ФУНКЦІОНАЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА. МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОННА ТЕХНІКА

УДК 621.3.049.774

ІОН-СЕЛЕКТИВНІ ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ РОЗРАХУНОК ПОРОГОВОЇ НАПРУГИ

Прищепа М.М. к.т.н. доц., Лозовий С.В. магістрант
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

Вступ

Для проектування електронних схем управління сенсорними елементами (вторинних вимірювальних перетворювачів), а також вдосконалення існуючих зразків чутливих елементів на базі іон-селективних польових транзисторів (ІСПТ), виготовлених за стандартною мікроелектронною технологією, необхідно визначати їх параметри, виходячи із особливостей топології та даних технологічного процесу. Одним із основних параметрів ІСПТ є порогова напруга. При функціонуванні сенсору у схемах вторинного перетворення важливим є розкид цього параметру для різних транзисторних кристалів. При значних відхиленнях порогової напруги, що можуть бути пов'язані з нерівномірним легуванням основи, деградацією заслінного діелектрику під впливом електроліту, струм в каналі кожного з транзисторів буде різний, тому спостерігатиметься значний розкид робочих точок на вольт-амперній характеристиці. Тому стаття присвячена розрахунку порогової напруги ІСПТ та порівняння із даними експериментальних вимірювань.

Одним із сучасних пріоритетних напрямів науки і техніки є створення мініатюрних і дешевих сенсорів для експрес-аналізу складу газових і рідких середовищ. Перспективним класом таких пристроїв є прилади на базі масивів чутливих хімічних сенсорів. За рахунок одночасного використання набору порівняно великого числа сенсорів такі прилади можуть бути застосовані для якісного і кількісного експрес-аналізу широкого спектра хімічних речовин, що визначає широку область застосування цього типу пристроїв — контроль складу рідких і газових середовищ у технологічних процесах на виробництві, контроль якості продукції в харчовій і сільськогосподарській промисловості, діагностування захворювань у медицині, у фармакології та парфумерному виробництві, контроль за станом навколишнього середовища.

Потенціометричні сенсорні елементи ІСПТ виглядають найбільш перспективними з точки зору побудови мультисенсорних систем для хімічного

та екологічного моніторингу, оскільки вони мають високу чутливість, швидкодію, малі розміри, сумісність зі стандартними мікроелектронними технологіями та придатні для масового виробництва. З приладної точки зору ІСПТ можна розглядати як спеціальний тип МДН транзистора, в якому видалений металевий заслін, а діелектричний шар приведений у контакт з розчином (електролітом), через який до структури прикладається зовнішня напруга. Для надання хімічної чутливості до певної речовини на затворний діелектрик наносять хімічно селективну мембрану. Принцип дії ІСПТ, як сенсорного елемента, заснований на вимірюванні провідності каналу польового транзистора при зміні концентрації певних іонів в розчині [1].

Топологія та конструкція ІСПТ-сенсорів і сенсорних масивів

Розроблена топологія передбачає розміщення двох ідентичних *p*-канальних транзисторів на одному кристалі загальною площею 8х8 мм. Схематичне зображення топології диференційного сенсору показане на рис.1. *p*+-дифузійні шини з контактами до стоку і витоку кожного з транзисторів виведені на край кристалу. Для усунення можливості утворення паразитного каналу провідності між p^+-областями двох транзисторів, кристал містить захисну роздільну n^+-область шириною 50 мкм з контактом до підкладки. Зигзагоподібна геометрія затворної області транзистора має відношення довжини каналу до його ширини рівним 100, що забезпечує достатній рівень крутизни перехідної характеристики.

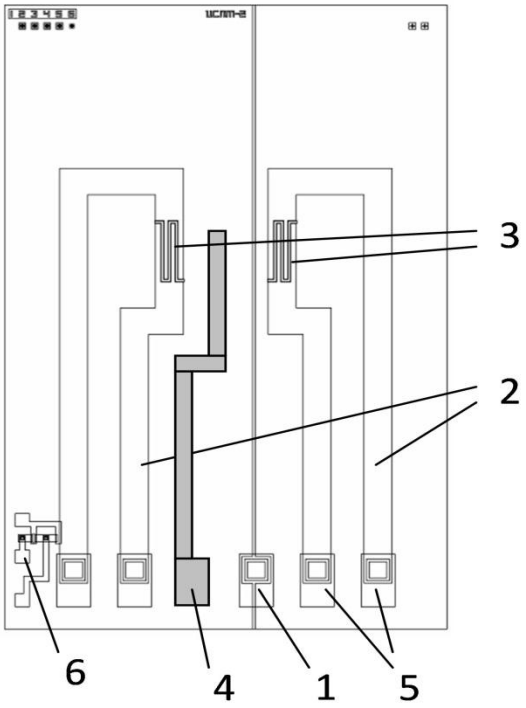


Рис.1. Контурний вигляд зверху топології диференційної пари ІСПТ, що включає: 1 - контакт до *n*-підкладки (в центрі), 2 - *p*+-дифузійні шини від областей витоку і стоку кожного із транзисторів, 3 – зигзагоподібні області затворів, 4 - вивід до вбудованого електроду порівняння, 5 - алюмінієві контактні площини до транзисторних виводів, виведені на край кристалу, 6 - два тестових МОН-транзистори з металевими затворами

Загальної топологічною особливістю розроблюваних конструкцій ІСПТ, що орієнтовані на роботу в біохімічних лабораторіях, є необхідність

забезпечення вільного та зручного доступу до активної області сенсорних елементів для нанесення на них біомембран. Тому для таких елементів може бути використане рознесення активної області затвора і металевих контактних площин на різні частини кристалу, що забезпечує, з одного боку, зручність доступу до активних областей транзисторів, з другого – надійність ізоляції електричних контактів від розчину.

Для спрощення контролю виготовлення сенсору до конструкції були введені додаткові тестові елементи, що являють собою МОН-транзистори, аналогічні за структурою сенсорним елементам, але з металевим затвором (див. рис.1). Наявність цих елементів дозволяє простим тестовим зондом вимірювати пробивні напруги *p-n* переходів для всіх елементів, оцінювати порогові напруги як активних транзисторів з тонким діелектричним шаром, так і паразитних з товстим окислом, а також струми витікання транзисторів без необхідності при цьому забезпечувати контакт кристалу з електролітом. Передбачена також можливість нанесення напиленням на кристал сенсору додаткового металевого електрода, що відіграє роль квазі-електроду порівняння в електрохімічній комірці.

Для виготовлених польових транзисторів були отримані наступні експериментальні параметри: пробивна напруга *p-n* переходів біля 50 В, гранична напруга (відкривання) для активних транзисторів біля -2 В, гранична напруга для паразитних транзисторів біля -15 В, струм витоку через затворний діелектрик на рівні 10^{-12} А.

Розрахунок порогової напруги ІСПТ

Порогова напруга МДН структури залежить від наступних факторів:

- вбудованого заряду в діелектрику Q_d та заряду поверхневих станів Q_{SS} на межі Si-діелектрик, що залежать від орієнтації силіцію та способів очищення поверхні, (заряд Q_d залежить від якості технологічної лінії, де було виготовлено зразок);
- концентрації легуючої домішки в силіції, що впливає на густину просторового заряду збідненої області силіцію Q_B;
- товщини заслінного діелектрику l_d;
- електроду порівняння та характеристик електроліту.

Порогову напругу р-канального ІСПТ розраховуємо, виходячи із методики, описаної у літературі [2, с. 242-255] для р-канальних МДН транзисторів.

Використаємо вираз для порогової напруги р-канальних МДН транзисторів [2]:

$$U_{T.MOS} = -\frac{\Phi_M - \Phi_{Si}}{q} - \frac{Q_d + Q_{SS} + Q_B}{C_{d0}} - \Phi_B \text{ В}, \qquad (1)$$

де $\Phi_B = 2\varphi_{Fn}$, В, поверхневий потенціал за умов сильної інверсії, залежить від рівня легування *n*-підкладки;

$\frac{Q_B}{C_{0d}} = U_B$, В, напруга, що потрібна для створення електричного поля, яке утримуватиме заряд Q_B у збідненому шарі;

$\frac{Q_{SS}}{C_{0d}} = U_{SS}$, В, напруга поверхневих станів напівпровідника;

$\frac{Q_d}{C_{0d}} = U_d$, В, потенціал вбудованих зарядів в діелектрик;

$\frac{\Phi_M - \Phi_{Si}}{q} = \varphi_{MS}$, В різниця між роботами виходу електрону з Si-підкладки та з металу заслону.

У випадку ІСПТ затворна напруга прикладається до транзистора через електроліт за допомогою електрода порівняння (ЕП), тому вираз для порогової напруги набуває вигляду [1][3]:

$$U_{T.ISFET} = -\left[\left(E_{ref} - \psi + \chi_{sol} + \Delta\phi \right) - \frac{\Phi_{Si}}{q} \right] - \frac{Q_d + Q_{SS} + Q_B}{C_{0d}} - \Phi_B \text{ В}, \quad (2)$$

де $E_{ref} = 5$ В – потенціал електроду порівняння [4] ;

$\chi_{sol} = 0,05$ В – дипольний потенціал (не залежить від pH розчину), $\Delta\phi = 0,003$ В – дифузійний потенціал між електролітом та електродом порівняння,

ψ - інтерфейсний потенціал, чутливий до величини pH, величина якого може змінюватись в межах ±0,2 В (для розрахунків взяте значення ψ =0,2 В для типових випадків pH буферних розчинів). Наявність саме цього pH-чутливого інтерфейсного потенціалу і відрізняє ІСПТ від звичайного МДН-транзистора з металевим заслоном. За рівнянням Нернста [5] потенціал ψ визначається через відношення концентрації протонів, адсорбованих на поверхневих центрах діелектрика та у об’ємі напівпровідника,

$$\psi = -\frac{kT}{q} \cdot ln \left(\frac{N_{Hs}}{N_{Hb}} \right)$$

Для розрахунку порогової напруги були використані дані, отримані із технологічного процесу виробництва сенсора [4]:

- концентрація донорів у пластині, $N_{N\min} = 1 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$;
- товщина першого шару підзаслінного діелектрику Si_3N_4, $\frac{l_d}{2} = 50$ нм;
- відносна діелектрична проникність Si_3N_4, $\varepsilon_{d_Si_3N_4} = 7$;

– товщина другого шару підзаслінного діелектрику SiO_2, $\frac{l_d}{2} = 50$ нм;
– відносна діелектрична проникність SiO_2, $\varepsilon_{d_SiO_2} = 4$
– температура середовища, T=300 K;
– густина поверхневих станів для кристалографічної орієнтації силіцію (100), $N_{SS} = 9 \cdot 10^{14}$ м$^{-2}$;
– концентрація вільних носіїв у власному напівпровіднику $n_i = 1{,}5 \cdot 10^{16}$ м$^{-3}$

Проводимо розрахунки параметрів ІСПТ:

– поверхневий потенціал за умов сильної інверсії:

$$\Phi_B = \left| -\frac{2 \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_{N\min}}{n_i} \right) \right| = 0{,}574 \text{ В},$$

де $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана;

– напруга, що утримуватиме заряд Q_B у збідненому шарі:

$$U_B = \left| -\frac{Q_B}{C_{0d}} \right| = 0{,}31 \text{ В},$$

де $Q_B = \left(2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si} \cdot N_{N\min} \cdot |\Phi_B|\right)^{0.5} = 1{,}38 \cdot 10^{-4}$ Кл/м^2,

C_{0d}– питома ємність підзаслінного діелектрику. Останній є діелектрик двошаровим, а тому питому ємність розраховуємо за формулою:

$$C_{0d} = \frac{C_{SiO_2} \cdot C_{Si_3N_4}}{C_{SiO_2} + C_{Si_3N_4}} = 4{,}505 \cdot 10^{-4} \text{ Ф/м}^2,$$

де

$$C_{SiO_2} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ox_SiO_2}}{l_d / 2} \text{ та } C_{Si_3N_4} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{d_Si_3N_4}}{l_d / 2};$$

– напруга поверхневих станів:

$$U_{SS} = \left| -\frac{Q_{SS}}{C_{0d}} \right| = 0{,}32 \text{ В},$$

$$Q_{SS} = q \cdot N_{SS} = 1{,}44 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2;$$

– потенціал вбудованих зарядів в діелектрик для використаної технологічної лінії виробництва [4] $Q_d \approx 8 \cdot 10^{-4}$ Кл/м^2;

$$U_d = \frac{Q_d}{C_{0d}} = \frac{8 \cdot 10^{-4}}{4.505 \cdot 10^{-4}} = 1.78 \text{ В}$$

– рівень Фермі для n-основи:

$$\varphi_{Fn_sub} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_{N\min}}{n_i}\right) = 0,289 \text{ В}$$

Різницю робіт виходу $q \cdot \varphi_{sol-Si}$ (потенціалів виходу φ_{sol-Si}) електронів до діелектрику заслону з Si підкладки та з розчину електроліту покажемо на енергетичній діаграмі для випадку, коли напруга зовнішнього зміщення заслін-витік дорівнює 0.

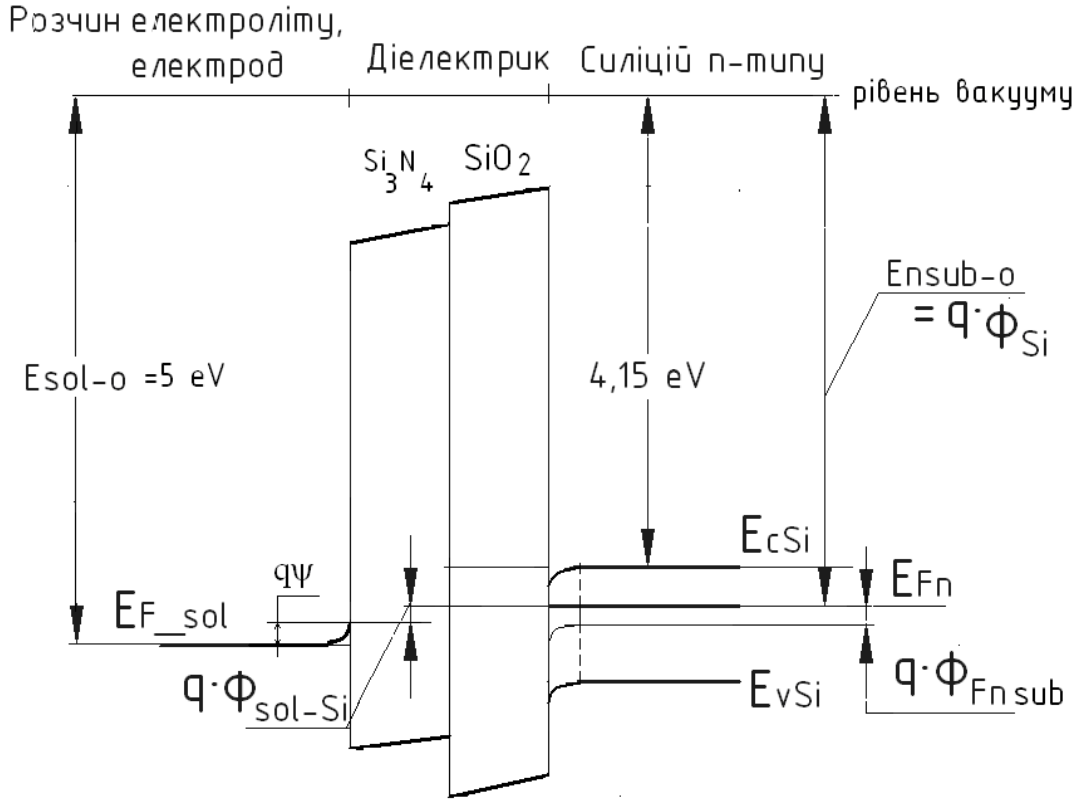


Рис. 2 Зонна діаграма структури електроліт-заслінний діелектрик-основа р-типу при відсутності прикладеної напруги до заслону

На рис. 2 показані:

E_{CSi} – нижній енергетичний рівень зони провідності силіцію. Робота виходу електрону з цього рівня дорівнює 4,15 еВ;

E_{VSi} – верхній енергетичний рівень валентної зони провідності силіцію ;

E_{Fn} – рівень Фермі силіцію основи *n*-типу;

E_{sol-o} – робота виходу з електроліту (електроду порівняння) до діелектрику;

E_{F_sol} – енергетичний рівень іонів електроліту;

E_{nsub-O} – робота виходу електрону з рівня Фермі основи до діелектрику.

Знайдемо потенціал виходу електронів з Si $E_{nsub\text{-}O}$:

$$\frac{E_{nsub-O}}{q} = \varphi_{nsub_O},$$

$$\varphi_{nsub_O} = \frac{E_{CSi}}{q} + \frac{\varphi_g}{2} - \varphi_{n_subst} = 4{,}15 + \frac{1{,}1}{2} - 0{,}289 = 4{,}41 \text{ В}$$

де $\varphi_g = 1{,}1$ В – величина забороненої зони силіцію

Різницю потенціалів електроліт–заслінний діелектрик ($\varphi_{sol-O} = \frac{E_{sol-O}}{q}$) визначаємо за наступною формулою, де значення складових пояснені у рівнянні (2):

$$\varphi_{sol-O} = E_{ref} + \Delta\phi - \psi + \chi_{sol},$$

Знайдемо φ_{sol-O}:

$$\varphi_{sol-O} = 5 + 0{,}003 - 0{,}2 + 0{,}05 = 4{,}85 \text{ В}.$$

Різниця потенціалів виходу φ_{sol-Si}, що показана на діаграмах, дорівнює:

$$\varphi_{sol-Si} = \varphi_{sol-O} - \varphi_{nsub-O} = 4{,}85 - 4{,}41 = 0{,}44 \text{ В}.$$

Знаходимо порогову напругу р-канального ІСПТ за рівнянням(2), підставляючи значення знайдених параметрів:

$$U_{T.ISFET} = -\varphi_{sol-Si} - \frac{Q_d + Q_{SS} + Q_B}{C_{d0}} - \Phi_B =$$

$$= -0{,}44 - \frac{8\cdot10^{-4} + 1{,}442\cdot10^{-4} + 1{,}38\cdot10^{-4}}{4{,}505\cdot10^{-4}} - 0{,}574 = -3{,}42 \text{ В}$$

Отримане розрахункове значення порогової напруги відповідає типовим експериментальним значенням (рис. 3) досліджених зразків ІСПТ.

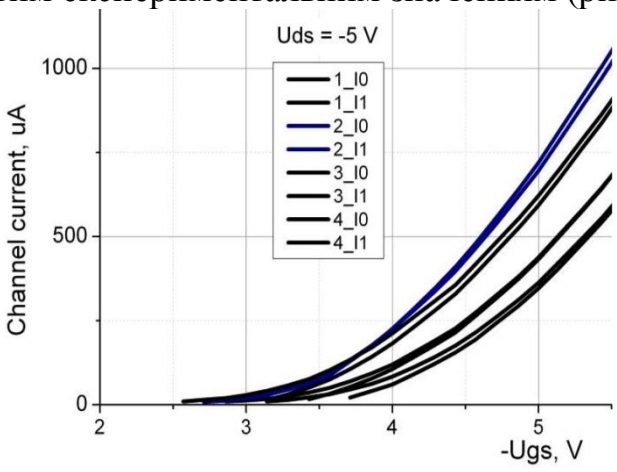


Рис.3. Експериментальні перехідні вольт-амперні характеристики ІСПТ

Як бачимо, значення порогових напруг ІСПТ лежать в межах –(2.5 ..3.5) В. Характеристики на рис.3 показують значення ефективної порогової напруги, що залежить від геометричних розмірів області каналу, тоді як результатом теоретичних розрахунків є напруга, при якій існує сильна інверсія каналу, але безвідносно до значення струму.

Висновки

Розрахована порогова напруга за фізичною моделлю іон-селективного польового транзистора узгоджується з експериментальними даними. Це дає можливість проектування та комп'ютерної симуляції функціонування сенсорного кристалу із узгоджувальними та підсилювальними каскадами для різних застосувань, зокрема «лабораторії на одному кристалі», а також виробництва сенсорних елементів, контрольовано змінюючи параметри технологічного процесу.

Показано, що зміна інтерфейсного потенціалу характеризує сенсорні властивості іон-селективного польового транзистора. Всі інші складові виразу порогової напруги входять у рівняння для звичайних МДН транзисторів.

Література

1. P. Bergveld. ISFET, Theory and Practice // IEEE Sensor Conference, Toronto, Canada. — Oct. 2003. — P. 1—26.

2. Прищепа М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. В 3 ч. Ч. 1. Елементи мікроелектроніки: Навч. посіб. / За ред. М. М. Прищепи. — К.: Вища шк. — 2004. — 431 с. — ISBN 966-642-223-9 (ч.1).

3. P. Bergveld. Thirty years of ISFETOLOGY — What happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years // Sensors and Actuators, B. — 2003. —Vol.88. — P. 1—20.

4. А. Л. Кукла, А. С. Павлюченко, Ю. В. Голтвянский, Ю. М. Ширшов. Многоэлементные сенсорные массивы на основе интегральных кремниевых ионоселективных полевых транзисторов для систем химического мониторинга // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. — Киев. — Наукова думка. — Вып. 42,. — 2007. — С.72 — 79.

5. Advances in chemical sensors, biosensors and microsystems based on ion-sensitive field-effect transistor. V K Khanna. Indian Journal of Pure & Applied Physics vol. 45. — April 2007. — P. 345—353.

Прищепа М.М. Лозовий С.В. ***Іон-селективні польові транзистори. Розрахунок порогової напруги.*** *Розробляються та вдосконалюються сенсори на основі іон-селективних польових транзисторів(ІСПТ) для дослідження іонного складу розчинів. Для проектування та вдосконалення схем управління сенсорами необхідно визначати порогову напругу ІСПТ за даними технологічного процесу. У статті наведено аналітичний розрахунок порогової напруги р-канального ІСПТ.*

Ключові слова: *іон-селективний польовий транзистор (ІСПТ), йонний склад розчину, порогова напруга*

Прищепа Н.М. Лозовой С.В. ***Ион-селективные полевые транзисторы. Расчет порогового напряжения.*** *Разрабатываются и усовершенствуются сенсоры на основе ион-селективных полевых транзисторов(ИСПТ) для исследования ионного состава растворов. Для проектирования и усовершенствования схем управления сенсорами необходимо определять пороговое напряжение ИСПТ, исходя из данных технологического процесса. В статье приведен аналитический расчет порогового напряжения р-канального ИСПТ.*

Ключевые слова: *ион-селективный полевой транзистор (ИСПТ), ионный состав раствора, пороговое напряжение*

Prishchepa M.M. Lozovyi S.V. ***Ion-selective field-effect transistors. Threshold voltage calculation.*** *Ion-selective field-effect transistors (ISFET) are being developed and improved to study ion solution composition. It is necessary to determine threshold ISFET voltage on the basis of process data for design and improvement of sensor control circuit. The threshold voltage analytical calculation for p-channel ISFET is presented in this article.*

Keywords: *ion-selective field-effect transistor(ISFET), ion solution composition, threshold voltage.*