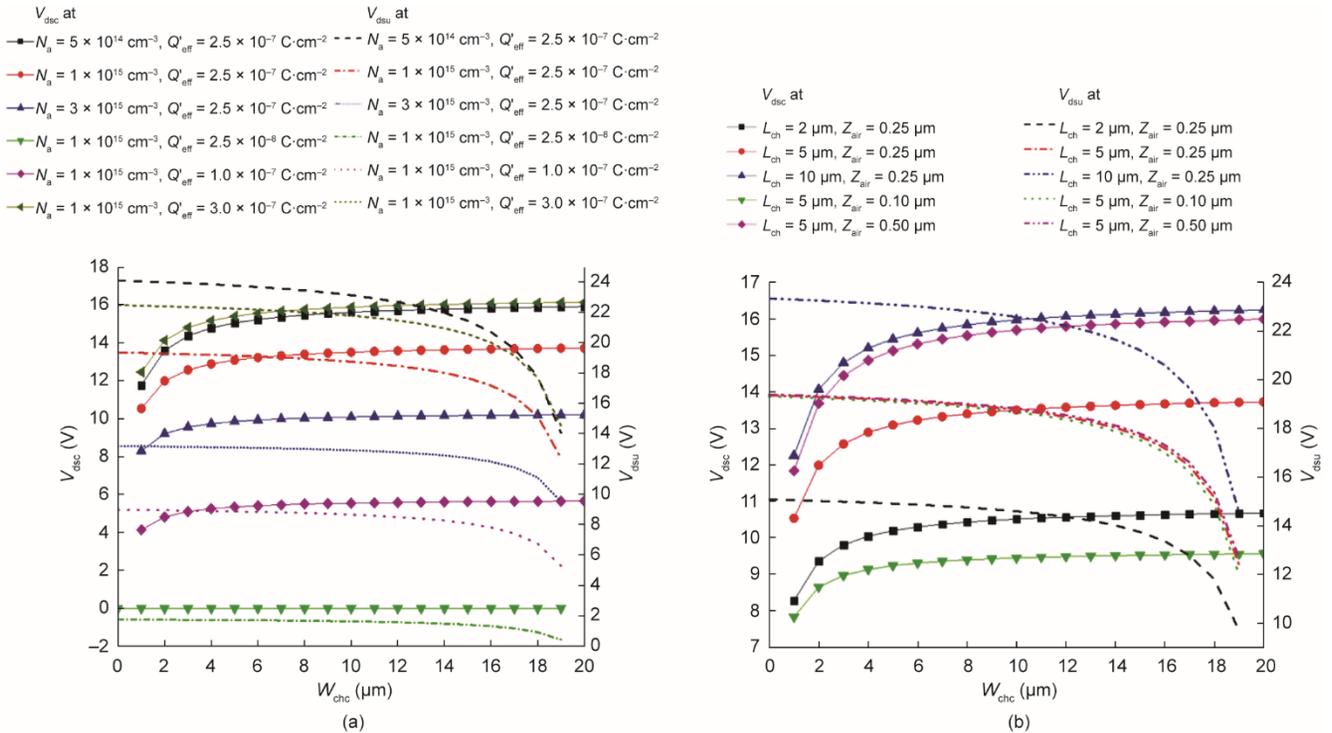


图5. 饱和电压 V_{dsatc} 和 V_{dsatu} 与不同宽度位置的电参数和几何参数之间的关系。(a) 衬底 N_{a} 的有效沟道电荷密度 Q'_{eff} 和掺杂浓度；(b) 通道长度 L_{ch} 和气隙 Z_{air} 。(a) 中的 L_{ch} 为 $5 \mu\text{m}$ ， Z_{air} 为 $0.25 \mu\text{m}$ ，(b) 中的 Q'_{eff} 为 $2.5 \times 10^{-8} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2}$ ， N_{a} 为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

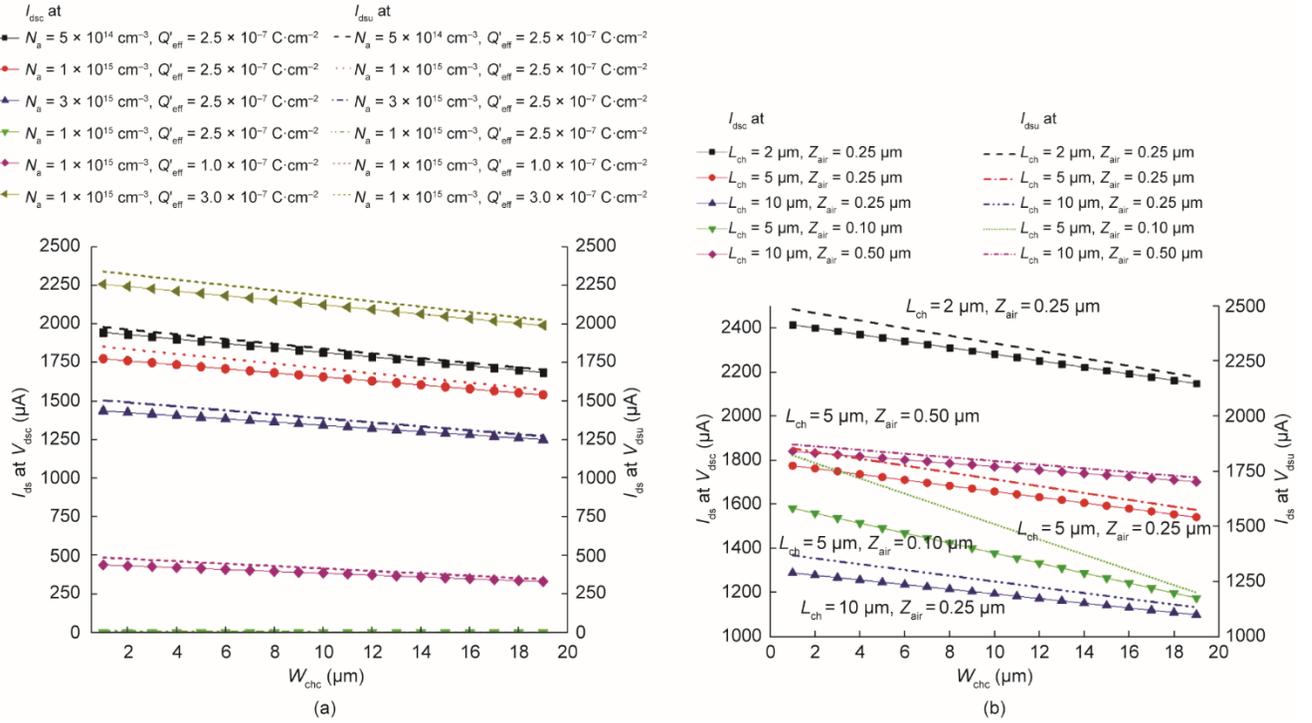


图6. 饱和沟道电流 I_{disc} 和 I_{dsu} 与不同宽度位置的电参数和几何参数之间的关系。(a) 衬底 N_a 中有效沟道电荷密度 Q_{eff} 和离子化受体的净浓度；(b) 通道长度 L_{ch} 和气隙 Z_{air} 。(a) 中的 L_{ch} 为 $5 \mu\text{m}$, Z_{air} 为 $0.25 \mu\text{m}$, (b) 中的 Q_{eff} 为 $2.5 \times 10^{-8} \text{ C}\cdot\text{cm}^{-2}$, N_a 为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

3. 传感器结构设计和输出方案

本研究中提出的传感器利用环氧型聚合物光致抗蚀剂SU-8作为结构材料，这是制造LMGFET器件的理想材料，原因如下：首先，SU-8具有相对较低的弹性模量（4~5 GPa）、较高的机械强度以及紫外线（UV）暴露后稳定的化学稳定性[33–34]。其次，SU-8是一种负性厚膜光致抗蚀剂，可用于制造具有高纵横比的结构[35]。这些特性使得SU-8适合用作横向可动结构的材料。再次，利用旋涂机或喷涂机能够很容易将SU-8均匀地沉积在基材上，即使对于不平整的表面也是如此[36]。最后，SU-8可以很容易地通过紫外线曝光形成图案，并在丙二醇甲醚乙酸酯溶液中显影，这比蚀刻金属和硅等材料更具易操作性。本研究提出了一种基于SU-8的具有可动夹层结构的LMGFET力传感器，如下所述。

3.1. 可动结构设计

如图7(a)所示，可移动结构和衬底是该装置中的两个主要部件。可动结构包含探针和由直梁支撑的中心质量块。图7(b)显示了夹层栅极结构，其中Au-栅极电极层被两个光刻胶SU-8层完全覆盖。金是大多数实验室中常见的金属材料，已被证明对SU-8具有良好的黏附性[37]。SU-8结构层的厚度应较小，以便减小有效栅极间隙

和有效电容。两个阵列的Au-栅极阵列S1和S2，设置在中心质量块中，具有偏移距离 D_{off} 。在每组栅极中，两个栅极阵列相对于侧线Line1和Line2对称。两个阵列中的栅极具有相同的宽度 W_g 和长度 L_g ，相应的漏极、源极和栅极绝缘层位于栅极阵列下方。沟道区的宽度为 W_{ch} 和长度为 L_{ch} ，并且位于漏极和源极之间。在初始状态，栅极覆盖沟道宽度的一半，如图7(c)所示。

当在探针上施加横向力 F_y 时，梁会发生弯曲变形。中心质量块中的栅极阵列横向运动，并改变沟道区域的宽度，表示如下：

$$W_{F_y} = \frac{F_y L_b^3}{48EI_y} \quad (14)$$

式中， W_{F_y} 为 F_y 沿Y轴的结构变形； E 是结构材料的杨氏模量； $I_y = \frac{W_b T_b^3}{12}$ 为梁垂直截面的惯性矩； L_b 、 W_b 和 T_b 分别是支撑梁的长度、宽度和厚度。当施加一个垂直力 F_z 时，结构受到一个施加在质量中心的垂直力 F'_z 和一个力矩 $M_x = F_z(L_p + \frac{1}{2}L_m)$ （式中， L_p 是探头长度， L_m 是中心质量长度），包括质量块的垂直平移距离 Z_F 和绕X轴的旋转 θ_x ，如图8所示，表达式为：

$$Z_F = \frac{F_z L_b^3}{48EI_z} \quad (15)$$

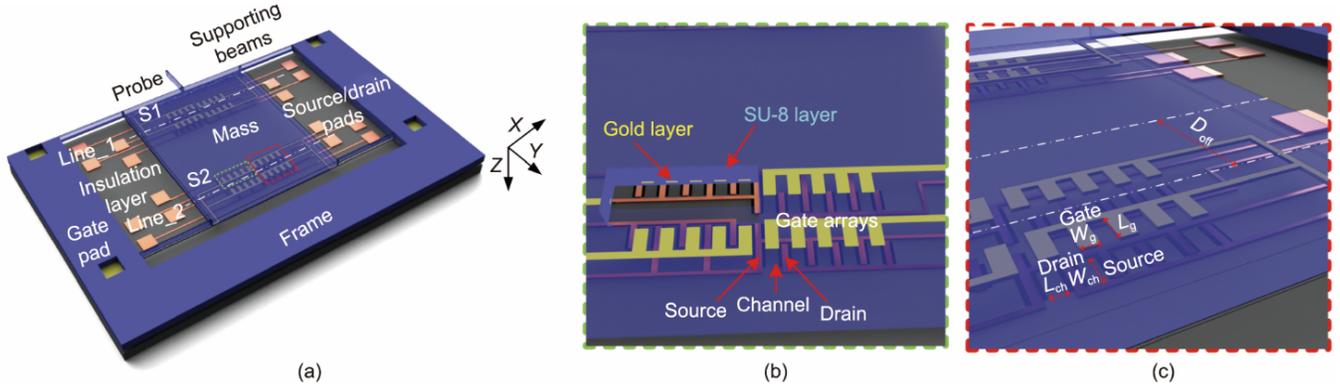


图7. 本研究提出的LMGFET力传感器的原理图。(a) 可动结构设计；(b) 包含Au-栅极阵列层和两个光阻SU-8层的可动夹层结构；(c) 可动栅极阵列的布置和尺寸。所有3D模型中的坐标轴方向基于如下原则：Z轴的正方向是从上部可动结构到衬底，Y轴的正方向是从传感器探针到可动结构的末端，X轴的正方向是从传感器的左侧到右侧。S1、S2：两组Au-栅极阵列；Line_1、Line_2：侧线； W_g ：浇口宽度； L_g ：栅极长度； D_{off} ：偏移距离。

$$\theta_x = \frac{M_x L_b^3}{24EI_z(L_m - L_b)} \quad (16)$$

式中， $I_z = \frac{T_b W_b^3}{12}$ 是梁水平截面的惯性矩。在此基础上，距离为 D_{off} 的线存在于远离质心线处，垂直位移为零。表示如下：

$$D_{off} = \frac{L_m - L_b}{2L_p + L_m} \quad (17)$$

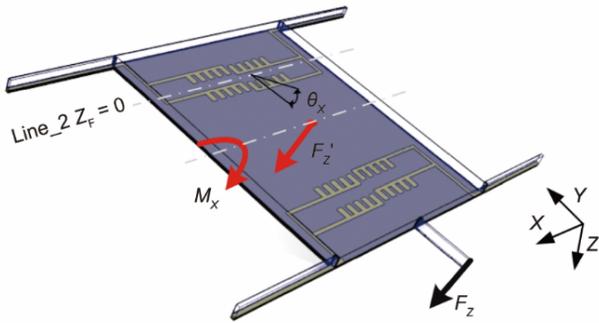


图8. 可动结构在垂直力作用下的平移和旋转运动。 Z_f 、 θ_x ：分别为质量块绕X轴的垂直平移和旋转。

受到 F_z 力的栅极阵列的垂直位移表示如下：

$$Z_{F_z} = \frac{F_z L_b^3}{48EI_z} \pm D \frac{M_x L_b^3}{24EI_z(L_m - L_b)} \quad (18)$$

式中， $\pm D$ 是栅极阵列与质量块中心线的偏移距离， D 之前的负号表示S2的上部栅极阵列，正号指的是S2的下部栅极阵列。横向力和垂直力之间的变形比可写为：

$$r = \frac{1}{\frac{T_b^2}{W_b^2} (1 \pm D \frac{2L_p + L_m}{L_m - L_b})} \quad (19)$$

当厚度 T_b 大于宽度 W_b 时，可以获得较高的 r 值。Line2 应设置在 D_{off} 的位置上，栅极阵列S2应靠近Line2，以减少不必要的垂直运动。直梁不能受压或拉伸，因此，

该结构很少沿着X轴力 F_x 变形，即所提出的可动结构仅对沿Y轴的力敏感，并且将不受来自其他方向的干扰。

利用 ANSYS 15.0 对该结构进行模拟，研究其变形行为。表2给出了设计结构的材料和几何参数。仅用SU-8结构层模拟几何结构，并且忽略薄的Au-栅极极层以降低模拟复杂性。在模拟中，SU-8光刻胶的杨氏模量和泊松比分别为4.4 GPa [38]和0.22 [39]。梁的末端是固定的，沿着Y/Z轴的1 nN力施加到探针尖端的侧壁上。图9显示了在这种力的作用下S2栅极阵列的变形。当施加1 nN的侧向力时，对应的变形量为1.961 nm，与理论值1.964 nm一致。与Y轴力下的横向移动相比，Z轴力引起的横向移动可以忽略，因为其值约为0.00087 nm。零垂直变形位置 D_{off} 距离质心大约673 μm 。栅极阵列S1的垂直变形约为0.001 nm。变形率 r 为1964，表明该结构具有低跨轴耦合效应。

表2 所设计结构的材料和几何参数

Parameters	Value
Young's modulus of SU-8 photoresist	4.4 GPa
Poisson's ratio of SU-8 photoresist	0.22
Thickness of lower SU-8 structure layer	0.5 μm
Thickness of upper SU-8 structure layer	49.5 μm
Air gap Z_{air}	0.1 μm
Length of center mass L_m	2000 μm
Width of center mass W_m	1700 μm
Length of gate L_g	20 μm

3.2. 传感器输出方案

尽管所提出的结构的跨轴变形很小，但是垂直变形仍会给沟道电流带来干扰。除了解耦可动结构设计之外，还需要设计传感布置方案消除跨轴输出耦合。工程上常采用差分传感布置补偿来自非运行方向的负载和外部干扰，如

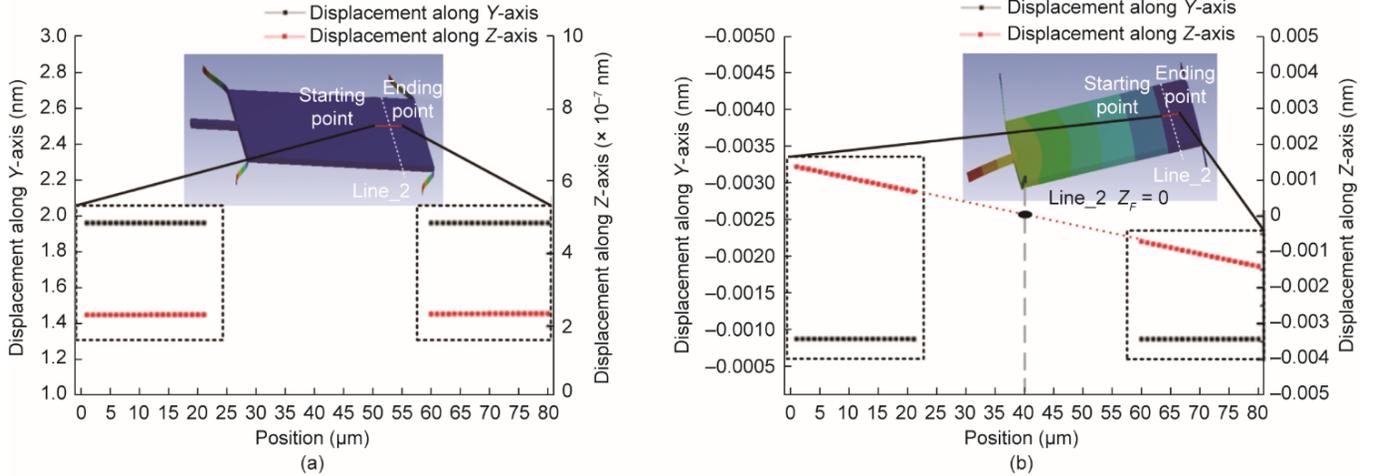


图9. 在1 nN力作用下可动结构的变形。(a) 沿Y轴力的作用下, 栅极阵列S1的变形; (b) 沿Z轴力的作用下, 栅极阵列S1的变形。

温度和湿度。然而, 这种方法不适用于LMGFET传感, 因为栅极阵列在不同的位置上表现出不同的垂直运动幅值。本研究因此提出了一种新的双差分传感布置: 位于下方的沟道区不与栅极阵列对准, 而是关于Line1和Line2的中心反对称分布, 如图10所示。每组栅极阵列有四个场效应管: S_{1LU} 、 S_{1LD} 、 S_{1RU} 和 S_{1RD} 用于S1, 而 S_{2LU} 、 S_{2LD} 、 S_{2RU} 和 S_{2RD} 用于S2。S1和S2的互连布置分别如图11(a)和(b)所示。S2用于横向力传感, S1用于垂直力传感。本文主要研究横向力的传感, 因此, 下文主要对S2进行描述。 I_{dsL} 是两个左侧场效应管 S_{2LU} 和 S_{2LD} 的电流之和, I_{dsR} 是两个右场效应管 S_{2RU} 和 S_{2RD} 的电流之和。这些表达式可以写成如下形式:

$$I_{dsL} = I_{ds1}(W_{chc} + W_{F_y} Z_{air} + Z_{F_z}) + I_{ds2}(W_{chc} + W_{F_y} Z_{air} - Z_{F_z}) \quad (20)$$

$$I_{dsR} = I_{ds3}(W_{chc} + W_{F_y} Z_{air} + Z_{F_z}) + I_{ds4}(W_{chc} + W_{F_y} Z_{air} - Z_{F_z}) \quad (21)$$

式中, I_{ds1} 、 I_{ds2} 、 I_{ds3} 和 I_{ds4} 分别是场效应管 S_{2LU} 、 S_{2LD} 、 S_{2RU} 和 S_{2RD} 的电流。

大多数垂直干扰在方程(20)和(21)中相互抵消。最终传感器的输出可以测量两个电路分支之间的电位差, $V_{out} = R \times (I_{dsL} - I_{dsR})$ (其中, R 是输出电路中连接的电阻)。所提出的双差分配置的传感性能如图12所示, 并与沟道区与栅极阵列对准的普通差分方法进行了比较, 如图12(a)和(b)所示, 利用两种方法的相对误差来测量初始输出和垂直位移下的输出之间的差。

在传感器探头中加载1 nN的力, 夹层结构横向移动1.961 nm, 但垂直移动0.001 nm。因此, 垂直位移设置为0.001~3.000 nm, 以便研究在1~3 μ N范围内的垂直力下的

传感性能。对于小于0.03 nm的小垂直位移, 两种方法的相对误差可以忽略不计。直到 W_{chc} 达到7.5 μ m, 由于 C'_{effu} 的快速增加, 差分沟道电流的相对误差增加。当垂直位移为3 nm时, 正常差分方法下的 V_{dsc} 的相对误差达到4.53%, 而所提出的方法的相对误差小于0.01%。当 W_{chc} 达到10 μ m时, 由于 C'_{effu} 消失, 仅由覆盖区域引起的相对误差下降。 V_{dsu} 比 V_{dsc} 具有更高的变化率, 因为 C'_{effu} 比 C'_{effc} 更易受气隙尺寸的影响; 如图12(b)所示, 与 V_{dsc} 处的相对误差相比, V_{dsu} 处的相对误差有所增加。对于0.03 nm和3.00 nm的垂直位移, V_{dsu} 处的正常差分方法的相对误差分别增加到2.24%和4.76%, 但是所提出的双差分输出方案的最大相对误差仍然低至0.43%。考虑到可动结构的变形行为, 栅极阵列S1的3 nm垂直变形需要3 μ N的垂直力。栅极阵列不能在3 nm变形, 因为在低于该值的垂直力下, 质量体端面可能接触衬底。因此, 在所提出的双差分传感配置中, 跨轴耦合效应被近似消除。

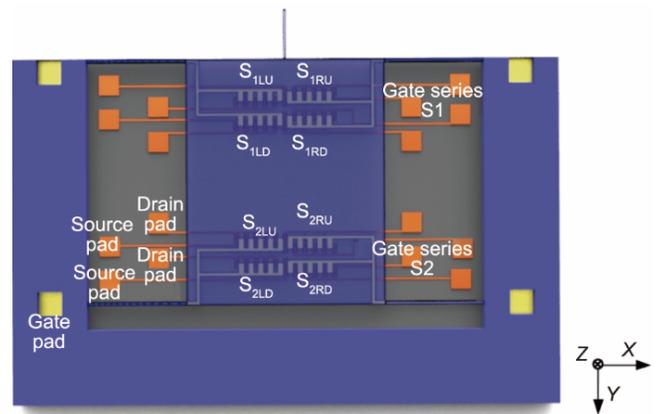


图10. 本研究提出的双差分传感布置。 S_{1LU} 、 S_{1LD} 、 S_{1RU} 和 S_{1RD} 是S1的场效应管; S_{2LU} 、 S_{2LD} 、 S_{2RU} 和 S_{2RD} 是S2的场效应管。

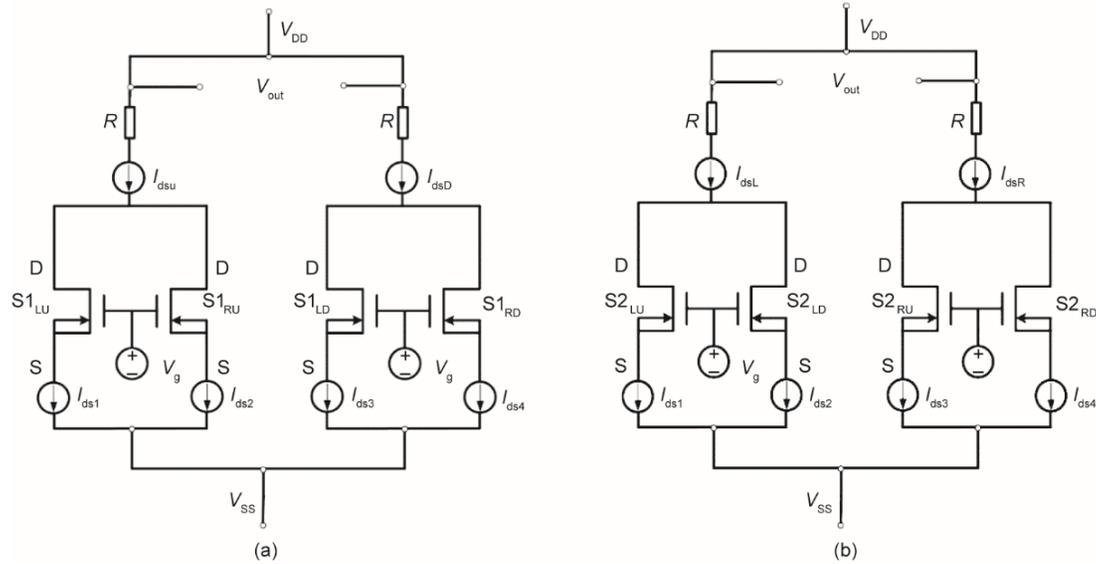


图 11. 本研究提出的双差分输出方案示意图。(a) S1 栅极阵列的互连；(b) S2 栅极阵列的互连。D: 公共漏电极；S: 公共源电极； V_{DD} : 施加在公共漏电极上的电压； V_{SS} : 施加在公共源电极上的电压； V_g : 施加在公共栅电极上的电压；R: 电阻； I_{dsu} : 场效应管 S2_{LU} 和 S2_{RU} 的电流之和； I_{dsD} : 场效应管 S2_{LD} 和 S2_{RD} 的电流之和； I_{dsL} : 场效应管 S2_{LU} 和 S2_{LD} 的电流之和； I_{dsR} : 场效应管 S2_{RU}、S2_{RD} 的电流之和； I_{ds1} ~ I_{ds4} : 分别为场效应管 S2_{LU}、S2_{LD}、S2_{RU}、S2_{RD} 的电流。

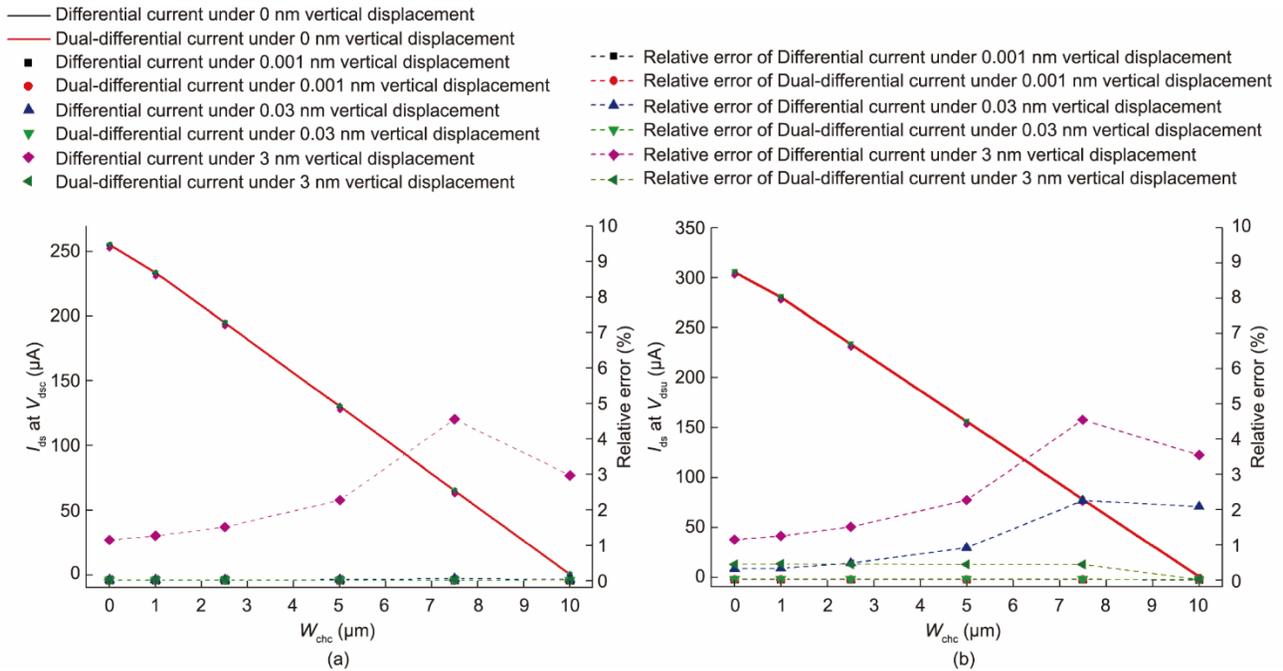


图 12. 本研究提出的双差分配置在不同饱和电压下的传感性能。(a) 饱和漏极电压 V_{dsc} 下的沟道电流；(b) 饱和漏极电压 V_{dsu} 下的沟道电流。直线表示 0 nm 垂直位移下的输出电流，散点表示不同垂直位移下的输出，带散点的虚线表示两种传感配置的相对输出误差。

4. 模型验证和传感器性能

4.1. 制造过程

如图 13 所示，为所提出的 LMGFET 器件提出了一种简单且可行的制造方法。首次沉积光致刻蚀剂层，形成漏电极和源电极；然后在衬底上进行离子注入形成掺磷杂区。通过另一个光致抗蚀剂层，形成沟道区域，然后用不

同的注入剂量和能量进行磷离子掺杂，注入的离子通过快速退火被激活。沉积由氮化硅制成的栅极绝缘层，然后被图案化以暴露用于源极/漏极互连的接触孔。随后，沉积并图案化二氧化硅牺牲层，以暴露结构锚和接触孔。一个薄的 SU-8 结构层通过旋涂、曝光和显影，作为夹层结构的下层。然后沉积 Au 层并形成图案，作为栅极阵列及漏极和源极的焊盘。衬底金属焊盘通过沉积在芯片底侧的另

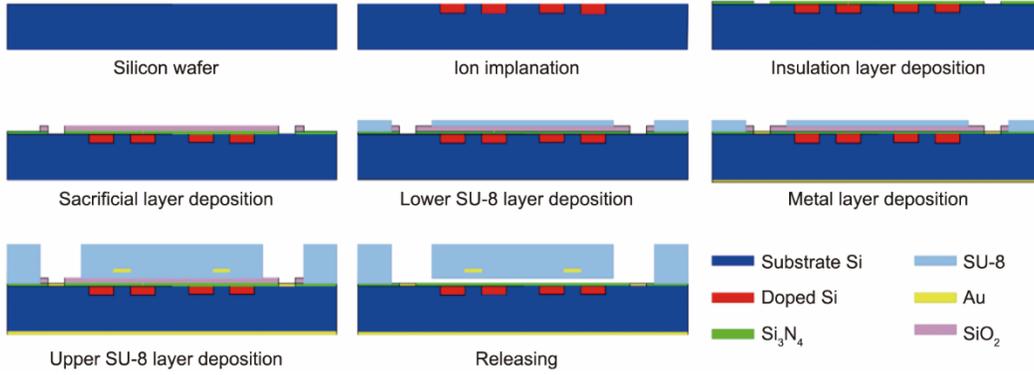


图13. 本研究提出的制造过程流程图。

一个Au层形成。另一个厚的SU-8层通过旋涂以密封栅极阵列，并形成上面夹层结构层的图案。用深度反应离子对衬底进行刻蚀，以形成探针区域。最后，进行牺牲二氧化硅层的各向同性蚀刻形成可动夹层结构。

使用有限元软件Sentaurus 13.0模拟制造过程；采用的参数在表3中示出，模拟的LMGFET单元如图14(a)所示。该器件被建模为单个场效应管以简化计算复杂度，并且通过使用以下表达式，气隙和下方SU-8结构层被替换为有效的二氧化硅层 T'_{SiO_2} ：

$$T'_{SiO_2} = \frac{\epsilon_{SiO_2} Z_{air}}{\epsilon_0} + \frac{\epsilon_{SiO_2} T_{low_SU-8}}{\epsilon_{SU-8}} \quad (22)$$

式中， T_{low_SU-8} 和 ϵ_{SU-8} 是下层SU-8的厚度和介电常数； ϵ_{SiO_2} 是二氧化硅的介电常数。沟道区域的峰值注入离子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ，这在浴槽制造工艺中是可以实现的[25]。通过设置从 $0.150 \mu\text{m}$ 到 $0.300 \mu\text{m}$ 的不同离子注入深度，研究了沟道杂质分布如何影响沟道电流的特性。图14(b)显示出了在 $0.275 \mu\text{m}$ 的注入深度下激活的注入磷分布的截面图。插图显示出了图14(a)中器件的沟道区中活性磷的提取浓度分布。建立了一个矩形近似模型来描述浓度

分布，如图14(b)中的虚线所示。有效沟道电荷密度 Q_{eff} 为峰值磷密度与有效注入深度的乘积。表4列出了不同注入深度下的电参数。

表3 制造模拟中的参数

Parameters	Value
Acceptor concentration of silicon substrate N_a	$1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Thickness of insulator silicon nitride T_{insu}	100 nm
Thickness of gold gate T_g	$0.2 \mu\text{m}$
Thickness of effective silicon dioxide T'_{insu}	$1 \mu\text{m}$
Length of channel L_{ch}	$5 \mu\text{m}$
Width of channel W_{ch}	$20 \mu\text{m}$
Implanted depth of source/drain X_j	$0.5 \mu\text{m}$
Implanted depth of channel	$0.15-0.30 \mu\text{m}$

4.2. 电气模型验证

如图14(a)所示，在栅极、源极、漏极和衬底区域中设置四个不同的电极，并建模为红色网格，以研究电输出行行为。因为制造的晶体管是耗尽型器件，所以向栅极、源极和衬底电极施加0V的电压。图15(a)显示出了当

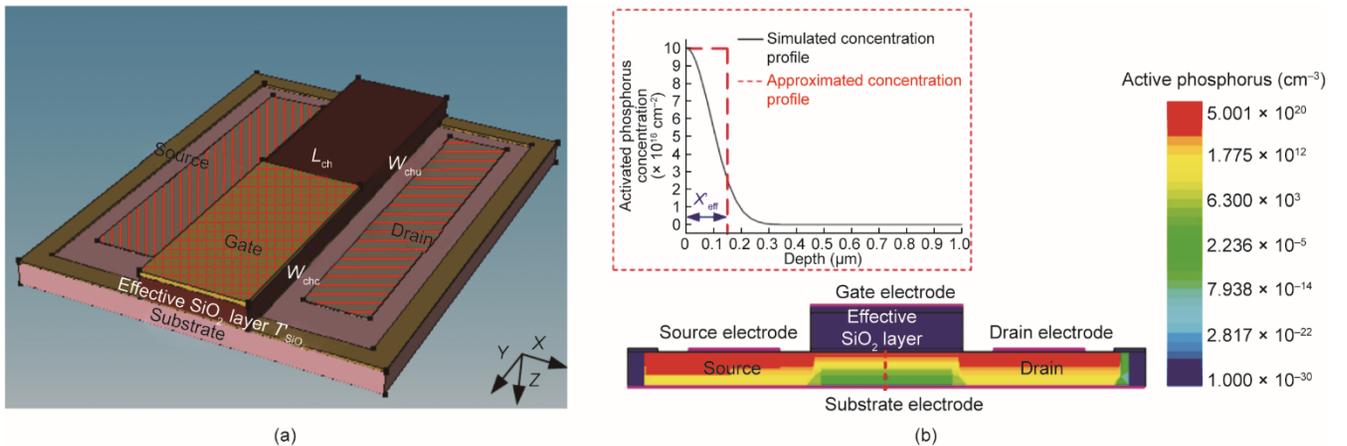


图14. 本研究提出的制造过程的模拟。(a) 模拟中的3D LMGFET模型。(b) 模拟装置中的注入浓度；(左上)通道区域沿虚线提取的注入离子轮廓。 X'_{eff} : 有效注入深度。

表4 不同注入深度下的电参数

Implantation depth (μm)	X'_{eff} (μm)	Q'_{eff} ($\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$)	V_{dsatc} (V)	V_{dsatu} (V)
0.150	0.0791	1.266×10^{-7}	7.127	10.658
0.200	0.1073	1.717×10^{-7}	9.585	13.767
0.250	0.1367	2.187×10^{-7}	11.978	16.812
0.275	0.1509	2.414×10^{-7}	13.094	18.234
0.300	0.1661	2.658×10^{-7}	14.270	19.737

施加的漏极电压 V_{ds} 从0增加到20.5 V时, 在不同的沟道注入分布下的沟道输出电流 I_{ds} 特性。当注入深度为0.15 μm 时, 理论值(虚线)在整个电压范围内与模拟值(实线)一致。理论值和模拟值之间的差异随着注入深度的增加而增加。对于低漏极电压, 理论计算的电流小于模拟的电流, 这表明所提出的模型在非饱和区域是保守的。这一特性与注入近似的误差有关。然而, 最大可控测量灵敏度的饱和区是本研究的重点, 其中理论计算结果过和模拟结果在所有注入深度上都非常一致。将计算的沟道电流与饱和电压 V_{dsatc} 和 V_{dsatu} 下的模拟电流进行比较, 相对误差都小于2%, 如图15(b)所示。

使用参考文献[24]中的实验数据对理论模型进行验证, 并与文献采用的模型进行比较, 在文献采用的模型中, 假设未覆盖沟道区域 C'_{effc} 中的有效栅极电容恒定, 并利用调节参数来估计调制效应。表5列出了参考文献[24]的实验参数。在本研究中, 未覆盖沟道区域 C'_{effc} 的有效栅极电容为常数, 覆盖宽度 W_{chc} 为18 μm 。实际上, 如第2节所述, C'_{effc} 应随着 W_{chc} 的增加而增加。图16为通过本研究中的模型和参考文献[24]中的模型计算的沟道电流。在 $W_{\text{chc}} = 18 \mu\text{m}$ 时, 这两个模型具有相似的精度。所提出的模型对0 μm 和60 μm 的覆盖沟道宽度下的输出进行了精确估计。所提出模型的最大相对误差在0 μm 的覆盖沟

道宽度下为1.51%, 在60 μm 的覆盖沟道宽度下为2.63%。而使用之前模型计算的最大相对误差分别为6.64%和5.84%。因此, 对于LMGFET性能分析, 所提出的模型比以前的模型更精确。

表5 制造LMGFET器件的实验参数[24]

Parameters	Value
Length of channel L_{ch}	30 μm
Total channel width $W_{\text{ch}} = W_{\text{chc}} + W_{\text{chu}}$	60 μm
Studied covered channel width W_{chc}	0, 18, 60 μm
Gate oxide thickness T_{insu}	27 nm
Acceptors concentration of silicon substrate N_{a}	$1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$
Effective channel charge density Q'_{eff}	$2.37 \times 10^{-7} \text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$
Work function difference φ_{MS}	-0.30 V
Effective gate oxide capacitance in covered area C'_{effc}	$1.55 \times 10^{-8} \text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$

4.3. 传感器性能的讨论

为了评估传感器的性能, 在不同的栅极位置测得了传感器的输出沟道电流。图17为在注入深度等于0.275 μm 的注入深度的模拟和计算的饱和沟道电流 I_{dsatc} 和 I_{dsatu} 。饱和电压 V_{dsatc} 和 V_{dsatu} 分别为10.2 V和12.1 V, 这是传感器运行期间的最低值。在 W_{chc} 为0 μm 时, 理论饱和电流和模拟饱和电流之间的相对误差为3.88%和5.64%。在小的覆盖沟道宽度条件下的失配主要是由电容表达式[等式(2)]的估计误差引起的。对于 $W_{\text{chc}} > 1 \mu\text{m}$, 相对误差小于3.80%, 该器件对于饱和电压 V_{dsatc} 和 V_{dsatu} 的灵敏度分别为8.39 $\mu\text{A}\cdot\text{nN}^{-1}$ 和9.12 $\mu\text{A}\cdot\text{nN}^{-1}$ 。由于SU-8可动结构的刚度较低, 本研究提出的LMGFET传感器的力灵敏度为4.65 $\mu\text{A}\cdot\text{nN}^{-1}$, 低于本研究团队之前研究的VMGFET器件, 其测力灵敏度为12.53 $\mu\text{A}\cdot\text{nN}^{-1}$ [25]。然而, 它高于文献[22-23]提出的VMGFET器件, 测力灵敏分别为

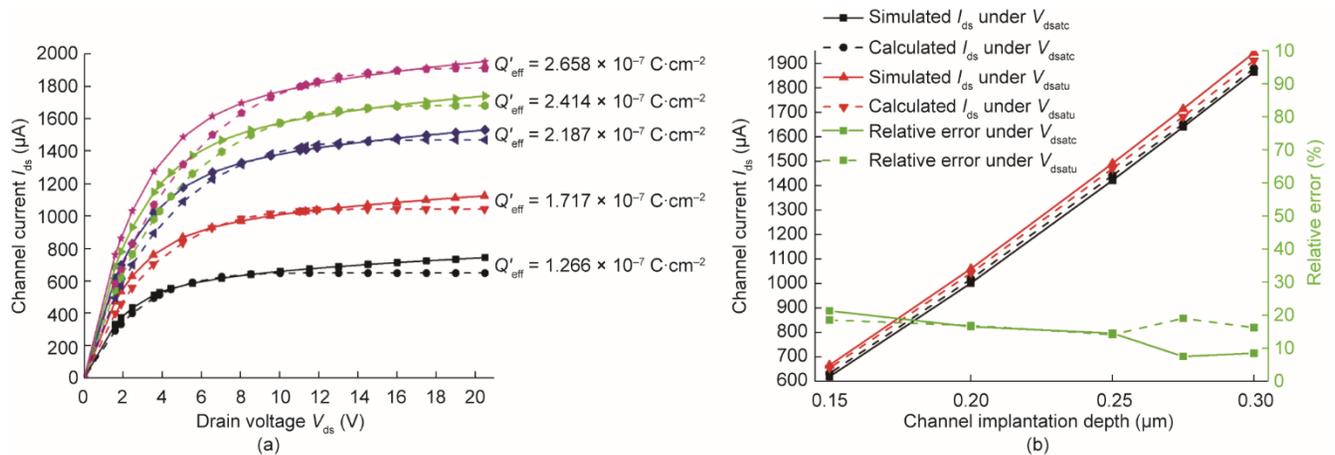


图15. 不同注入深度下的沟道输出电流 I_{ds} 特性。(a) 沟道电流 I_{ds} 和施加的漏极电压 V_{ds} 之间的关系; (b) 饱和沟道电流 I_{ds} 以及计算结果和模拟结果之间的相对误差。实线表示模拟的通道电流, 虚线表示理论计算的通道电流。

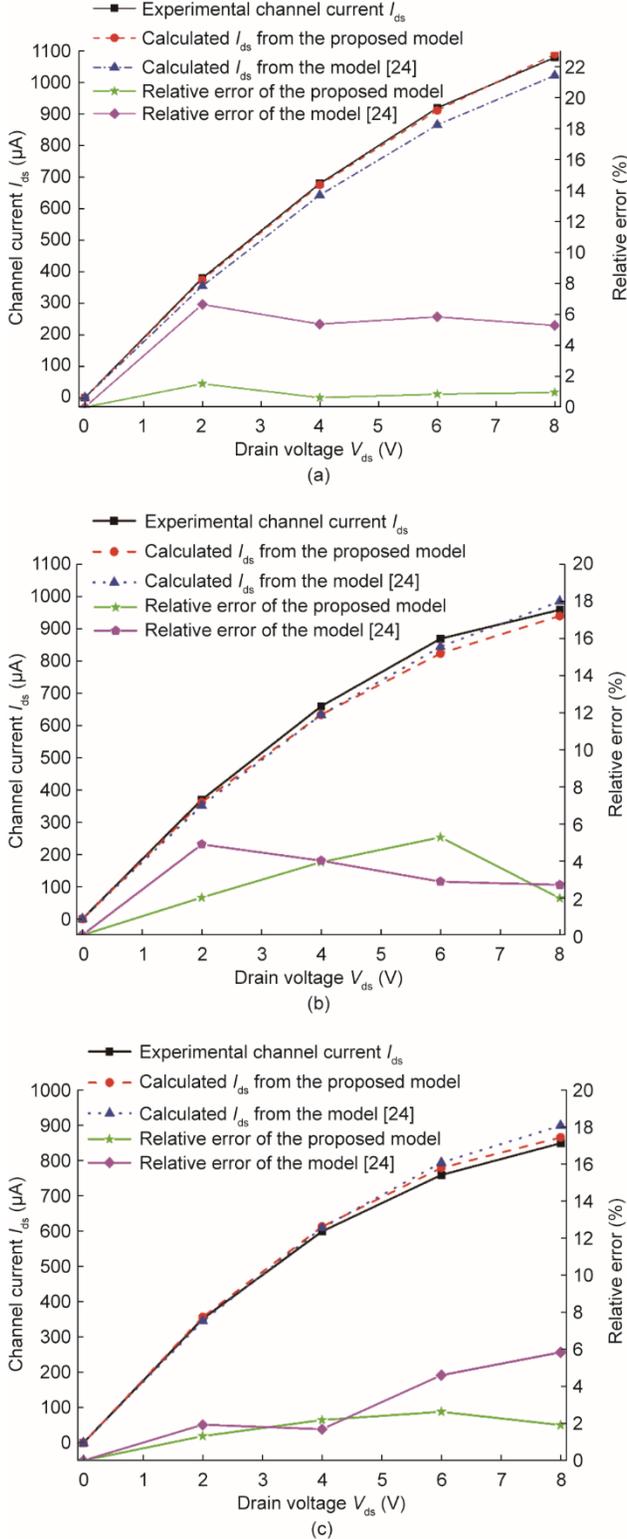


图16. 沟道电流 I_{ds} 的理论计算和实验测量。(a) 栅极完全不覆盖沟道区域, $W_{chc} = 0 \mu\text{m}$; (b) 栅极部分覆盖沟道区域, $W_{chc} = 18 \mu\text{m}$; (c) 栅极完全覆盖渠道区域, $W_{chc} = 60 \mu\text{m}$ 。

$3.24 \mu\text{A} \cdot \text{nN}^{-1}$ 和 $0.05 \mu\text{A} \cdot \text{nN}^{-1}$, 也高于文献[24]中的 LMGFET 器件, 其灵敏度为 $0.01 \mu\text{A} \cdot \text{nN}^{-1}$ 。由于沟道被完全覆盖或完全暴露时, 沟道区域中的场效应管消失, 其非线性

会产生轻微的波动。对于 $2.5 \sim 17.5 \mu\text{m}$ 和 $1 \sim 19 \mu\text{m}$ 范围内的 W_{chc} , 非线性分别接近 0.19% 和 0.78%, 小于现有 MGFET 器件的非线性。所提出的传感器的测量范围为 $\pm 5.10 \mu\text{N}$, 小于参考文献[24]中的 LMGFET 器件, 但是大于文献[22–23,25]提出的 VMGFET 器件。

为了评估整体传感性能, 使用性能因子对其进行量化, 性能因子的计算方法是灵敏度、线性度和测量范围的乘积, 如表6所示。在现有的 MGFET 器件中, 所提出的传感器的最大品质因数为 47.07 mA, 这表明所提出的传感器很好地平衡了高传感精度和大测量范围。所有这些特性使所提出的传感器成为测量低于纳牛顿水平的超低力的合适选择, 特别是对于需要大测量范围的生物医学应用, 如细胞变形挤压和细胞膜穿透。

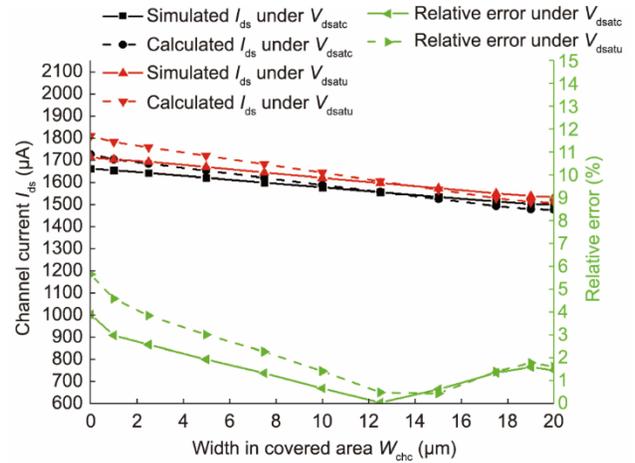


图17. 不同沟道宽度 W_{chc} 下沟道电流 I_{ds} 的理论计算和实验测量。

5. 结论

本文提出了一种具有自解耦三明治结构的横向运动栅场效应晶体管 MEMS 微力传感器, 并全面介绍了其设计优化过程: 通过将小型 LMGFET 单元的电学行为建模为两个独立的部分, 提出了适用于小尺寸 LMGFET 单元的电学性能评估及优化方法, 并用模拟和实验对该模型进行了测试验证。本文提出的包含 Au-栅极阵列层和两层覆盖的 SU-8 光刻胶层的新型三明治结构, 能够极大地抑制交叉轴负载下的输出电流。此外, 本文还提出了一种新颖的双差分传感布置及检测方案, 能够实现多个栅极阵列解耦输出。为了优化传感器的性能, 本文还对 LMGFET 器件的电学和结构参数进行了全面的分析, 开发了一种可行的制造工艺并进行了模拟。该传感器具有相当高的灵敏度、线性度和大的测量范围, 能够成为生物医学微操作任务的通用传感工具。

表6 与现有MGFET器件的性能比较

	Sensitivity ($\mu\text{A}\cdot\text{nN}^{-1}$) ^a	Nonlinearity (%)	Deformation range (μm)	Measurement range (μN)	Merit factor (mA)
This work	4.65	0.78	± 10.0	± 5.10	47.07
LMGFET [24]	0.01	7.28	± 30.0	± 14.50	0.32
VMGFET [25]	12.53	1.35	0.3	0.42	5.24
VMGFET [22]	3.24	11.12	0.2	0.12	0.35
VMGFET [23]	0.05	17.75	1.0	Na	Na

Na: not available.

^a Sensitivity is unified into the same unit.

致谢

本研究得到国家自然科学基金(52105589和U1909221)、中国博士后科学基金(2021M692590)、北京智能机器人与系统高级创新中心(2019IRS08)、中央高校基本科研业务费专项资金(xzy012021009)、机器人技术与系统国家重点实验室(HIT)(SKLRS2021KF17)的部分资助。

Compliance with ethics guidelines

Wendi Gao, Zhixia Qiao, Xiangguang Han, Xiaozhang Wang, Adnan Shakoor, Cunlang Liu, Dejiang Lu, Ping Yang, Libo Zhao, Yonglu Wang, Jiahong Wang, Zhuangde Jiang, and Dong Sun declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Dostanic M, Windt LM, Stein JM, van Meer BJ, Bellin M, Orlova V, et al. A miniaturized EHT platform for accurate measurements of tissue contractile properties. *J Microelectromech Syst* 2020;29(5):881–7.
- [2] Nakahara K, Sakuma S, Kawahara M, Takahashi M, Arai F. Time-lapse mechanical characterization of zona pellucida using a cell carrier chip. *J Microelectromech Syst* 2018;27(3):464–71.
- [3] Corbin EA, Adeniba OO, Ewoldt RH, Bashir R. Dynamic mechanical measurement of the viscoelasticity of single adherent cells. *Appl Phys Lett* 2016;108(9):093701.
- [4] Pu H, Chen H, Sun Yu, Liu Na, Yu J, Yang Y, et al. Micropipette aspiration of single cells for both mechanical and electrical characterization. *IEEE Trans Biomed Eng* 2019;66(11):3185–91.
- [5] Tsukagoshi T, Nguyen TV, Shoji KH, Takahashi H, Matsumoto K, Shimoyama I. Cellular dynamics of bovine aortic smooth muscle cells measured using MEMS force sensors. *J Phys D Appl Phys* 2018;51(14):145401.
- [6] Pan P, Qu J, Zhang W, Dong X, Wei W, Ru C, et al. Robotic stimulation of freely moving *Drosophila* larvae using a 3D-printed micro force sensor. *IEEE Sens J* 2019;19(8):3165–73.
- [7] Zhang W, Pan P, Wang X, Chen Y, Rao Y, Liu X. Force-controlled mechanical stimulation and single-neuron fluorescence imaging of *Drosophila* larvae. *IEEE Robot Autom Lett* 2021;6(2):3736–43.
- [8] Wei Y, Xu Q. Design and testing of a new force-sensing cell microinjector based on small-stiffness compliant mechanism. *IEEE/ASME Trans Mechatron* 2021;26(2):818–29.
- [9] Wei Y, Xu Q. A survey of force-assisted robotic cell microinjection technologies. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 2019;16(2):931–45.
- [10] Cailliez J, Boudaoud M, Mohand-Ousaid A, Weill-Duflos A, Haliyo S, Régnier S. Modeling and experimental characterization of an active MEMS based force sensor. *J Micro-Bio Robot* 2019;15(1):53–64.
- [11] Qu J, Zhang W, Jung A, Silva-Da Cruz S, Liu X. Microscale compression and shear testing of soft materials using an MEMS microgripper with two-axis actuators and force sensors. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 2017;14(2):834–43.
- [12] Grech D, Tarazona A, De Leon MT, Kiang KS, Zekonyte J, Wood RJK, et al. A quasi-concertina force-displacement MEMS probe for measuring biomechanical properties. *Sens Actuators A Phys* 2018;275:67–74.
- [13] Stavrov VT, Shulev AA, Hardalov CM, Todorov VM, Roussev IR. All-silicon microforce sensor for bio applications. In: Proceedings of SPIE Microtechnologies; 2013 Apr 24–26; Grenoble, France. SPIE; 2013. p. 87630Y.
- [14] Xie Y, Sun D, Liu C, Tse HY, Cheng SH. A force control approach to a robot-assisted cell microinjection system. *Int J Robot Res* 2010;29(9):1222–32.
- [15] Xie Y, Zhou Y, Lin Y, Wang L, Xi W. Development of a microforce sensor and its array platform for robotic cell microinjection force measurement. *Sensors* 2016;16(4):483.
- [16] Gao W, Zhao L, Jiang Z, Xia Y, Guo X, Zhao Z, et al. A novel MEMS force sensor based on laterally movable gate array field effect transistor (LMGAFET). In: Proceedings of 2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS); 2017 Apr 9–12; Los Angeles, CA, USA. IEEE; 2017. p. 723–7.
- [17] Zang Y, Zhang F, Huang D, Gao X, Di C, Zhu D. Flexible suspended gate organic thin-film transistors for ultra-sensitive pressure detection. *Nat Commun* 2015;6:6269.
- [18] Ajmera PK, Song IH. Laterally movable gate FET (LMGFET) for on-chip integration of MEMS with electronics. In: Proceedings of SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials; 2001 Mar 4–8; Newport Beach, CA, USA. SPIE; 2001. p. 30–7.
- [19] Gao W, Shakoor A, Xie M, Chen S, Guan Z, Zhao L, et al. Precise automated intracellular delivery using a robotic cell microscope system with three-dimensional image reconstruction information. *IEEE/ASME Trans Mechatron* 2020;25(6):2870–81.
- [20] Gao W, Shakoor A, Zhao L, Jiang Z, Sun D. 3D image reconstruction of biological organelles with a robot-aided microscopy system for intracellular surgery. *IEEE Robot Autom Lett* 2019;4(2):231–8.
- [21] Kang HS, Lee KH, Yang DY, You BH, Song IH. Micro-accelerometer based on vertically movable gate field effect transistor. *Nano-Micro Lett* 2015; 7(3): 282–90.
- [22] Aoyagi S, Suzuki M, Kogure J, Kong T, Taguchi R, Takahashi T, et al. Accelerometer using MOSFET with movable gate electrode: electroplating thick nickel proof mass on flexible Parylene beam for enhancing sensitivity. In: Proceedings of 2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference; 2011 Jun 5–9; Beijing, China. IEEE; 2011. p. 2030–3.
- [23] Coe DJ, English JM, Lindquist RG, Kaiser TJ. Model of a MEMS sensor using a common gate MOSFET differential amplifier. *J Phys D Appl Phys* 2006; 39(20): 4353–8.
- [24] Song IH, Ajmera PK. A laterally movable gate field effect transistor. *J Microelectromech Syst* 2009;18(1):208–16.
- [25] Gao W, Jia C, Jiang Z, Zhou X, Zhao L, Sun D. The design and analysis of a novel micro force sensor based on depletion type movable gate field effect transistor. *J Microelectromech Syst* 2019;28(2):298–310.
- [26] Zhang A, Zhang L, Tang Z, Cheng X, Wang Y, Chen KJ, et al. Analytical modeling of capacitances for GaN HEMTs, including parasitic components. *IEEE Trans Electron Dev* 2014;61(3):755–61.
- [27] Bansal A, Paul BC, Roy K. An analytical fringe capacitance model for interconnects using conformal mapping. *IEEE Trans Comput Des Integr*

- Circuits Syst 2006;25(12):2765–74.
- [28] Bao M, Yang H, Yin H, Shen S. Effects of electrostatic forces generated by the driving signal on capacitive sensing devices. *Sens Actuators A Phys* 2000;84(3): 213–9.
- [29] El-Mansy YA. Analysis and characterization of the depletion-mode IGFET. *IEEE J Solid-State Circuits* 1980;15(3):331–40.
- [30] Sun SC, Plummer JD. Electron mobility in inversion and accumulation layers on thermally oxidized silicon surfaces. *IEEE J Solid-State Circuits* 1980;15(4): 562–73.
- [31] Arora N. MOSFET models for VLSI circuit simulation. Vienna: Springer Vienna; 1993.
- [32] Coen RW, Muller RS. Velocity of surface carriers in inversion layers on silicon. *Solid-State Electron* 1980;23(1):35–40.
- [33] Ge C, Cretu E. A sacrificial-layer-free fabrication technology for MEMS transducer on flexible substrate. *Sens Actuators A Phys* 2019;286: 202–10.
- [34] Nagai M, Tanizaki K, Shibata T. Batch assembly of SU-8 movable components in channel under mild conditions for dynamic microsystems: application to biohybrid systems. *J Microelectromech Syst* 2019;28(3):419–28.
- [35] Ge C, Cretu E. Design and fabrication of SU-8 CMUT arrays through grayscale lithography. *Sens Actuators A Phys* 2018;280:368–75.
- [36] Vinje J, Beckwith KS, Sikorski P. Electron beam lithography fabrication of SU-8 polymer structures for cell studies. *J Microelectromech Syst* 2020; 29(2): 160–9.
- [37] Dai W, Lian K, Wang W. A quantitative study on the adhesion property of cured SU-8 on various metallic surfaces. *Microsyst Technol* 2005;11 (7):526–34.
- [38] Dai W, Lian K, Wang W. Design and fabrication of a SU-8 based electrostatic microactuator. *Microsyst Technol* 2007;13(3–4):271–7.
- [39] Microchem. Datasheet of SU-8 2025–2075 [Internet]. Newton: Microchem; 2009 Sep 22 [cited 2021 Sep 3]. Available from: <https://kayakuam.com/products/su-8-2000/>. W. Gao, Z. Qiao, X. Han et al. *Engineering* 21 (2023) 61–74 74