ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 12, № 4 (2011) С. 1085-1091

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 12, № 4 (2011) P. 1085-1091

УДК 621.3.049

ISSN 1729-4428

І.Т. Когут

Моделювання розподілу електричних полів і порогових напруг в локальних тривимірних КНІ - структурах

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, кафедра радіофізики і електроніки.
Вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна, micro@il.if.ua

Наведено результати моделювання оригінальних методів формування тривимірних(ЗВ) інтегральних елементів зі структурою «кремній-на-ізоляторі» (КНІ), які за сумісними технологіями виготовлення одночасно можуть бути комбіновані з одно- і/або дворівневими мікропорожнинами під поверхнею кремнієвою пластини. Такі елементи відкривають додаткові можливості для створення нової елементної бази інтегральних схем (ІС), мікросистем та мікролабораторій-на-кристалі. Шляхом моделювання досліджено розподіл електричних полів і напруженостей в приладних ЗВ КНІ- структурах.

Ключові слова: кремній-на-ізоляторі, мікросистеми-на-кристалі, приладно-технологічне моделювання, порогова напруга, тривимірні елементи.

Стаття поступила до редакції 22.04.2011; прийнята до друку 15.09.2011.

Вступ

Структури «кремній-на-ізоляторі» відкривають перспективні можливості для створення нових приладних елементів з покращеними параметрами стійкості до зовнішніх впливаючих факторів, швидкодії, ступеня інтеграції. Проте на даний час, відомі КНІ - технології є дорогими, що стримує їх широке впровадження [1]. Дослідження і розробка нових і недорогих технологічних методів формування локальних нестандартних КНІ-структур, зокрема, тривимірних, для створення елементної бази мікроелектромеханічних пристроїв (МЕМС), мікросистем і мікролабораторій-на-кристалі є актуальними [2]. Тому, у зв'язку з підвищеним інтересом і перспективою застосування ЗВ приладних КНІ-структур для створення елементної бази інтегральних схем (ІС) та мікросистем-на-кристалі актуальними є також підходи щодо математичного аналізу та моделювання конструктивно-технологічних параметрів КНІ-структур, сформованих за новими методами. Не менш важливим є отримання даних про електрофізичні характеристики приладних КНІ МОН-структур, зокрема, порогові напруги та розподіл потенціалів і напруженостей електричного поля в підканальній області КНІ МОН-транзистора та їх вплив на формування провідного(інверсного) каналу з різними профілями ЗВ затворів, які можна отримати моделюванням на стадії перед реальним виготовленням тестових елементів.

I. Моделювання технології формування локальних ЗВ КНІ МОН-структур

Формування локальних ЗВ КНІ МОН-транзисторних структур було здійснено розробленим методом [3 - 5] з використанням процесів сучасних промислових КМОН-технологій виготовлення ІС, а саме: термічного окислення, осадження плівок Si3N4, ізотропного і анізотропного плазмохімічного травлень та інших, безпосередньо із матеріалу вихідної пластини, що забезпечує їх високу кристалічну досконалість. На основі отриманих ЗВ КНІ-структур, було розроблено відмінні від традиційної, форми ЗВ КНІ МОН-транзисторів. Окрім цього, запропонованим методом можна формувати локальні ЗВ КНІ-структури, а саме ділянки кристалічного кремнію ізольовані від пластини окислом кремнію сформованим на заданій глибині під поверхнею пластини в порожнинах [6 - 7] і створювати на цій основі інтегральні пристрої для ІС та мікросистем-на-кристалі, зокрема, ЗВ КНІ МОН-транзистори (рис. 1), для яких промодельовано розподіл порогових напруг по ширині каналу транзистора.

Суттєвими перевагами даної технології є також і те, що в процесі формування КНІ-структур, фактично можлива і одночасна ізоляція як між локальними КНІ-острівцями, так і між приладними структурами після їх заповнення окислом кремнію, або

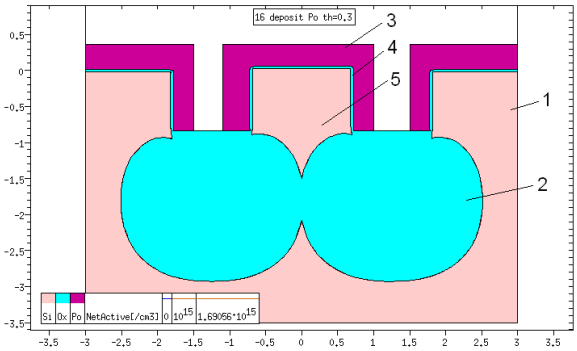


Рис. 1. Локальна ЗВ КНІ МОН–структура: 1 – кремнієва пластина КДБ-40 (100), 2 – області SiO_2, 3 – полікремнієвий затвор, 4 – підзатворний діелектрик, 5 – локальна ЗВ КНІ-структура, в якій утворюється канальна область транзистора.

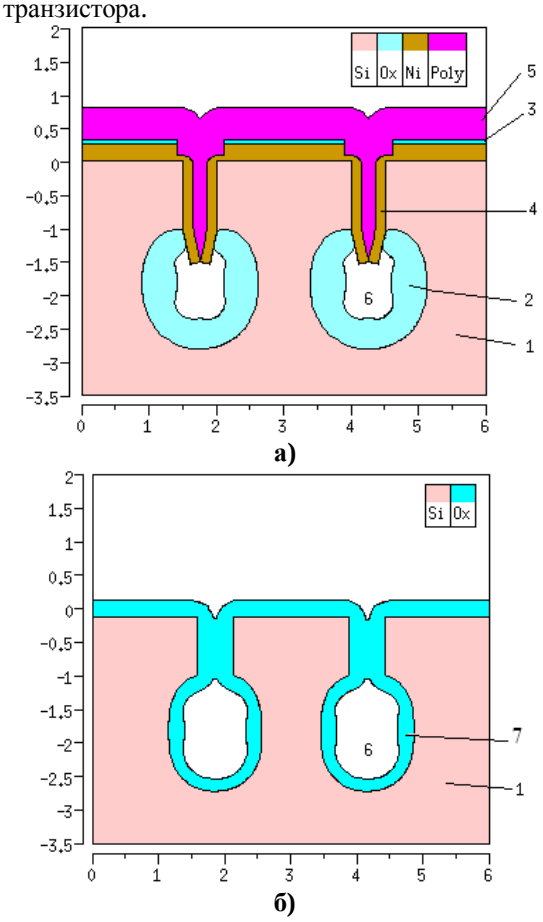


Рис. 2. КНІ-структури, конструктивно суміщені (комбіновані) з герметизованими однорівневими мікропорожнинами: 1 – кремнієва пластина КДБ-40 (100); 2 – локально вирощений термічний SiO_2 на поверхні порожнини; 3 – осаджений піролітичний SiO_2 на поверхню кремнієвої пластини і щілини; 4 – плівка Si_3N_4 після повторного осадження сумарною товщиною 0,25 мкм на поверхні пластини і 0,15 мкм на вертикальних стінках щілин; 5 – осаджений шар полікремнію на поверхню кремнієвої пластини і щілини; 6 – герметизована порожнина (або мікроканал); 7 – термічний SiO_2 на поверхнях щілин і порожнин.

комбінацією матеріалів – окисел кремнію-полікремній, що дозволить реалізацію високотехнологічної і надійної міжприладної ізоляції. Такий підхід дасть змогу суттєво зменшити топологічні розміри і відповідно підвищити ступінь інтеграції елементів на кристалі, а також будуть створені умови і конструкційний КНІ-матеріал для високовольтних елементів ІС та мікросистем на кристалі.

На рис. 2. зображено фінішні операції результатів моделювання розробленого методу формування комбінованих КНІ-структур, конструктивно суміщених з однорівневими герметизованими мікропорожнинами [8-9] під поверхнею кремнієвої пластини з використанням Si3N4 п'єдесталів для осаджуваних плівок (а), і на основі окислення поверхні порожнин і вертикальних стінок щілин до змикання окислів між протилежними стінками (б). На таких, комбінованих КНІ-структурах можна формувати приладні елементи як на локальному КНІ-острівці (поз. 9), і одночасно використовувати порожнини, наприклад, для сенсорних застосувань. В цих структурах зміною топологічного розміру А (див. рис. 2а, б) можна отримувати повністю, або частково ізольовані від підкладки локальні КНІ-острівці та формувати на їх основі КНІ МОН-транзистори, а також елементи сенсорів як з ЗВ, так і з планарними архітектурами. А герметизовані мікропорожнини відкривають додаткові можливості створення на їх основі елементів інтегральних резонаторів, оптоелектроніки, мікролабораторій-на-кристалі та інших.

За сумісною з технологією формування однорівневих КНІ-структур, розроблено і промодельовано технологічну послідовність формування комбінованих дворівневих КНІ-структур, конструктивно об'єднаних із дворівневими герметизованими мікро- порожнинами [9]. Фінішні результати їх моделювання зображено на рис. 3, а - г.

Як зрозуміло із результатів моделювання, запропонованими методами можна формувати комбіновані КНІ- структури, суміщені з дворівневими мікропорожнинами, які розташовані безпосередньо одна над одною, при цьому одночасно з порожнинами утворені елементи: «кремній-на-ізоляторі» (рис. 3, поз. 2), і «кремній-в-ізоляторі» (рис. 3, а, поз. 3). На рис. 3,б зображено приклад структури герметизованих мікропорожнин, розташованих на двох рівнях, одна поза одною. Фінішна герметизація досягнута осадженням піролітичного SiO2 на п'єдестали, утворені зімкнутими «пелюстками» плівки Si_3N_4. Їх зімкнення досягається унаслідок підйому в процесі термічного окислення поверхонь порожнин. На рис. 3, в і г зображено способи керування розмірами КНІ-структури (поз. 2.). Це здійснено - зменшенням глибини утворення порожнини (поз. 5, рис. 4, в); одночасним зменшенням глибини порожнини 2-го рівня (поз. 5) і зміни вихідної топології розташування порожнин (див. рис. 3,г).

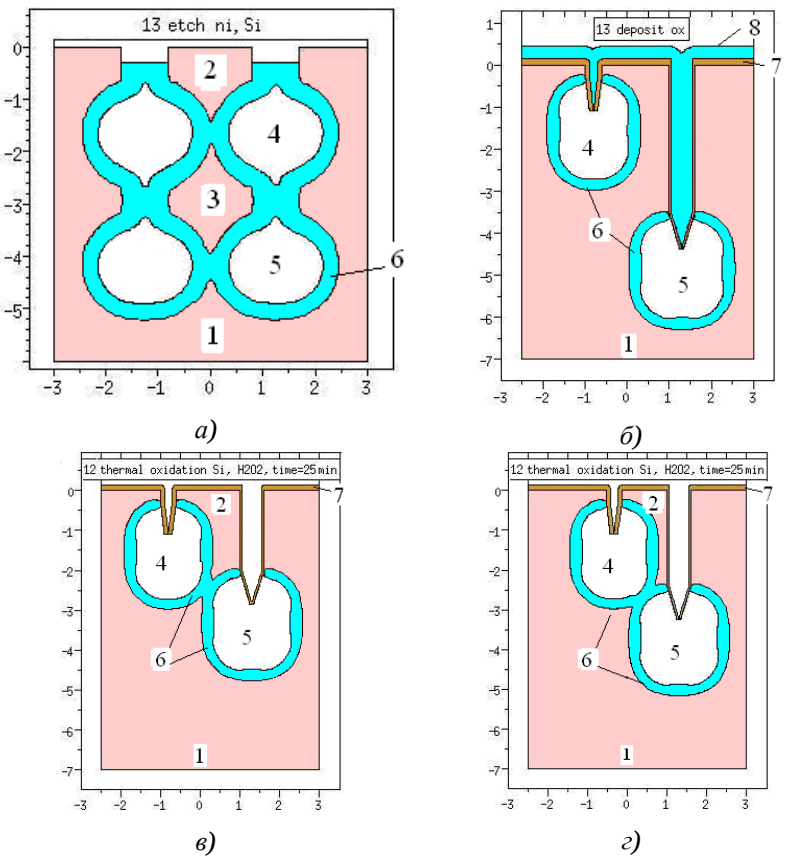


Рис. 3. КНІ-структури, конструктивно суміщені (комбіновані) з дворівневими мікропорожнинами: 1 – кремнієва пластина КДБ-40 (100); 2 – структура «кремній-на-ізоляторі» 1-го рівня; 3 – структура «кремній-в-ізоляторі» 2-го рівня; 4, 5 – герметизовані мікропорожнини 1-го і 2-го рівнів відповідно; 6 – локально вирощений термічний SiO_2 на поверхнях порожнин; 7 – плівка Si_3N_4; 8 – піролітичний SiO_2.

II. Моделювання порогових напруг і розподілу потенціалів електричного поля в тривимірній КНІ МОН-структурі

При моделювання порогових напруг КНІ МОН-транзисторів з ЗВ конфігурацією затвора їх можна представити як паралельне з'єднання окремих елементарних транзисторів, утворених на горизонтальній та вертикальних стінках і кутових сегментах тіла транзистора з ЗВ конфігурацією. Схематично структуру та еквівалентну електричну схему такого транзистора зображено на рис. 4. У цій структурі паралельне з'єднання два бокових транзисторів на вертикальних стінках, на еквівалентній схемі зображено як Vt3, матимуть рівні порогові напруги, оскільки їх геометричні і електрофізичні параметри є симетричними. Аналогічно можна припустити, що параметри кутових транзисторів також будуть симетричними з пороговою напругою Vt2. Виходячи з того, що кристалографічні площини в тілі транзистора орієнтовані спеціальним чином, можна припустити, що транзистор Vt1, тобто транзистор, що розміщений на горизонтальній частині ЗВ КНІ-структури, що має кристалографічну орієнтацію поверхні (100) буде відкриватися першим при поданні напруги на спільний затвор, а отже його порогову напругу можна вважати найменшою, тобто:

$$VT1 < VT2 \text{ і } VT1 < VT3$$

Для схемотехнічного моделювання ЗВ КНІ МОН-транзисторів проаналізовано і адаптовано їх моделі до моделей об'ємних аналогів, в тому числі і для високовольтних застосувань. У запропонованому ЗВ КНІ МОН-транзисторі для розрахунку порогових напруг можна використовувати модель і

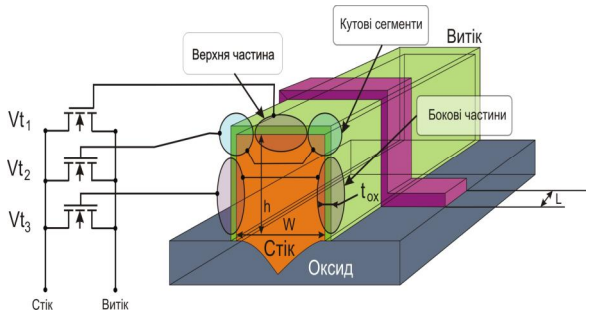


Рис. 4. Структура й еквівалентна електрична схема ЗВ КНІ МОН- транзистора для розрахунку стокових струмів і порогової напруги.

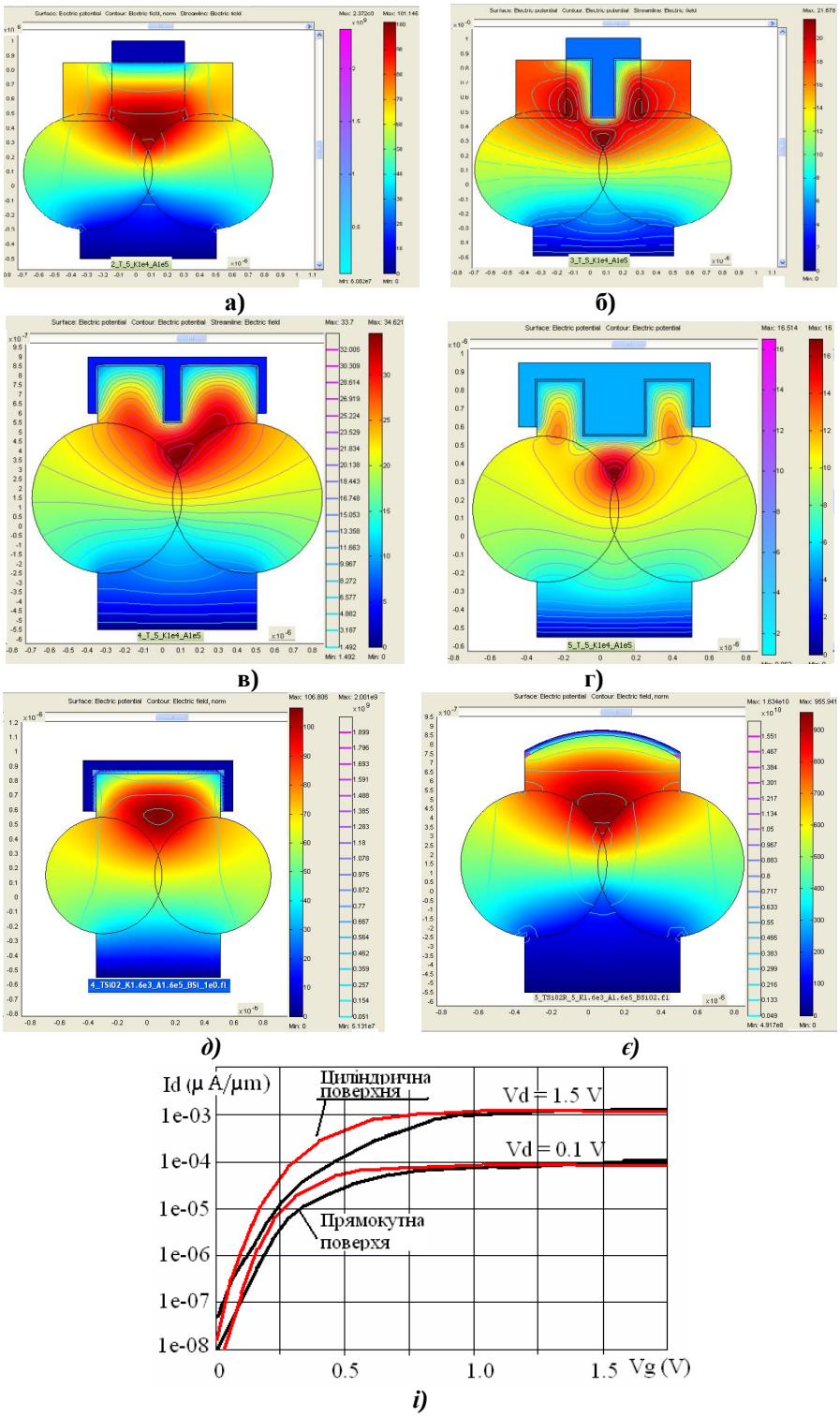


Рис. 5. Розподіл потенціалів і напруженостей електричного поля та зміна товщини (густини) провідного каналу в ЗВ КНІ МОН-структурі (при Nd = 10^{17}, Ug= + 5 В) для планарної *(а)*, Т – подібної *(б)*, Ш – подібної (несиметричної, або з імітацією впливу технологічного розсуміщення) *(в)*, Ш – подібної (симетричної з розширеною середньою частиною) *(г)*, П – подібної *(д)* і циліндричної поверхонь затвора *(є)*, та їх передаточні характеристики *(і)*.

еквівалентну схему, що включає паралельне з'єднання 5-ти транзисторів зі спільними затвором і стік – витоковим областями, утворених на бокових гранях, кутових сегментах і вершині транзистора (див. рис. 4). Для такої моделі струм стоку можна розраховувати як суму струмів окремих транзисторів з різними пороговими напругами Vt1, Vt2, Vt3, а для розрахунку середнього значення порогової напруги проводити за виразом:

$$V_{Th} = \frac{1}{N}\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{Q_{TH}}{n_i(2\times t_{inv}\times w_2 + (w_1 - 2\times t_{inv})\times t_{inv})}\right) + \hat{O}_{MS} + \left(1+\frac{1}{N}\right)j_{0m}$$

де: q – заряд електрона; ε_{Si} – діелектрична проникність кремнію; n_i – концентрація вільних носіїв заряду в напівпровіднику; $V_{bi} = \frac{kT}{q}\ln(\frac{N_D}{n_i})$; ФMS – різниця робіт виходу електрона з металу затвору та напівпровідника.VGS – напруга на затворі; VDS – напруга на стоці; ND – концентрація донорів на стоці/витоці; φF – нерівноважні квазірівні Фермі, що задовільняють наступним краєвим умовам: $f(x,y,0) = V_{bi}$; $f(x,y,L) = V_{bi} + V_{DS}$; t_{inv} – товщина інверсного шару в каналі.

Моделюванням було досліджено також вплив напруги на затворі, профілів форм поверхні і концентрації носіїв в канальній області для 3В КНІ МОН - транзисторів, сформованих на основі локальних 3В КНІ- структур на розподіл потенціалів, напруженостей електричного поля і формування інверсного провідного каналу [6, 7].

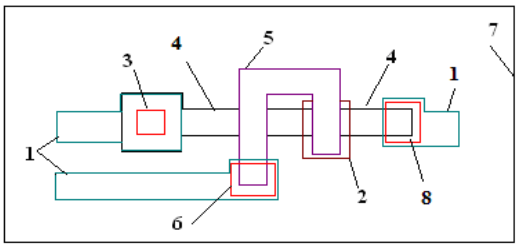
Результати моделювання показують, що для 3В КНІ МОН-структур з планарним, Т, Ш і П- подібним профілями затворів густина струму і товщина інверсного (провідного) каналу по ширині є нерівномірні (рис. 5,а - д). Найбільша густина струму спостерігається на кутових сегментах, менша - на вертикальних стінках і найменша на горизонтальній поверхні канальної області, а зі збільшенням радіуса заокруглення кутового сегмента густина струму зменшується. На основі цих результатів було запропоновано конструкцію 3В КНІ МОН-транзистора з циліндричним профілем поверхні затвора, в якому товщина інверсного провідного каналу і густина носіїв заряду в каналі найбільш рівномірні [10]. Такі транзистори, порівняно з відомими, матимуть найкращі ключові і шумові характеристики внаслідок рівномірного розподілу порогової напруги по ширині каналу (див. рис. 5,є, і).

Щодо передаточних характеристик, промодельваних при різних фіксованих значеннях напруг на затворі для 3В транзисторних КНІ МОН-структур з різними конфігураціями затворів, то вони дещо відрізняються (див. рис. 5,і). Наприклад, для 3В КНІ МОН-транзистора з прямокутною П-подібною конфігурацією затвора передаточні характеристики є пологішими порівняно з тривимірним, що має циліндричну конфігурацію затвора. Отже 3 В КНІ МОН-структури з циліндричною формою затвора матимуть менші часи затримки передачі сигналів та кращі ключові параметри порівняно із прямокутними формами 3В затворів.

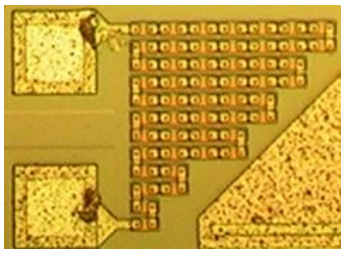
III. Моделювання тривимірних контактів і міжз'єднань

З переходом до суб- і нанометрових топологічних розмірів елементів гострою є проблема створення низькоомних інтегральних омічних контактів і міжз'єднань. Окрім цього, ця проблема стає ще актуальнішою, зокрема, з переходом до 3В конфігурацій КНІ МОН транзисторних структур. І в цьому випадку, поєднання 3В транзисторних елементів з планарними контактними неефективне, як з погляду характеристик контактів, так і займаної площі.

Тому, для вирішення цієї задачі було розроблено і досліджено за аналогією з 3В КНІ- транзисторами, 3В контакти і міжз'єднання. Запропоновані контакти можуть бути з успіхом використані при створенні 3В КНІ- транзисторних структур, чутливих елементів мікросистем, міжз'єднань між шарами металізацій тощо. Додатковими технологічними умовами формування 3В контактів є наявність селективно



а)



б)

Рис. 6. Приклад топології 3В КНІ МОН-транзистора з різними типами контактів *(а)* і мікрофотографія фрагмента послідовно-з'єднаних тестових контактів *(б)*: 1 – шини металізації; 2 – захований контакт через вікно у підзатворному окислі; 3, 6 і 8 – контактні вікна в ізоляційному (міжшаровому) окислі; 4 – області стоку і витоку в КНІ МОН-транзисторі; 5 – затвор транзистора; 7 – поверхня окислу кремнію у структурі КНІ.

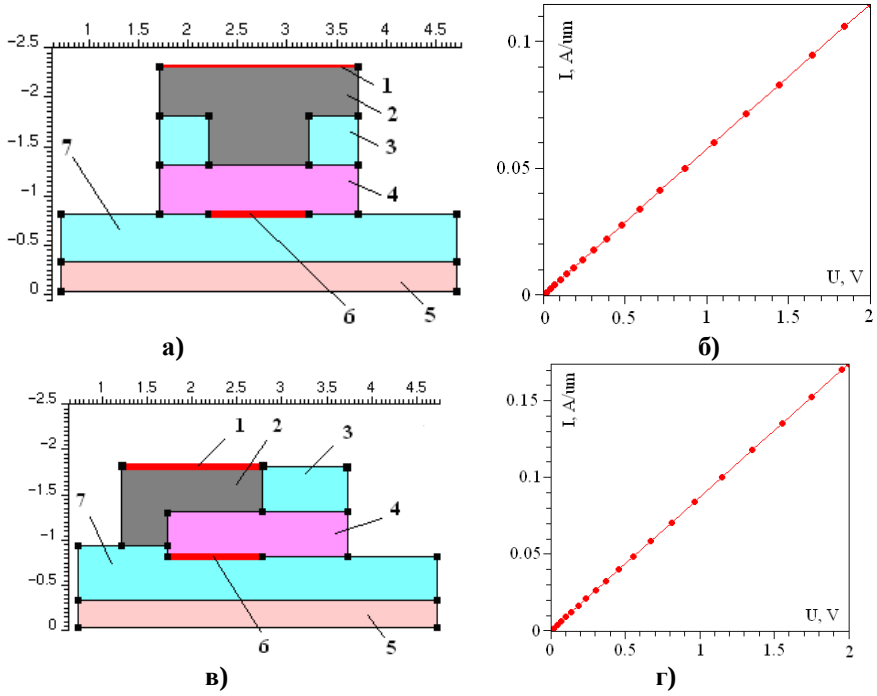


Рис. 7. Електрофізичні структури і результати моделювання ВАХ планарного *(а), (б)* і ЗВ контактів *(в), (г)* зі структурою КНІ: 1 – електрофізичний контакт (анод), 2 – метал, 3 – SiO_2, 4 – полікремній, 5 – кремнієва пластина, 6 – електрофізичний контакт (катод), 7 – плівка SiO_2.

стійкої плівки, на яку нанесено шар матеріалу до якого створюють контакт по відношенню до шару ізоляційної плівки, нанесеної на цей матеріал при витравленні в ній контактних вікон. Або іншим шляхом вирішення цієї задачі є чітко визначений час травлення для заданої товщини ізоляційного діелектрика, що не пошкоджує підшар ізоляції під шаром контактованого матеріалу.

На основі отриманих локальних ЗВ КНІ-структур, були розроблені ЗВ контактні елементи і проведено порівняльні дослідження з їх планарними аналогами на основі приладно-технологічного моделювання та експериментальних досліджень тестових структур [4]. Фрагмент топології інтегрального елемента з планарними і ЗВ контактами різних типів і фрагмент послідовно-з'єднаних тестових контактів зображено відповідно на рис. 6,а, б.

Згідно із рис. 6,а елементи 1, 3, 4 утворюють планарний контакт металізації зі стоком КНІ МОН-транзистора, а елементи 1, 8, 4 утворюють ЗВ контакт металізації до витоку цього транзистора, поперечний перетин електрофізичної структури яких зображено на рис.7. Елементи 1, 6, 5 утворюють ЗВ контакт між металізацією і затворним полікремнієм, а елементи 5, 2 і 4 – ЗВ контакт між шаром затворного полікремнію і витоком КНІ МОН-транзистора.

Порівняльні ВАХ планарного та ЗВ контактів з однаковими планарними розмірами контактів та концентраціями легуючої домішки зображені відповідно на рис. 7,б і г. Як видно з наведених ВАХ, електропровідність ЗВ контакту в 1,5 разу є кращою порівняно з планарним для площі контакту 1х1мкм2 і товщині кремнієвої плівки в КНІ- структурі 0,5 мкм. При однаковій електропровідності порівняно з планарними контактами, ЗВ контакти займають в середньому на 25 - 30% меншу площу на кристалі. Окрім моделювання, параметри розроблених контактів вимірювались також за допомогою тестових елементів (мікрофотографія - рис. 6,б). Результати моделювання та експериментальних досліджень показують, що електропровідність ЗВ контактів Al-Si металізації, а також затворного полікремнію до КНІ- плівки у середньому в 1,5 разу є кращою порівняно з планарними при однакових топологічних розмірах.

Аналогічно до ЗВ КНІ МОН-транзисторних структур, було досліджено вплив напруги на контактних електродах, профілів форм поверхні і концентрації носіїв заряду в ЗВ КНІ- структурах і канальній області для контактно - діодних елементів. Зокрема, шляхом моделювання, досліджувались ЗВ КНІ- контакти різних форм і профілів, а саме, планарні та з П, Т і Ш - подібними профілями для створення контактів до стік - витокових і затворних областей КНІ МОН-транзисторів. Для цих типів контактів проведено моделювання розподілу потенціалів електричного поля і градієнтів напруженості залежно від концентрацій електрично-активної домішки в контактній області і підкладці та потенціалів [11]. На основі отриманих результатів встановлено, що ці розподіли є повністю ідентичними для ідентичних форм поверхонь в

контактно-діодних і КНІ МОН-структурах, що дає змогу вибору оптимальних комбінацій типів профілів 3В контактних і КНІ МОН-елементів.

Отримані параметри розроблених планарних і 3В контактних структур дозволяють їх використання для проектування елементної бази мікросистем на КНІ МОН-транзисторних структурах. А саме, для одинарних і потужних матричних КНІ-транзисторів як з планарною поверхнею, так і 3В конструкцій КНІ МОН-транзисторів різних типів. Розроблені 3В контакти з Al-Si металізації, а також приховані контакти із затворного полікремнію до стік - витокових областей КНІ МОН-транзисторів через вікна у підзатворному окислі. При однакових топологічних планарних розмірах, 3В контакти мають в в середньому 1,5 раза кращу електропровідність.

Висновки

Проведено приладно-технологічне моделювання розроблених локальних тривимірних комбінованих КНІ- структур, які за сумісними технологіями формування можуть бути поєднані з одно- або дворівневими мікропорожнинами під поверхнею кремнієвою пластини. Проаналізовано електрофізичні параметри, зокрема порогові напруги та розподіли електричних полів в тривимірних КНІ контактних і МОН-транзисторних інтегральних елементах. Показано, що ці розподіли є ідентичними для ідентичних профілів тривимірних контактів і КНІ МОН-транзисторних елементів, що дозволяє вибір їх оптимальних комбінацій під час проектування. Запропоновані типи приладних КНІ - структур можуть бути використані для створення нової елементної бази ІС, інтегрованих мікросистем та мікролабораторій-на-кристалі.

Когут І. Т.– доктор технічних наук, доцент, професор кафедри радіофізики і електроніки**.**

[1] J.P. Colinge, Silicon-On-Insulator Technology: Materials to VLSI, Kluwer Academic Publishers, 1997.
[2] Ya-Li Tai, Jam Wen Lee, Chen-Hsin Lien. Local oxidation Fin-Field-Effect-Transistor Structure for Nanodevices Aplications // *JJAP* — Vol. **49**, 044301, pp. 1-5 (2010).
[3] A. O. Druzhynin, V.I. Holota, I.T. Kogut, S. V. Sapon, Yu. M. Khoverko "The Device-Technological Simulation of The Field-Emission Micro-Cathodes Based on Three-Dimensional SOI-Structures" // *Electrochemical Society Trans.* **14**(1), pp. 569-581 (2008).
[4] І.Т. Когут, А.О. Дружинін, В.І. Голота. Архітектура й елементи інтегрованої мікросистеми на базовому матричному кристалі з КНІ- структурою // *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 646, сс. 86-95 (2009).
[5] Патент на корисну модель №36463 UA. Метод виготовлення локальних тривимірних КНІ- структур. Когут І.Т., Голота В.І., Дружинін А.О. Опубл. 27.10.2008 , Бюл. №20 (2008).
[6] Патент на корисну модель №43198 UA. Метод формування герметизованих порожнин в кремнієвих пластинах. / Когут І.Т., Голота В.І. Опубл. 15.08.2008, Бюл. №15(2008).
[7] Патент на корисну модель №49691. Тривимірний МОН-транзистор зі структурою «кремній-на-ізоляторі» /Дружинін А.О., Когут І.Т., Голота В.І., Ховерко Ю.М. Опубл.11.05.2010, бюл. №9(2010).
[8] Патент на корисну модель №62085. Спосіб формування багаторівневих порожнин в кремнієвих пластинах /Когут І.Т., Голота В.І. Опубл. 10.08.2011, бюл. №15(2011).
[9] I.T. Kogut, A.A. Druzhinin, V.I. Holota, V.V. Dovhij "Simulation of non-standard mutilayer 3D SOI -Structures and Microcavities" – Conf. Proc. "EUROSOI-2011", Granada, Spain, 17-19.01.2011. PP.63-64.
[10] I.T. Kogut, A.A. Druzhinin, V.I. Golota "3D SOI elements for System-on-Chip Applications"/Advanced Materials Research, **276,** pp. 137-144. (Trans. Tech. Publications. Switzerland. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.276.137). (2011)

I.T. Kogut

Simulation of Electrical Fields and Threshold Voltages Distribution in Local 3D SOI Structures

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, radiophysics and electronics department,
57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018,Ukraine, micro@il.if.ua

In this paper the simulation results of the original methods fbrication of the local nonstandard 3D "silicon-on-insulator"(SOI)-structures with one- and two layers are demonsrated. These structures could be combined with one- and two levels of microcavities under surface of silicon wafer. Such structures are opening the new possibilities for development the elements base for creation as integrated cirquits (IC) as well as system-on-chip (SoC) and microlaboratories-on-chip (LoC). Using simulation results the electrical fields contributions into some 3D SOI device structures is provided.