

УДК 621.315.592

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.3.288163>

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ТИМЧАСОВОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ СТРУМУ В ІОН-СЕЛЕКТИВНИХ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРАХ З ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ ШАРАМИ ОКСИДУ/НІТРИДУ КРЕМНІЮ

О. Л. Кукла¹, А. С. Павлюченко¹, С. В. Дзядевич², В. М. Архипова², Ніколь Жаффрезік-Рено³

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
просп. Науки, 41, Київ, 03028, Україна, alex.le.kukla@gmail.com

²Інститут молекулярної біології і генетики НАН України
вул. Заболотного, 150, Київ, 03680, Україна, dzyad@yahoo.com

³Інститут аналітичних наук, Університет Клода-Бернара Ліон 1,
вул. Дуа, 5 Віллербан, Франція

PHYSICAL MODEL OF TEMPORARY CURRENT INSTABILITY IN ION-SELECTIVE FIELD-EFFECT TRANSISTORS WITH SILICON OXIDE/NITRIDE DIELECTRIC LAYERS

О. Л. Кукла, А. С. Павлюченко, С. В. Дзядевич, В. М. Архипова, Ніколь Жаффрезік-Рено

Анотація. Робота присвячена дослідженню нестабільності (дрейфу) порогової напруги p -каналних іон-селективних польових транзисторів (ІСПТ) з індукованим каналом, викликаній тривалим впливом негативної напруги, що прикладається на ділянку каналу транзистора через двошаровий діелектрик $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$. На основі отриманих експериментальних даних запропоновано фізичну модель спостережуваної нестабільності, згідно якої вона обумовлена процесом накопичення нерівноважного позитивного заряду в приповерхневому шарі нітриду кремнію. Для кількісного розрахунку параметрів моделі залучено механізми надбар'єрної іонізації Пула-Френкеля та багатофононної іонізації глибоких центрів. Окреслено конструктивні та технологічні вдосконалення, що можуть покращити стабільність ІСПТ датчиків для тривалих безперервних вимірювань у розчинах.

Ключові слова: Іон-селективний польовий транзистор, рН-чутливий електрод, порогова напруга, дрейф, нітрид кремнію, кулонівські пастки, дірковий перенос заряду

PHYSICAL MODEL OF TEMPORARY CURRENT INSTABILITY IN ION-SELECTIVE FIELD-EFFECT TRANSISTORS WITH SILICON OXIDE/NITRIDE DIELECTRIC LAYERS

О. Л. Кукла, А. С. Павлюченко, С. В. Дзядевич, В. М. Архипова, Ніколь Жаффрезік-Рено

Abstract. The work is devoted to the study of the instability (drift) of the threshold voltage of p -channel ion-selective field-effect transistors (ISFET) with an induced channel, caused by the long-term effect of a negative voltage applied to the channel section of the transistor through a double-layer dielectric $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$. Based on the obtained experimental data, a physical model of

the observed instability is proposed, according to which it is caused by the process of accumulation of an unbalanced positive charge in the near-surface layer of silicon nitride. The mechanisms of Pool-Frenkel superbarrier ionization and multiphonon ionization of deep centers are involved in the quantitative calculation of model parameters. Design and technological improvements are outlined that can improve the stability of ISFET sensors for long-term continuous measurements in solutions.

Keywords: Ion-selective field-effect transistor, pH-sensitive electrode, threshold voltage, drift, silicon nitride, Coulomb traps, hole charge transfer

Вступ

Характерними рисами сенсорних перетворювачів на основі іон-селективних польових транзисторів (ІСПТ) є висока швидкодія, мініатюрність, сумісність з мікроелектронними технологіями при масовому виробництві. Завдяки цим якостям вони є перспективними для створення масивів і багатоелементних сенсорних матриць та побудови на їх основі рідинних аналізаторів для потреб екологічного контролю, біотехнології, медицини. Зокрема, за допомогою масивів мініатюрних рН-чутливих польових транзисторів (рН-ПТ) з іммобілізованими на їх поверхнях шарами ферментів були створені високоселективні сенсорні системи біомолекулярного розпізнавання важливих біохімічних речовин у досліджуваних розчинах шляхом прямого ферментного аналізу [1–5]. Подібні мультибіосенсорні системи, що діють за принципом непрямого (інгібіторного) ферментного аналізу, розроблено для задач екологічного моніторингу токсичних речовин у водних розчинах різного походження [6–12].

Для опису процесів на межі поділу електроліт-діелектрик, які призводять до зміни керуючої напруги в ланцюзі затвора транзистора при зміні активності протонів в розчині, зазвичай використовується модель подвійного зарядженого шару в електроліті, що складається з шару Гельмгольца і дифузійного шару Гоу-Чапмена [13]. Ця модель, проте, не враховує явищ переносу заряду, які можуть мати місце на границі розділу рідкої і твердої фаз. Наприклад, це може бути дифузія протонів з розчину в об'єм діелектрика. Таке перенесення заряду викликає додатковий протонний відгук [14], який можна розглядати як довгострокову нестабільність структури. Додатковий іонний

обмін з розчином відбувається також за участю так званих «прихованих» центрів зв'язування, розташованих в поверхневому гідратованому шарі нітриду кремнію [15], причому цей механізм вважається одним з основних джерел довгострокового дрейфу ІСПТ. Нестабільність даної структури може бути також викликана наявністю рухомого заряду в діелектричному шарі [16, 17], який під дією прикладеного електричного поля може зміщуватися в об'ємі діелектрика. Механізми протікання всіх вищезгаданих процесів залежать від електростатичних параметрів системи електроліт-діелектрик і призводять до появи додаткових низькочастотних складових (довготривалого дрейфу) в реєстрованих відгуках сенсорів.

Мета роботи полягає у дослідженні факторів, що визначають стабільність системи «кремній – оксид кремнію – нітрид кремнію – розчин з фіксованим рН» при впливі відносно слабких електричних полів, характерних для робочих режимів ІСПТ, й побудові фізичної моделі дрейфу таких транзисторів. Дана робота ґрунтується, зокрема, на даних наших попередніх досліджень щодо стабільності характеристик ІСПТ, що розглядаються [18, 19].

Методика та схема вимірювань

В роботі використовували сенсорні чипи з диференційною парою рН-чутливих польових транзисторів. Розроблена топологія передбачала розміщення двох ідентичних р-канальних транзисторів на одному кристалі загальною площею $8 \times 8 \text{ мм}^2$ (ефективна площа для нанесення чутливих шарів складає біля 12.5 мм^2) [3]. Кристалічний чип з диференційною рН-ПТ-парою монтувався на спеціальній друкованій платі, його контактні площини з'єднувались з платою тонкими дротами та

ізолювалися герметичним компаундом. Фото диференційного рН-ПТ- електроду в зборі показано на рис.1.

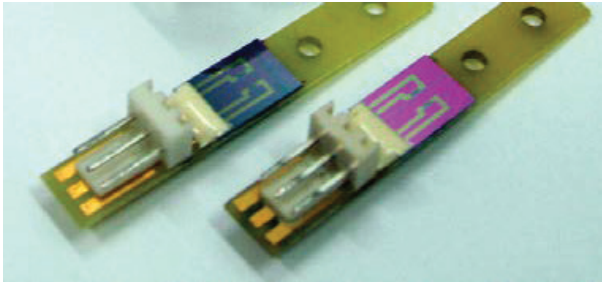


Рис. 1. Загальний вигляд сенсорних електродів на основі рН-чутливих польових транзисторів.

Для виготовлення рН-ПТ-структур використовувались стандартні операції кремнієвої МОН-технології з формуванням підзатворного діелектричного шару із термічно окисленої плівки SiO_2 товщиною 50 нм та осадженої в реакторі зниженого тиску плівки Si_3N_4 товщиною 50–70 нм. В якості підкладки використовувались кремнієві пластини *n*-типу КЕФ 4,5 <100> з концентрацією домішки 10^{15} см^{-3} . Зигзагоподібна геометрія затворної області транзистора з відношенням довжини каналу до його ширини, рівним 100, забезпечувала достатньо високий коефіцієнт підсилення *p*-канальних транзисторів.

Протон-селективні властивості транзисторів обумовлені рН-чутливим діелектричним шаром Si_3N_4 . Величина рН-чутливості сенсорних елементів становила біля 40–45 мВ/рН, що при наявній крутизні перехідної вольт-амперної характеристики (ВАХ) транзистора в межах 400–500 мкА/В забезпечувало рН-чутливість струму каналу порядку 16–23 мкА/рН. Вимірювання відгуку рН-ПТ відбувалося за допомогою схеми прямого вимірювання струму в каналі польового транзистора з активним навантаженням. Порогова напруга для рН-ПТ була близько –2,5 В. Вимірювання проводились за умов: струм каналу близько 500 мкА, напруга стік-витік близько 2 В, підкладка з'єднана із стоком (рис.2) [18]. Детальний опис топології, дизайну, електричних характеристик, метрологічних параметрів та сенсорної електроніки для досліджуваних рН-

ПТ- елементів наведено в ряді наших попередніх робіт [20–24].

Вимірювання струму стоку *p*-канального польового транзистору проводилося в лінійній області перехідної ВАХ при постійній напрузі стоку $U_{DS} = -2 \text{ В}$. Напруга до затворного діелектрику над каналом рН-ПТ прикладалася через стандартний хлор-срібний електрод порівняння. Як електроліт використовувався фосфатний буферний розчин з постійною величиною рН = 7.0. За величину порогової напруги приймалася напруга на затворі, при якій струм в каналі починав перевищувати 2 мкА.

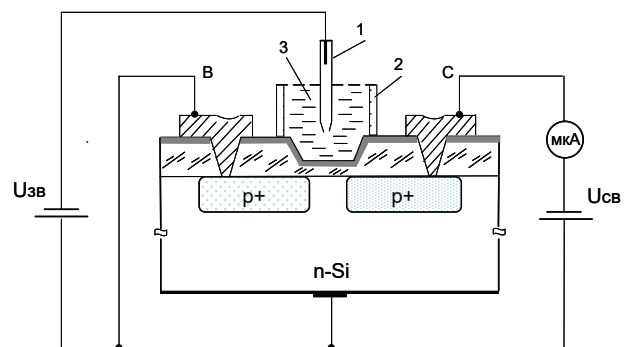


Рис. 2. Схема підключення *p*-канального ІСПТ для проведення вимірювань: 1 – електрод порівняння, 2 – електролітична комірка, 3 – досліджуваний розчин.

Побудова фізичної моделі дрейфу

Для широкого застосування розроблених *p*-канальних кремнієвих польових транзисторів із діелектричними шарами оксиду/нітриду кремнію в біосенсорних пристроях дуже важливо забезпечити високу стабільність їх електродімічних характеристик, оскільки це безпосередньо впливає на чутливість визначення біохімічних речовин в досліджуваних розчинах. Незважаючи на численні дослідження процесів переносу заряду в нітриді кремнію, ефекти дрейфу характеристик транзисторів, що пов'язані з захопленням заряду на пастки (локалізовані стани в забороненій зоні) та його переносу по цих пастках в умовах тривалої дії зовнішнього електричного поля, залишаються мало відомими і практично не описані в літературі. Цей ефект виявився важливим для функціонування ІСПТ, які контактують з рідиною, оскільки він суттєво обмежував

можливості використання приладів на їх основі в реальних умовах.

Експериментальне дослідження зарядової стабільності двошарового затворного діелектрика кремнієвих МНОН та ІСПТ транзисторів, розташованих на одному кристалі, при прикладанні різної за знаком, величиною і терміном витримки постійної напруги та при різній температурній обробці кристалів виявило ряд нових особливостей [18, 19]. Аналіз отриманих даних, разом з притягненням теоретичних розрахунків процесу транспорту дірок показав, що спостережувана нестабільність характеристик ІСПТ може бути викликана процесом накопичення нерівноважного позитивного заряду на поверхні діелектрика. Для пояснення цього процесу запропонована наступна модель дрейфу.

Відомо, що нітрид, отриманий хімічним газовим осадженням, має значні структурні порушення поверхневого шару, та пов'язані з ними пастки заряду, при цьому зазвичай присутній широкий спектр пасток, від дрібних з енергією біля десятків еВ до глибоких з енергією понад 2 еВ. Під дією зовнішнього електричного поля (з напругами на затворі до -8 В, що відповідає полям до 5×10^5 В/см) локалізований заряд дірок в нітриді кремнію за тривалої дії від'ємної напруги поступово зміщується по цих пастках до зовнішньої поверхні на межі розділу з електролітом. При цьому в приповерхневому шарі нітриду формується позитивний зарядовий шар, який зменшує поле в напівпровіднику й викликає відповідне зменшення струму в каналі транзистора. Оскільки рухливість локалізованого заряду по пастках дуже мала, цей процес є затягнутим в часі: його швидка фаза, що відповідає транспорту по дрібних пастках, складає одиниці хвилин, а повільна фаза, яка відповідає переносу через більш глибокі пастки, триває до кількох годин. На користь даної моделі дрейфу, зокрема, свідчило те, що відпал кристалів у водні помітно зменшував нестабільність ІСПТ-елементів, вочевидь за рахунок пасивації обірваних зв'язків та реструктуризації поверхневих дефектів в діелектрику, в результаті можливість руху заряду

по пастках, що призводить до дрейфу, в значній мірі зникала.

Для подальшого обґрунтування запропонованої моделі розглянемо детальніше процеси переносу носіїв заряду в нітриді кремнію за участю захоплення / вивільнення носіїв на пастках заряду. Вже досить давно відомо, що у власне в діелектричному матеріалі – нітриді кремнію існує як електронна, так і діркова електропровідність. При цьому показано, що дірки інжектуються в діелектрик з кремнію при негативній полярності на затворі, а електрони – при позитивній полярності, з наступним захопленням носіїв в нітриді. Встановлено, що просторовий розподіл носіїв заходить глибоко всередину нітриду, займаючи майже всю товщину його шару з середньою густиною захоплених електронів порядку 3×10^{18} см⁻³ та захоплених дірок 10^{19} см⁻³ [25]. Знайдено, що центроїд розподілу захоплених носіїв в шарі нітриду кремнію є функцією амплітуди затворної напруги та тривалості її прикладання. При цьому центроїд розподілу, як і густина заряду захоплених в пастках носіїв виявилися майже втричі вищим для дірок, ніж для електронів, і це відношення ще зростало при рості амплітуди та тривалості затворної напруги. Отримані дані також свідчили, що діркові пастки в нітриді кремнію вочевидь більш дрібні, ніж електронні пастки, що в результаті й призводить до переважної діркової провідності нітриду [26]. Тож з різних експериментів було встановлено, що за негативної полярності затвору дірки є основним носіями струму в нітриді кремнію [27], а струм лімітується електронними та дірковими пастками, розподіленими по об'єму шару.

Присутність широкої області з Пул-Френкелівською залежністю струму від прикладеної напруги різної полярності (тобто спрямління вольт-амперних характеристик в координатах $\log(j) - E^{1/2}$) свідчить, що ці пастки можна розглядати як кулонівські, й ефект Пула-Френкеля може мати місце в нітриді кремнію [28]. Зазначимо, що зазначений ефект полягає в зниженні надбар'єрної термічної енергії іонізації кулонівських центрів в зовнішньому електричному полі. З іншого

боку, переріз захоплення $5 \times 10^{-13} \text{ см}^2$ вказує на кулонівську взаємодію носіїв з глибокими центрами [29–31]. В літературі обговорюються два типи пасток: вже згадані кулонівські (тобто такі, що притягають або відштовхують носії) та нейтральні (центри з потенціалом нульового радіусу). Механізм іонізації кулонівських пасток при відносно слабких полях та високих температурах визначається ефектом Пула-Френкеля [32] та багатофононними ефектами. Механізм іонізації нейтральних центрів при тих же умовах також визначається багатофононними ефектами. Тому ці ефекти було в подальшому нами запропоновано як важливі фактори, що сприяють виникненню нестабільності, яка спостерігається експериментально.

Перенос заряду в напівпровідниках, як і широкозонних діелектриках, до яких відноситься нітрид кремнію (рис.3), в загальному випадку можна описати за допомогою дифузійно-дрейфових рівнянь Шоклі-Ріда-Хола та рівняння Пуассона, в які додатково входять чотири кінетичні рівняння для швидкостей зміни концентрації вільних та захоплених електронів та дірок з урахуванням генерації, рекомбінації, захоплення та вивільнення носіїв на пастках. Повний варіант вирішення такої системи рівнянь вельми складний і лише частково може бути знайдений за допомогою чисельних машинних розрахунків [33].

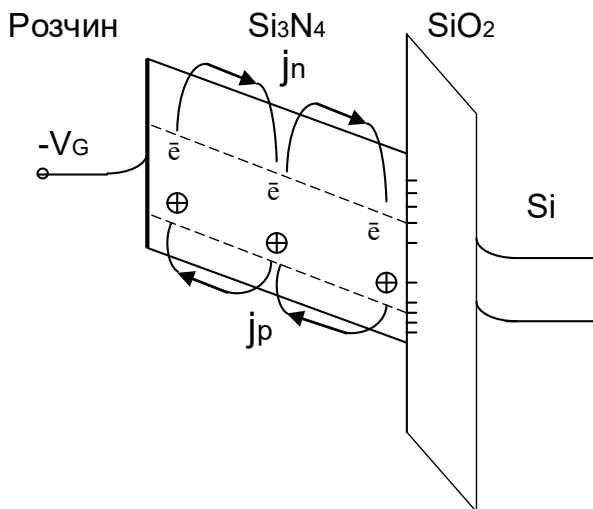


Рис. 3. Енергетична діаграма кремнієвої структури, де схематично показано рух обох типів носіїв в електричному полі прикладеної зовні від'ємної затворної напруги $-V_G$.

Однак в даній роботі нам не потрібно детальне вирішення рівнянь струму. До того ж, для контролю стабільності роботи приладу нас цікавить власне не сам тимчасовий струм витoku в діелектрику, а його результат у вигляді нерівноважного заряду або потенціалу на затворі транзистору, який в свою чергу викликає зміни струму в каналі ІСПТ. Тому скористаємося більш простими оцінками.

Відомо, що вірогідність вивільнення з кулонівської пастки в одиницю часу згідно механізму надбар'єрної іонізації Пула-Френкеля визначається наступним виразом [34]:

$$P = \nu \exp\left(-\frac{W_i - \beta\sqrt{E}}{kT}\right), \quad \beta = \sqrt{\frac{e^3}{\pi\epsilon\epsilon_0}}, \quad (1)$$

де W_i – енергії пастки, β – постійна Френкеля, E – напруженість електричного поля, ϵ – високочастотна діелектрична проникність нітриду, ν – частотний фактор [34]. Зауважимо, що величина, обернена до виразу (1) фактично є часом збереження заряду на пастці. Ефект Френкеля має місце у відносно слабких полях,

коли зниження бар'єру $\beta\sqrt{E}$ не перевищує величини ефективної енергії електрона в полі кулонівської пастки (так званої енергії Рідберга). Оцінки показують, що цій умові відповідають електричні поля $E < 4 \times 10^6 \text{ В/см}$. До таких належать і використовувані в даній роботі поля (до $5 \times 10^5 \text{ В/см}$), тому розрахована для цього випадку величину кулонівської знижки становить $\beta\sqrt{E} = 4.317 \times 10^{-21} \text{ Дж}$, або 0.027 еВ . Зазначимо, що для більшості пасток в нітриді (які є значно глибшими) це означає, що вірогідність їх іонізації буде вкрай низькою. Для того, щоб процес руху зарядів все ж таки мав місце (як свідчать експерименти), слід врахувати ще й зазначений вище багатофононний механізм іонізації глибоких центрів. Останній ймовірно супроводжується численними переходами носіїв з нижніх рівнів на більш високі, які прискорюючись в електричному полі, залучають в цей процес фонони ґратки. За рахунок електрон-фононної взаємодії та зворотної

передачі енергії пасткам збільшується можливість іонізації локальних центрів з захопленнями носіями. Врахування механізму багатофоновної іонізації для кулонівських центрів, як показано в роботі [35], призводить до заміни в формулі (1) параметру $1/kT$ на такий:

$$\frac{1}{kT^*} = \frac{1}{kT} \pm \frac{2\tau}{\hbar}, \quad (2)$$

де T^* – ефективна температура, τ – визначається як час тунелювання дефекту. Знак плюс в цьому виразі відповідає слабкому електрон-фононному зв'язку, а знак мінус – сильному. Враховуючи, що $1/kT$ за розмірністю є величиною, зворотною до енергії, то параметр $2\tau/\hbar$ можна інтерпретувати як додаткову зворотну енергію, що додається до звичайної теплової складової. І якщо значення $1/kT$ за нормальної температури складає 40 eV^{-1} , то вказана добавка може складати, за даними [34], від 50 eV^{-1} (для слабкої електрон-фононної взаємодії) до -20 eV^{-1} (для сильної взаємодії).

Як було зазначено вище, величина, обернена до виразу (1) є часом утримування заряду на пастці:

$$t_{ymp} = \nu^{-1} \exp((W_t - \beta\sqrt{E}) / kT^*). \quad (3)$$

Звідси витікає якісний висновок, що умова слабого електрон-фононного зв'язку (при рості $1/kT^*$) веде до збільшення часу збереження заряду t_{ymp} (аналогія з ефектом пам'яті, коли заряд може зберігатися дуже довго), до такого ж результату веде збільшення глибини залягання пастки W_t . Для сильної електрон-фононної взаємодії (при зменшенні $1/kT^*$) цей час може бути досить малим, цьому сприяє також зменшення енергії пастки. Саме випадок сильної електрон-фононної взаємодії і є для нас найбільш цікавим, оскільки він пов'язаний з можливістю переносу локалізованого заряду в нітриді кремнію.

В подальшому для кількісних оцінок часу зберігання заряду на пастках за формулою (3) нам потрібно знати величину частотного фактору ν . Для цього приймемо до уваги, що розрахунки з використанням ефективної

температури в роботі [34] показали, що підсилення електрон-фононного зв'язку відповідає зменшенню частотного фактору, а послаблення цього зв'язку відповідає його збільшенню, причому діапазон зміни цього параметру відповідно сягає від 10^3 до 10^{15} c^{-1} . Неявним чином це співвідношення корелює також з залежністю від енергії іонізації пастки W_t [34]: очевидно із збільшенням енергії W_t величина фактору ν теж повинна зростати, й навпаки.

Таким чином, з вище приведених міркувань оберемо для оцінок наступні параметри:

Дрібні пастки, $W_t = 0.3-0.5 \text{ eV}$, $1/kT^* = 20 \text{ eV}^{-1}$, $\nu = 10^4-10^5 \text{ c}^{-1}$, звідси $t_{ymp} = 25-150 \text{ мс}$;

$W_t = 0.7-1 \text{ eV}$, $1/kT^* = 20 \text{ eV}^{-1}$, $\nu = 10^7-10^8 \text{ c}^{-1}$, тоді $t_{ymp} = 0.8-3 \text{ с}$;

Глибокі пастки, $W_t = 1.5-2 \text{ eV}$, $1/kT^* = 20 \text{ eV}^{-1}$, $\nu = 10^{13}-10^{15} \text{ c}^{-1}$, $t_{ymp} = 0.5-150 \text{ с}$;

$W_t = 2.1-2.2 \text{ eV}$, $1/kT^* = 20 \text{ eV}^{-1}$, $\nu = 10^{15} \text{ c}^{-1}$, $t_{ymp} = 10^3-10^4 \text{ с}$.

Зазначимо, що для всіх розрахунків ми узяли умову сильної електрон-фононної взаємодії ($1/kT^* = 20 \text{ eV}^{-1}$), щоб забезпечити можливість переносу заряду по пастках (актуальний випадок). Як бачимо, для всіх типів пасток (дрібних та глибоких) отримано цілком адекватний час утримання, який корелює з експериментально спостережуваними часами як швидкої, так і повільної частини дрейфу струму в транзисторах. З іншої сторони, легко бачити, що в залежності від вибору значень параметрів W_t , $1/kT^*$ та ν , час утримування заряду на пастці може сягати гігантських меж від одиниць мілісекунд до років. В першому випадку це дозволяє легку іонізацію пасток і можливість руху заряду по ним, в другому – відповідає ефекту пам'яті в нітриді. Переносу заряду по пастках, звичайно, відповідає певна рухливість носіїв (дірок). В зв'язку з цим важливо відзначити, що час утримування носіїв на пастках безпосередньо пов'язаний з їх рухливістю: чим менше час утримування, тим більша рухливість носіїв, й навпаки. Цей зв'язок ми використаємо надалі.

Таким чином, отримані оцінки свідчать, що завдяки великій кількості пасток в шарі нітриду кремнію, під дією зовнішнього поля від'ємної полярності дірки дійсно можуть пе-

ресуватись по цих пастках до зовнішньої поверхні нітриду на границі розділу з електролітом (рис.4). Очевидно, цей процес займає певний час (фактично рівний терміну тимчасової нестабільності приладу), та після формування динамічно рівноважного поверхневого зарядового шару стан стабілізується.

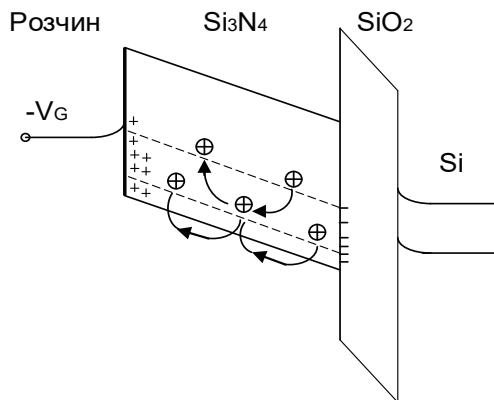


Рис. 4. Рух дірок в електричному полі в об'ємі нітриду призводить до накопичення позитивного заряду на його границі з розчином; рух відбувається переважно по дрібних пастках з викидом дірок в валентну зону та прискоренням в електричному полі, рух через більш глибокі пастки може йти через проміжні енергетичні рівні.

Надалі, враховуючи весь спектр можливих діркових пасток з різними концентраціями та глибиною, оцінимо час руху дірок через шар нітриду кремнію, щоб співставити його з експериментально спостережуваними кінетичними кривими дрейфу приладів (типова товщина Si_3N_4 для серії розроблених ІСПТ складала близько 60–70 нм). Для цього розглянемо детальніше типову криву кінетику встановлення струму в каналі ІСПТ (рис.5), що безпосередньо відповідає тимчасовому процесу зміщення дірок в нітриді. Як видно, цю криву умовно можна розбити на три основні інтервали:

I – швидка складова, яка займає час біля 15 хв. та складає близько 77% від повної амплітуди релаксації; в свою чергу, від цього проміжку можна відокремити надшвидку частину відгуку з часом біля 3 хв. та розмахом біля 50%.

II – середня частина релаксації тривалістю біля 30–35 хв. та розмахом до 20% від амплітуди.

III – довготривала частина тривалістю більше 2 год. та рівнем до 5% від повної амплітуди.

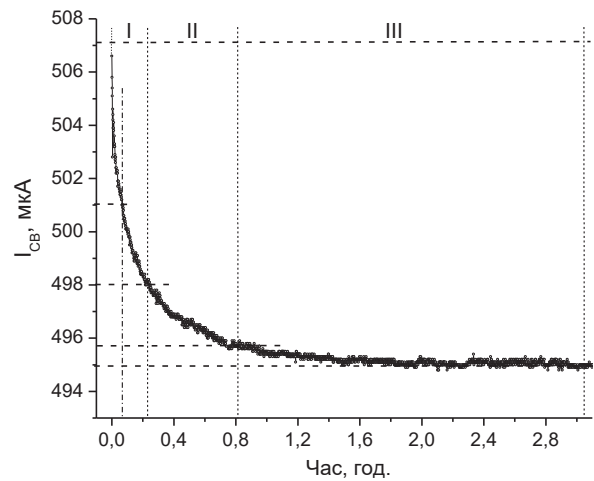


Рис. 5. Кінетика встановлення струму в каналі ІСПТ за прикладеної до затвору транзистора напруги -5 В.

Відповідно до цих складових дрейфу можна визначити й різні внески діркового транспорту. Логічно припустити, що першому етапу релаксації відповідає рух дірок з найбільшою рухливістю. А оскільки амплітуда цієї складової також найбільша, можна припустити, що цей рух відбувається по пастках найбільшої концентрації. До таких діркових пасток з концентрацією порядку 10^{19} см^{-3} , як відомо [25, 26, 34], в нітриді відносяться саме дрібні пастки, вочевидь з енергіями до 0.5 еВ. Середній частині релаксації відповідають носії з майже на порядок меншою рухливістю, а із розмаху цієї складової можна припустити, що в цьому процесі будуть задіяні більш глибокі пастки до 1 еВ, ймовірно з концентраціями 10^{17} – 10^{18} см^{-3} . Кінцева стадія релаксації відповідає руху з найменшою відносною рухливістю дірок, відповідно енергії задіяних пасток складатимуть 2–2.2 еВ з концентрацією порядку 10^{16} см^{-3} .

Обговорення

Зазначимо, що приведені вище значення енергій пасток та їх концентрації є наближеними, вони були розраховані із наступних спро-

щених оцінок: для даної концентрації пасток N_i розраховувалось середня відстань між пастками $r = N_i^{-1/3}$, ця відстань умовно вважалась довжиною вільного пробігу умовного носія, далі обчислювалась енергія, яку набуває носій в електричному полі на довжині пробігу, звідси отримана енергія за сенсом зіставлялася з енергією іонізації пастки. Ще одним припущенням було те, що концентрацію носіїв ми вважали тотожною концентрації пасток, хоча насправді пасток більше, ніж носіїв. Але всі ці спрощення принципово не змінюють основну ідею запропонованої моделі, а саме, що в процесі переносу заряду в нітриді одночасно задіяний цілий спектр діркових пасток з різними енергіями, і відповідно, з різною рухливістю дірок, а відтак для них будуть різні часи руху в шарі нітриду від самих малих до дуже великих. Відповідно до цього, в початковий період протягом кількох хвилин відбувається швидка фаза релаксації з переносом заряду переважно по дрібних пастках в електричному полі, яке навіть може бути й невеликим (тобто при малих затворних напругах все одно відбувається деяке зміщення струму, що підтверджують експерименти). З часом поступово починають проявлятися все більш глибокі пастки, але для цього напруженість електричного поля повинна бути порядку 10^5-10^6 В/см, щоб був ефективно задіяний власне багатофоновий механізм іонізації пасток.

Оцінимо величини рухливості діркових носіїв наступним чином. Припустимо, що в кожній фазі релаксації I, II і III приймає участь лише один тип пасток, з певною концентрацією і відповідно величиною рухливості носіїв. За час відповідної фази процесу зазначені типи носіїв повинні продрейфувати шар нітриду кремнію та досягнути його зовнішньої границі з електролітом. Тоді з виразу $d_{Si3N4} = \mu_i E t_i$, де d_{Si3N4} – товщина шару нітриду (вважаємо 60 нм), μ_i – рухливість i -типу носіїв, t_i – час протікання i -фази релаксації (відомий із експерименту), легко знайти величину рухливості:

$$\mu_i = 0.6 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с} \text{ (при } t_i = 180 \text{ с)},$$

$$\rho = 1/\sigma = 10^{13} \text{ Ом} \times \text{см},$$

де ρ – відповідне значення питомого опору шару, яке розраховано з виразу для електропровідності $\sigma = e N_i \mu_p$, в якому концентрацію пасток беремо рівною $N_i = 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Як можна бачити, отримане значення опору є адекватним і відповідає реальним значенням питомого опору діелектричних матеріалів, наприклад різних типів скла, до яких відноситься і нітрид кремнію. Аналогічно, розрахунок для другої та третьої стадій кінетики релаксації дає наступні значення рухливості та відповідного питомого опору:

$$\mu_{II} = 10^{-14} \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с} \text{ (} t_{II} = 1260 \text{ с)},$$

$$\rho = 1.7 \cdot 10^{14} \text{ Ом} \times \text{см};$$

$$\mu_{III} = 2 \times 10^{-15} \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с} \text{ (} t_{III} = 5400 \text{ с)},$$

$$\rho = 0.6 \cdot 10^{17} \text{ Ом} \times \text{см}.$$

Таким чином, процес буде завершуватись переміщенням дірок кожного вказаного типу, що мають різні значення рухливості, та відповідно різні часи руху через шар нітриду до його зовнішньої границі з електролітом, поступово формуючи там сумарний нерівноважний поверхневий заряд. Повне завершення описуваного процесу означає закінчення дрейфу електричних параметрів транзистору.

Цікаво відмітити, що сформований зарядовий стан може зберігатися тривалий час навіть після вимикання зовнішньої напруги. Але це відбувається вже по іншій причині – за рахунок утримування його зарядом подвійного електричного шару в електроліті, що виникає в ході описуваного процесу. І лише коли розчин видаляється з поверхні нітриду, то вже немає причин для утримування нерівноважного заряду на його поверхні, тоді додатковий заряд поступово уходить в об'єм, рівномірно розподіляючись по плівці нітриду. Численні експерименти підтвердили зворотність цього процесу і можливість відновлення початкового стану транзистору після його тривалої роботи в такому режимі. Однак для відновлення потрібно видалення транзистору з розчину, а це не завжди можливо. Притому транзисторний датчик через значне зміщення робочої точки потрібно буде калібрувати заново. Практичний висновок, який витікає з запропонованої моделі, полягає в тому, що при створенні

ІСПТ-масивів, придатних для тривалої роботи в реальних умовах без необхідності перекалібрування приладу, потрібно використовувати режими включення з мінімально можливими напругами, що прикладені до затворів (з цієї точки зору більш відповідними будуть транзистори з вбудованим каналом).

На користь запропонованої моделі дрейфу доречно наголосити, що спостережувані ефекти нестабільності ІСПТ не можуть бути спричинені іншими відомими ефектами впливу [17, 14–16, 36, 37], такими як переміщення рухомого заряду в діелектрику (іонів натрію, калію, літію (які з'являються в ході технологічного процесу виготовлення МДН-структур), оскільки відомо, що відпал не прибирає ці заряди з діелектрика, в той же час після відпалу зразків існуючий дрейф припинявся. До того ж термін процесу переносу у випадку рухомих іонів повинен бути невеликий, в той же час ми спостерігали досить довготерміновий процес. Також це не може відбуватись за участі поверхневих центрів нітриду кремнію (в тому числі прихованих підповерхневих центрів, так званих buried sites) у зв'язуванні іонів з розчину, оскільки експерименти показали, що при тривалому знаходженні кристалу датчика в розчині при вимкненому живленні жодних помітних змін в його характеристиках не відбувається, відтак ми маємо справу саме з польовим ефектом виникнення нестабільності при прикладанні зовнішнього електричного поля. Це не є також результатом анодного окислення нітриду кремнію в розчині, або дифузії протонів і/або інших іонів з розчину вглиб діелектрика, оскільки ці процеси дуже тривалі та несумісні за терміном дії зі спостережуваними, та й величина зсуву порогової напруги після них дуже мала, в порівнянні з розглядуваним процесом.

Висновки

На основі аналізу експериментальних даних досліджень зарядової стабільності двохшарового діелектрика $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ запропоновано фізичну модель нестабільності (дрейфу) основних електричних параметрів (порогової напруги, струму каналу) сенсорних елементів

на основі p -канальних іон-селективних польових транзисторів з індукованим каналом. Згідно неї спостережувана нестабільність викликана процесом накопичення нерівноважного позитивного заряду в приповерхневому шарі нітриду кремнію, в свою чергу обумовленого наявністю значних структурних дефектів на поверхні нітриду кремнію й супутніх їм пасток заряду, що призводить до поступового зміщення локалізованого позитивного заряду до межі розділу з електролітом при тривалому впливі прикладеної напруги. Для кількісного розрахунку параметрів моделі при полях до 10^5 В/см залучено механізм надбар'єрної іонізації Пула–Френкеля, який описує перенос носіїв по дрібних пастках нітриду кремнію, а при полях більше 10^5 В/см – механізм багатофоновної іонізації глибоких центрів. На користь запропонованої моделі дрейфу свідчить те, що відпал кристалів у водні помітно зменшував нестабільність ІСПТ-елементів за рахунок реструктуризації поверхневих дефектів кристалу, в результаті чого можливість руху заряду по дрібних пастках в значній мірі зникала.

Встановлено, що описуваний процес має оборотний характер, проте спотворення, що вносяться ним, можуть бути небажаними при проведенні тривалих безперервних вимірювань. В зв'язку з цим запропоновано використовувати режими роботи транзисторів, при яких до затвору прикладалася б мінімально можлива напруга. З цієї точки зору переважними є транзистори з вбудованим каналом.

Подяка. Робота була проведена завдяки фінансовій підтримці від Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу проєктів “Наука для безпеки і сталого розвитку України” (проєкт 2021.01/0010).

Список використаної літератури

[1]. O. O. Soldatkin, S. V. Marchenko, O. L. Kukla, O. S. Pavliuchenko, S. V. Dzyadevych, O. P. Soldatkin. Multybiosensorna systema na osnovi rN-chutlyvykh polovykh tranzystoriv dlia odnochasnoho vyznachennia hliukozy, kreatyninu ta sechovyny // Sens. elektron. mikrosist. tehnol., 2018, 15 (2), p. 54–66 (in Ukrainian).

- [2]. O. L. Kukla, S.V. Marchenko, O.A. Zinchenko, O.S. Pavlyuchenko, S.V. Dzyadevych, O.P. Soldatkin. Biosensor Measurement of Urea Concentration in Human Blood Serum // Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 68, August 2012, Oslo, Norway, pp. 147–151.
- [3]. S. V. Marchenko, O.A. Zinchenko, O.L. Kukla, O.S. Pavlyuchenko, S.V. Dzyadevych, O.P. Soldatkin. Optymizatsiia biosensornoho vyznachennia kontsentratsii sechovyny v syrovattsi krovi liudyny // Sens. elektron. mikrosist. tehnol., 2012, Vol. 3(9), № 1, p. 53–61 (*in Ukrainian*).
- [4]. O. A. Zinchenko, S.V. Marchenko, T.A. Sergeeva, A.L. Kukla, A.S. Pavlyuchenko, E.K. Krasnyuk, A.P. Soldatkin, A.V. El'skaya. Application of creatinine-sensitive biosensor for hemodialysis control // Biosensors and Bioelectronics, 2012, 35, pp. 466–469.
- [5]. S. V. Marchenko, O.A. Nazarenko, O.L. Kukla, O.S. Pavlyuchenko, E.K. Krasnyuk, O.P. Soldatkin. Rozrobka kreatynin-chutlyvoho biosensora dlia medychnoho zastosuvannia // Sens. elektron. mikrosist. tehnol., 2009, No. 4, p. 55–62 (*in Ukrainian*).
- [6]. O. L. Kukla, O. O. Soldatkin, A. S. Pavlyuchenko, I. S. Kucherenko, V.M. Peshkova, V.N. Arkhypova, S.V. Dzyadevych. Toxicity Analysis of Real Water Samples of Different Origin with ISFET Multibiosensor // Biochemistry and Biophysics, 2014, 2, Iss. 1, pp. 7–12.
- [7]. A. L. Kukla, A. S. Pavlyuchenko, Yu.V. Goltvianskyi, O.O. Soldatkin, V.M. Arkhypova. Express Monitoring of Overall Toxicity and Separate Chemicals in Water Solutions with the ISFET Arrays // Report on the 34th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, Alberta, Canada, October 4–6, 2011, pp. 966–975.
- [8]. A. S. Pavlyuchenko, A.L. Kukla, YU. V. Goltvyanskij. Primenenie ionoselektivnyh polevyh tranzistorov dlya fermentnogo analiza toksichnyh primesej v vodnyh rastvorah // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature, 2010, No. 3 (87), s. 35–46 (*in russian*).
- [9]. O. O. Soldatkin, O.S. Pavlyuchenko, O.L. Kukla, V.M. Arkhypova, S.V. Dzyadevych. Rozroblennia protsedury multybiosensornoho vyznachennia vazhkykh metaliv i pestytsydiv u dovkilli // Biotekhnolohiia, 2010, t. 3, No. 2, p. 71–81 (*in Ukrainian*).
- [10]. O. O. Soldatkin, O.S. Pavlyuchenko, O.L. Kukla, I.S. Kucherenko, V.M. Peshkova, V.M. Arkhypova, S.V. Dzyadevych, O.P. Soldatkin, H.V. Yelska. Vykorystannia fermentnoho multybiosensora pry analizi toksychnosti realnykh vodnykh zrazkiv riznogo pokhodzhennia // Biopolymers and Cell, 2009, 25, No. 3, pp. 204–209 (*in Ukrainian*).
- [11]. O. O. Soldatkin, O.S. Pavlyuchenko, O.L. Kukla, V.M. Arkhypova, S.V. Dzyadevych, O.P. Soldatkin, H.V. Yelska. Optymizatsiia roboty multybiosensora pry inhibitornomu analizi toksyniv // Biopolimery i klityna, 2008, Vol. 24, No. 6, s. 494–502 (*in Ukrainian*).
- [12]. O. L. Kukla, O.S. Pavlyuchenko, Yu. V. Holtvianskyi, O. O. Soldatkin, V.M. Arkhypova, S.V. Dzyadevych, O.P. Soldatkin. Sensorni masyvy na osnovi dyferentsiinykh ISPT-elementiv dlia monitorynhu toksychnykh rehovyn pryrodnoho ta shtuchnoho pokhodzhennia // Sens. elektron. mikrosist. tehnol., 2008, No. 2, p. 58–68 (*in Ukrainian*).
- [13]. W. Sui and R. Cobbold. Basic properties of the electrolyte-SiO₂-Si system: Physical and theoretical aspects // IEEE Trans. on Electron Devices, 1979, Vol. ED-26, No. 11, pp. 1805–1815.
- [14]. G. T. Yu, S.K. Yen. Hydrogen ion diffusion coefficient of silicon nitride thin films // Applied Surface Science, 2002, 202, pp. 68–72.
- [15]. R. Kühnhold, H. Ryssel. Modeling the pH response of silicon nitride ISFET devices // Sensors and Actuators, B, 2000, 68, pp. 307–312.
- [16]. D. J. Breed, R.P. Kramer. Charge trapping in MOS systems // Thin Solid Films, 1972, 13, No. 1, pp. 1–4.
- [17]. C. Zi. Fizika poluprovodnikovyyh priborov, M.: Mir, 1984, Vol. 1, 455s. (*in russian*)
- [18]. A. S. Pavlyuchenko, A.L. Kukla, Yu. V. Goltvyanskij, V. M. Arkhipova, S.V. Dzyadevich, A.P. Soldatkin/ Issledovanie

stabil'nosti karakteristik pN-chuvstvitel'nyh polevyh tranzistorov // Optoelektronika i poluprovodnikovaya tekhnika, Kiev, Naukova dumka, 2010, 45, s. 90–99 (*in russian*).

[19]. A. S. Pavluchenko, A. L. Kukla, Yu. V. Goltvianskyi, O. O. Soldatkin, V. M. Arkhypova, S. V. Dzyadevych, A. P. Soldatkin. Investigation of stability of the pH-sensitive field-effect transistor characteristics // *Sensor Letters*, 2011, 9(6), pp. 2392–2396.

[20]. S. Lozovoy, A. Kukla, A. Pavluchenko. Investigation of Metrological Performance of the ISFET-Based pH Sensors // *Sensors and Transducers Journal*, 2014, 27, pp. 225–232.

[21]. A. L. Kukla, S. V. Lozovoj, A. S. Pavlyuchenko, S. N. Nagibin. Issledovanie metrologicheskikh parametrov datchikov na osnove rN-chuvstvitel'nyh polevyh tranzistorov // *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2013, № 2–3, s. 61–68 (*in russian*).

[22]. S. V. Lozovyi, O. L. Kukla, O. S. Pavlyuchenko, Yu. V. Holtvianskyi, M. M. Pryshchepa. Rozrakhunok elektrofizychnykh parametriv ionoselektivnykh polovykh tranzistoriv: teoretychni ta praktychni aspekty // *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.*, 2013, Vol. 10, No. 2, p. 50–61 (*in Ukrainian*).

[23]. O. O. Soldatkin, O. A. Nazarenko, O. S. Pavlyuchenko, O. L. Kukla, V. M. Arkhipova, S. V. Dzyadevych, O. P. Soldatkin, H. V. Yelska. Optymizatsiia roboty fermentnykh bioselektivnykh elementiv yak skladovykh potentsiometrychnoho multybiosensora // *Biopolimery i klityna*, 2008, Vol. 24, No. 1, s. 41–50 (*in Ukrainian*).

[24]. A. L. Kukla, A. S. Pavlyuchenko, Yu. V. Goltvyanskij, YU. M. Shirshov. Mnogoelementnye sensornye massivy na osnove integral'nyh kremnievyh ionoselektivnykh polevyh tranzistorov dlya sistem himicheskogo monitoringa // *Optoelektronika i poluprovodnikovaya tekhnika*, Kiev, Naukova dumka, 2007, 42, s. 72–79 (*in russian*).

[25]. B. H. Yun. Measurements of charge propagation in Si_3N_4 films // *Applied Physics Letters*, 1974, 25, Iss. 6, pp. 340–342.

[26]. B. H. Yun. Electron and hole transport in CVD Si_3N_4 films // *Applied Physics Letters*, 1975, 27, Iss. 4, pp. 256–258.

[27]. P. C. Arnett, Z. A. Weinberg. A review of recent experiments pertaining to hole transport in Si_3N_4 // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1978, ED-25, pp. 1014–1018.

[28]. S. M. J. Sze. Current Transport and Maximum Dielectric Strength of Silicon Nitride Films // *Appl. Phys*, 1967, 38, No. 7, pp. 2951–2956.

[29]. P. C. Arnett, B. H. Yun. Silicon nitride trap properties as revealed by charge-centroid measurements on MNOS devices // *Applied Physics Letters*, 1975, 26, Iss. 3, pp. 94–96.

[30]. C. M. Svensson. The conduction mechanism in silicon nitride films // *Journal of Applied Physics*, 1977, 48, Iss. 1, pp. 329–335.

[31]. V. M. Maslovskij, A. P. Nagin, Yu. R. Chernyshev. Mikroelektronika // 1985, Vol. 14, No. 3, s. 239 (*in russian*).

[32]. Ya. I. Frenkel'. K teorii elektricheskogo proboya v dielektrikah i elektronnykh poluprovodnikah // *ZHETF*, 1938, Vol. 8, No. 12, s. 1292–1301 (*in russian*).

[33]. Yu. N. Morokov. Modelirovaniye perenosy zaryada v nitride kremniya // *Trudy Mezhdunarodnoy konferencii RDAMM*, 2001, Vol. 6, ch. 2, s. 450–457 (*in russian*).

[34]. Yu. N. Novikov. Effekt Pula-Frenkelya s uchetom mnogofononnoy ionizatsii glubokih centrov v amorfnoy nitride kremniya // *Fizika tverdogo tela*, 2005, Vol. 47, vyp. 12, s. 2142–2145 (*in russian*).

[35]. V. N. Abakumov, V. Karpus., V. I. Perel', I. N. Yasievich // *FTP*, 1988, Vol. 22, No. 2, s. 262 (*in russian*).

[36]. L. K. Meixner, S. Koch. Simulation of ISFET operation based on the site-binding model // *Sensors and Actuators, B*, 1992, 6, No. 1–3, pp. 315–318.

[37]. R. E. G. van Hal, J. C. T. Eijkel, P. Bergveld. A novel description of ISFET sensitivity with the buffer capacity and double-layer capacitance as key parameters // *Sensors and Actuators, B*, 1995, 24–25, pp. 201–205.

Стаття надійшла до редакції 11.07.2023 р.

UDC621.315.592

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.3.288163>

PHYSICAL MODEL OF TEMPORARY CURRENT INSTABILITY IN ION-SELECTIVE FIELD-EFFECT TRANSISTORS WITH SILICON OXIDE/NITRIDE DIELECTRIC LAYERS

O. L. Kukla¹, A. S. Pavluchenko¹, S. V. Dzyadevych², V. M. Arkhypova², Nicole Jaffrezic-Renault³

¹V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine
45 Prospekt Nauky, Kyiv, 03028, Ukraine, alex.le.kukla@gmail.com

²Institute of Molecular Biology and Genetics, NAS of Ukraine
150 Zabolotnogo Street, Kyiv, 03143, Ukraine, dzyad@yahoo.com

³Institut des Sciences Analytiques, Université Claude Bernard Lyon 1, 5 Rue de La Doua, F69100
Villeurbanne FRANCE

Summary

The work is devoted to the study of the factors that determine the stability of the system “silicon – silicon oxide – silicon nitride – solution with a fixed pH” under the influence of relatively weak electric fields, typical for the operating modes of sensor transducers based on ion-selective field-effect transistors (ISFET), which are widely used as primary sensors in analytical sensor devices for the needs of biotechnology, ecology, medicine.

One of the main disadvantages of ISFETs is the instability of electrical characteristics (threshold voltage), which directly affects the sensitivity of the determination of biochemical substances in the investigated solutions. The analysis of experimental studies of the charge stability of the double-layer gate dielectric $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ of silicon ISFETs together with the involvement of theoretical calculations of the hole transport process showed that the observed instability is caused by the process of accumulation of an unbalanced positive charge in the near-surface layer of silicon nitride. A physical model is proposed, according to which, under the long-term action of an applied electric field, the localized charge of holes in silicon nitride gradually moves to the outer surface and is captured by hole traps near the nitride/electrolyte interface. At the same time, a positive charge layer accumulates in the near-surface layer of the nitride, which reduces the field in the semiconductor and causes a corresponding decrease in the current in the transistor channel (that is, drift). Since the mobility of the localized charge along the traps is very small and depends on the trap energy, this process is delayed in time: the fast phase corresponding to the transport along shallow traps with energies up to 0.3–0.5 eV is a few minutes, and the slow phase corresponding to the transport along the deep traps with energies of 1.5–2 eV, lasts up to several hours. For the quantitative calculation of model parameters at fields up to 10^5 V/cm, the Poole–Frenkel superbarrier ionization mechanism is involved, which describes the transport of carriers through shallow silicon nitride traps, and at fields higher than 10^5 V/cm – the mechanism of multiphonon ionization of deep centers.

It was established that the process described above is reversible, however, the distortions introduced by it may be undesirable during long continuous measurements. In this regard, during the creation of ISFET elements and the appropriate control equipment, it is proposed to use device operating modes in which the minimum possible voltage would be applied to the gate of the transistor. From this point of view, transistors with a built-in channel are preferable.

Keywords: Ion-selective field-effect transistor, pH-sensitive electrode, threshold voltage, drift, silicon nitride, Coulomb traps, hole charge transfer

УДК 621.315.592

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.3.288163>

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ТИМЧАСОВОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ СТРУМУ В ІОН-СЕЛЕКТИВНИХ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРАХ З ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ ШАРАМИ ОКСИДУ/НІТРИДУ КРЕМНІЮ

О. Л. Кукла¹, А. С. Павлюченко¹, С. В. Дзядевич², В. М. Архипова², Ніколь Жаффрезік-Рено³

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
просп. Науки, 41, Київ, 03028, Україна, alex.le.kukla@gmail.com

²Інститут молекулярної біології і генетики НАН України
вул. Заболотного, 150, Київ, 03680, Україна, dzyad@yahoo.com

³Інститут аналітичних наук, Університет Клода-Бернара Ліон 1,
вул. Дуа, 5 Віллербан, Франція

Реферат

Робота присвячена дослідженню факторів, що визначають стабільність системи “кремній – оксид кремнію – нітрид кремнію – розчин з фіксованим рН” при впливі відносно слабких електричних полів, характерних для робочих режимів сенсорних перетворювачів на основі іон-селективних польових транзисторів (ІСПТ), які широко використовуються як первинні датчики в аналітичних сенсорних приладах для потреб біотехнології, екології, медицини.

Одним з головних недоліків ІСПТ є нестабільність електричних характеристик (порогової напруги), що безпосередньо впливає на чутливість визначення біохімічних речовин в досліджуваних розчинах. Аналіз експериментальних досліджень зарядової стабільності двошарового затворного діелектрика $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ кремнієвих ІСПТ разом з притягненням теоретичних розрахунків процесу діркового транспорту показав, що спостережувана нестабільність викликана процесом накопичення нерівноважного позитивного заряду в приповерхневому шарі нітриду кремнію. Запропоновано фізичну модель, згідно якої за тривалої дії прикладеного електричного поля локалізований заряд дірок в нітриді кремнію поступово зміщується до зовнішньої поверхні та захоплюється на діркові пастки в близькості до межі розділу нітрид/електроліт. При цьому в приповерхневому шарі нітриду накопичується позитивний зарядовий шар, який зменшує поле в напівпровіднику й викликає відповідне зменшення струму в каналі транзистору (тобто дрейф). Оскільки рухливість локалізованого заряду по пастках дуже мала й залежить від енергії пастки, цей процес затягнутий в часі: швидка фаза, що відповідає транспорту по дрібних пастках з енергіями до 0.3–0.5 еВ, складає одиниці хвилин, а повільна фаза, що відповідає переносу по пастках з енергіями 1.5–2 еВ, триває до кількох годин. Для кількісного розрахунку параметрів моделі при полях до 10^5 В/см залучено механізм надбар’єрної іонізації Пула–Френкеля, який описує перенос носіїв по дрібних пастках нітриду кремнію, а при полях більше 10^5 В/см – механізм багатофононної іонізації глибоких центрів.

Встановлено, що описуваний вище процес має оборотний характер, проте спотворення, що вносяться ним, можуть бути небажаними при проведенні тривалих безперервних вимірювань. В зв’язку з цим запропоновано при створенні ІСПТ елементів й розробленні відповідної апаратури контролю використовувати режими роботи пристроїв, при яких до затвору транзистора прикладалася б мінімально можлива напруга. З цієї точки зору переважними є транзистори з вбудованим каналом.

Ключові слова: Іон-селективний польовий транзистор, рН-чутливий електрод, порогова напруга, дрейф, нітрид кремнію, кулонівські пастки, дірковий перенос заряду