

ЛОКАЛЬНІ КНІ-СТРУКТУРИ – ПЕРСПЕКТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДЛЯ ІНТЕГРОВАНІХ МІКРОСИСТЕМ-НА-КРИСТАЛІ

І.Т.Когут

*Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника
76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57, тел. (0342) 71 48 48,
e-mail: micro@il.if.ua*

Розроблено оригінальний метод формування локальних тривимірних структур «кремній-на-ізоляторі» (КНІ), проведено прикладно-технологічне моделювання. На прикладі розроблених окремих інтегральних елементів і моделювання їх характеристик показано, що запропоновані КНІ-структури можуть бути перспективним матеріалом для проектування елементної бази як зі стандартними, планарними конструкціями, так і з об'ємними, тривимірними архітектурами та побудови на цій основі мікросистем-на-кристалі(МСК).

Ключові слова: *кремній-на-ізоляторі, мікросистема-на-кристалі, прикладно-технологічне моделювання, тривимірні елементи.*

Вступ. В останні роки надзвичайно інтенсивно розвивається новий напрямок - створення і використання інтегрованих МСК, на яких можуть бути реалізовані як різноманітні сенсорні, так і актюаторні елементи, схеми обробки інформації та керування [1]. Зараз відомі дві концепції розвитку мікросистем: система на одному кристалі і система на декількох кристалах з оптичними зв'язками між ними. В цих нових галузях досягнуті значні успіхи, проте базовим напрямком розвитку залишається інтеграція нових елементів з традиційними КМОН (комплементарними метал-окисел-напівпровідник) і біполярними транзисторними інтегральними схемами (ІС)[2]. Значний інтерес представляють МСК з монолітною інтеграцією різних типів елементів. Традиційна, планарна КМОН-технологія та її модифікації, дозволяють створювати КМОН та комбіновані біполярні Бі-КМОН транзисторні ІС обробки та управління, а на основі елементів Бі-КМОН структур можлива також реалізація сенсорних і актюаторних елементів. Проте, з точки зору підвищення інтеграції елементів, швидкодії, стійкості до зовнішніх впливаючих чинників, а також розширення можливостей конструювання за рахунок повної діелектричної ізоляції елементів як від підкладки, так і між собою, для створення приладних структур, зокрема з тривимірними архітектурами, більш перспективними видаються структури КНІ. Тому проведення комплексних досліджень зі створення нових технологій одержання вихідних КНІ-структур, створення на цій основі нової приладної елементної бази та її моделювання є актуальною проблемою.

Розробка і моделювання технології формування локальних КНІ-структур. Сучасні промислові методи виготовлення КНІ-пластин

(SIMOX, ELTran, Smart Cut, Unibond) передбачають формування суцільних КНІ- плівок на поверхні кремнієвої пластини, використовують унікальне технологічне обладнання, достатньо дороге, і вітчизняною промисловістю є неосвоєними. Суцільні, із заданою товщиною на всій поверхні кремнієвої пластини КНІ- плівки, як правило, призначені для створення на їх основі однотипних приладів, наприклад, КНІ КМОН-транзисторних структур. Названі технології є окремими складними технологіями формування КНІ- пластин як вихідного матеріалу для виготовлення інтегральних приладів [3]. Такі пластини є універсальними, не «прив'язаними» до конкретних топологій приладів, з точки зору фірми-виготовлювача; проте з точки зору розробника елементної бази МСК із різних типів приладів та їх монолітної інтеграції, більш перспективною була б наявність в межах одного кристалу КНІ- структур з різними товщинами КНІ-плівки, локальних тривимірних КНІ-структур, «прив'язаних» до конкретної топології, герметичних та негерметичних порожнин під поверхнею пластини, можливостей інтеграції як КНІ-технології, так і стандартної, на основі об'ємного кремнію і т. ін.

Аналіз реальних топологій свідчить, що для активних елементів приладних структур зазвичай використовується не більше 40% площі КНІ- плівки, а інша її частина стає ізоляційним матеріалом. Враховуючи також сучасні тенденції зменшення топологічних розмірів інтегральних приладних структур, видається доцільним дослідження зі створення технологій формування локальних КНІ- структур [4,5], які були б частиною стандартної промислової технології інтегральних схем (ІС) чи МСК, і передбачали розміщення КНІ- структур на пластині за заданою топологією. Виходячи з цих міркувань, розроблено оригінальний метод формування локальних КНІ- структур шляхом локального термічного окислення порожнин під поверхнею кремнієвої пластини.

Суть методу пояснюється рис.1. а)-л), на яких зображено результати приладно-технологічного комп'ютерного моделювання послідовності базових технологічних операцій створення локальних тривимірних КНІ-структур у вигляді поперечних перетинів, а на рис.1. м)-н) - результати моделювання технології формування тривимірної приладної КНІ МОН-транзисторної структури.

Технологічна послідовність базових операцій формування локальних тривимірних КНІ-структур запропонованим методом відповідно до рис. 1, а)-н) є наступною:

а) на кремнієву пластину 1 типу КДБ-40 з кристалографічною орієнтацією поверхні (100) осаджують шар Si_3N_4 або оксинітриду кремнію товщиною 0,1 мкм, на якій методом фотолітографії та плазмохімічного травлення (ПХТ) Si_3N_4 на всю його товщину до поверхні з пластиною утворюють вікна шириною 1 мкм і необхідної довжини, яка визначається топологічними розмірами приладних структур, наприклад, шириною каналу КНІ МОН- транзистора;

б) ізотропне ПХТ незамаскованих ділянок кремнієвої пластини 1 на глибину 1,5 мкм;

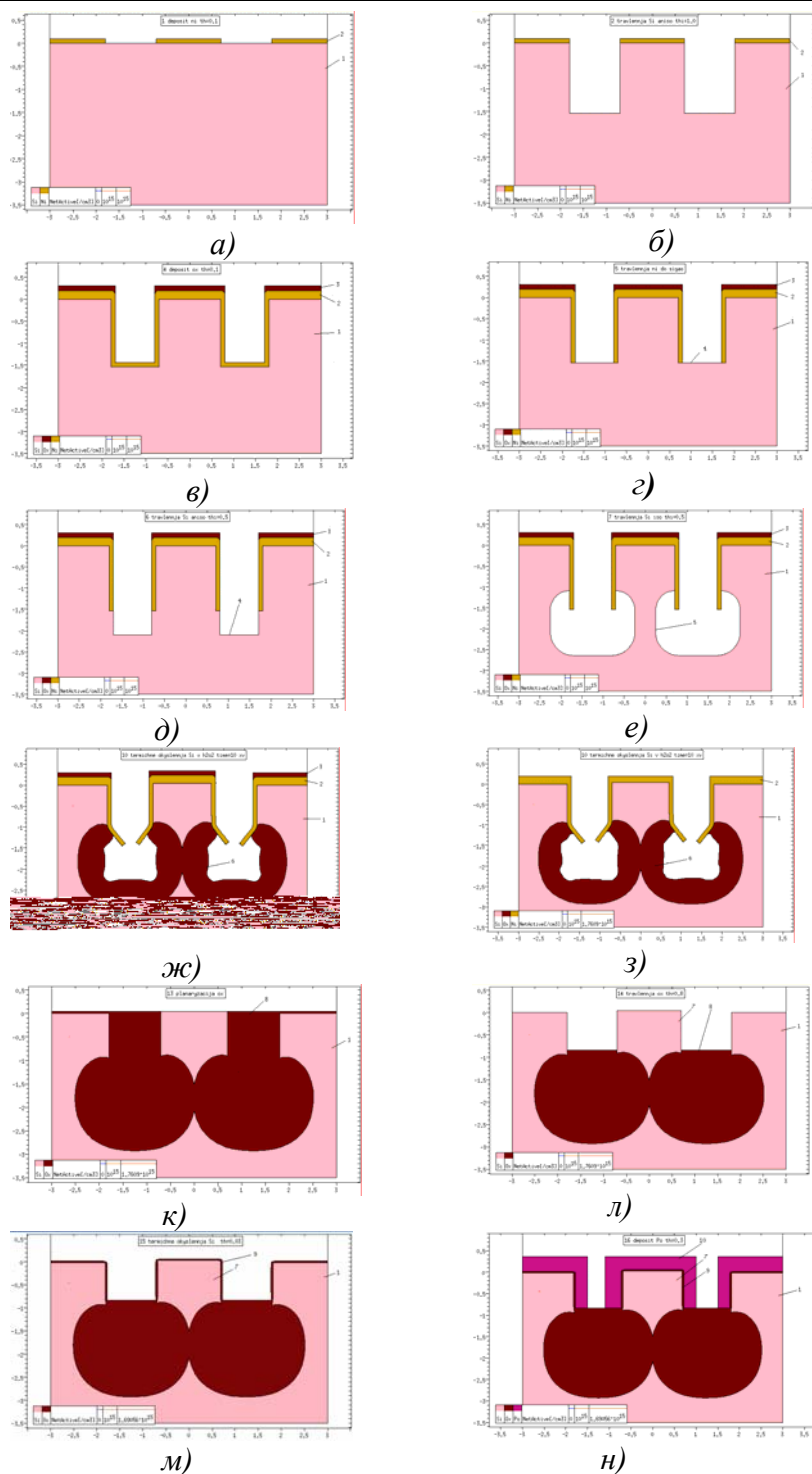


Рис.1. Базові технологічні операції формування локальних тривимірних КНІ- структур локальним термічним окисленням порожнин під поверхнею кремнієвої пластини: 1 - кремнієва пластинка; 2 - локальні ділянки плівки нітриду кремнію Si₃N₄; 3 - осаджений шар SiO₂; 4 - дно щілини в пластині; 5 - нижня частина незахищеної поверхні щілини після бокового плазмохімічного травлення кремнію; 6 - термічний SiO₂ поверхні порожнини; 7 - локальна тривимірна КНІ- структура; 8 - осаджений планаризаційний SiO₂; 9 - термічний підзатворний SiO₂; 10 - тривимірний полікремнієвий затвор МОН- транзистора. (На поперечних перетинах КНІ- структур подані горизонтальні і вертикальні шкали у мікрометрах для оцінки реальних топологічних розмірів елементів і їх товщин).

в) повторне осадження шару Si_3N_4 товщиною 0,02 мкм, осадження шару SiO_2 товщиною 0,1 мкм та формування фотолітографією і ПХТ маскуючих ділянок на горизонтальній поверхні кремнієвої пластини;

г) анізотропне плазмохімічне травлення Si_3N_4 на дні протравлених щілин в кремнієвій пластині;

д) анізотропне плазмохімічне травлення SiO_2 для збільшення висоти протравлених щілин в кремнієвій пластині на 0,5 мкм;

е) ізотропне травлення кремнію на глибину 0,5 мкм для створення об'ємних заглиблених порожнин під поверхнею кремнієвої пластини;

ж) термічне окислення кремнію впродовж 90 хв. для створення ізолюваних від пластини тривимірних локальних областей кристалічного кремнію;

з) травлення SiO_2 товщиною 0,1 мкм;

к) осадження піролітичного SiO_2 розкладом моносилану для заповнення порожнин та щілин і планаризації поверхні;

л) травлення піролітичного SiO_2 в щілинах на глибину 0,8 мкм з отриманням тривимірних локальних КНІ- структур, придатних для створення приладів, наприклад, КНІ МОН-транзисторів;

м) термічне окислення тривимірної поверхні локальної КНІ- структури для одержання підзатворного діелектрика КНІ МОН-транзистора з тривимірною поверхнею підзатворної області;

н) осадження шару полікремнію, його легування для зменшення поверхневого опору та фотолітографії для одержання КНІ МОН-транзистора з тривимірною конфігурацією затвора.

Отже, як видно із результатів приладно-технологічного моделювання, запропонованим методом можна формувати локальні тривимірні КНІ- структури, а саме ділянки кристалічного кремнію, ізолювані від пластини окислом кремнію, сформованим на заданій глибині під поверхнею пластини в порожнинах, і створювати на цій основі мікроелектронні пристрої. Наприклад, МОН-прилади як зі стандартними, планарними конструкціями на поверхні локальних ділянок КНІ- структур, так і з об'ємними, тривимірними архітектурами, наприклад, затвором, який може бути сформований як на поверхні, такі на бокових вертикальних стінках КНІ- структур. Окрім цього, локальні тривимірні КНІ- структури, формування яких є «прив'язаним» до топології мікроелектронних пристроїв, завдяки повній діелектричній ізоляції елементів, а також додатковим можливостям використання порожнин в приладній поверхні пластини, можуть успішно застосовуватися як вихідний матеріал для проектування мікросенсорів, елементів мікросистемної техніки, створення інтегрованих МСК, монолітної інтеграції як КНІ-приладів, так і стандартних, об'ємних на ділянках кристалу, вільних від КНІ-структур.

Розробка і моделювання елементів приладних КНІ-структур. На основі отриманих КНІ- структур, були розроблені деякі інтегральні елементи та досліджувались їх параметри та характеристики шляхом моделювання [6]. Так, на рис.2. зображено схематичну топологію КНІ МОН-

транзистора з тривимірною конфігурацією затвора, планарними і тривимірними контактами.

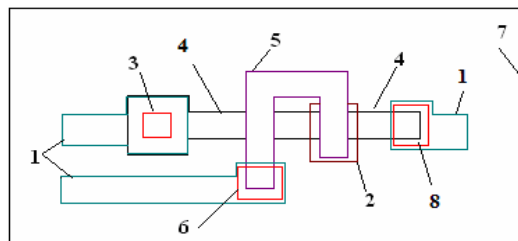


Рис. 2. Схематична топологія тривимірного КНІ МОН-транзистора з різними типами контактів до його електродів: 1 - металеві шини; 2 - контактне вікно у підзатворному діелектрику; 3, 6, 8 - контактні вікна у міжшаровому ізоляційному діелектрику в оксиді кремнію; 4 - стік-витокові області КНІ МОН-транзистора; 5 - полікремнієвий затвор КНІ МОН-транзистора; 7 - поверхня оксиду кремнію в структурі КНІ.

На рис.2, елементами 1, 3 і 4 утворено традиційний планарний контакт між шаром металу і кремнієвою шиною (стік КНІ МОН-транзистора). Елементи 1, 8 і 4 утворюють тривимірний контакт між шаром металу і кремнієвою шиною (витік КНІ МОН-транзистора), поперечний перетин якого зображено на рис. 5. Елементи 1, 6 і 5 утворюють тривимірний контакт між шарами металу і затворного полікремнію, а елементами 5, 2 і 4 утворено тривимірний контакт між шаром затворного полікремнію і кремнієвою шиною витoku КНІ МОН-транзистора.

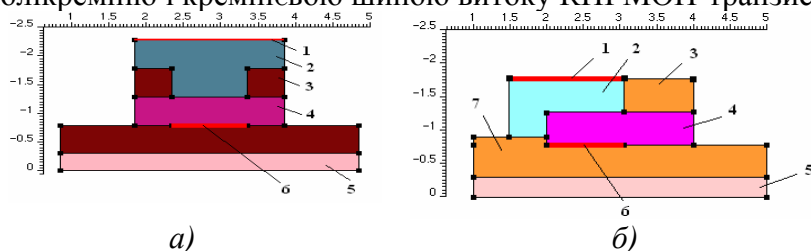


Рис 3. Планарний а) та тривимірний контакт б) в КНІ-структурі: 1 -фізичний контакт (анод для проведення моделювання), 2 - шар металу, 3- шар SiO_2 ; 4- шар полікремнію, 5 - кремнієва підкладка, 6 - фізичний контакт (катод), 7 - плівка SiO_2 . (Елементи 4, 5 і 7 утворюють КНІ-структуру).

Порівняльні вольт-амперні характеристики (ВАХ) планарного та тривимірного контактів між алюмінієм та кремнієвою плівкою в КНІ-структурі з однаковими планарними розмірами контактів та концентраціями легуючої домішки зображені відповідно на рис.4. а) і б). Як видно з наведених характеристик, провідність тривимірного контакту в 1,5 рази є кращою порівняно з планарним для площі контакту $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ і товщині кремнієвої плівки в КНІ- структурі 0,5 мкм.

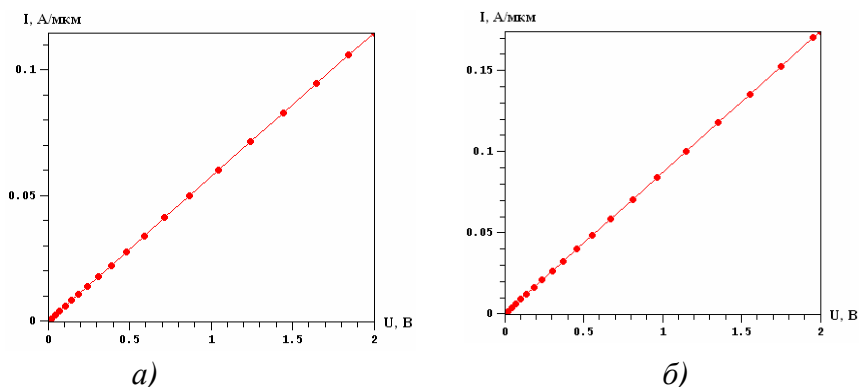


Рис.4. ВАХ планарного а) та тривимірного б) контактів у КНІ-структурі.

На рис.5. зображено розроблений оригінальний ключовий елемент на діодах Шотткі [7]. Технологія його виготовлення є такою. У вихідній КНІ-структурі, одержаній описаним вище методом, фотолітографією і травленням в одному технологічному циклі формують міжелементні ізолюючі канавки 6 згідно топології поданої на рис.5. Проводять легування плівки кремнію для активної n-області елемента з концентрацією домішки $10^{14}-10^{15} \text{ см}^{-3}$ з метою формування на бокових вертикальних гранях канавки в КНІ-плівці діодів Шотткі. Для створення контактів до стік-витоків областей КНІ-плівку у відповідних областях легують домішкою n-типу провідності до концентрацій $10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$. Після напilenня шару алюмінієвої металізації, фотолітографії і температурного відпалу одержують даний елемент.

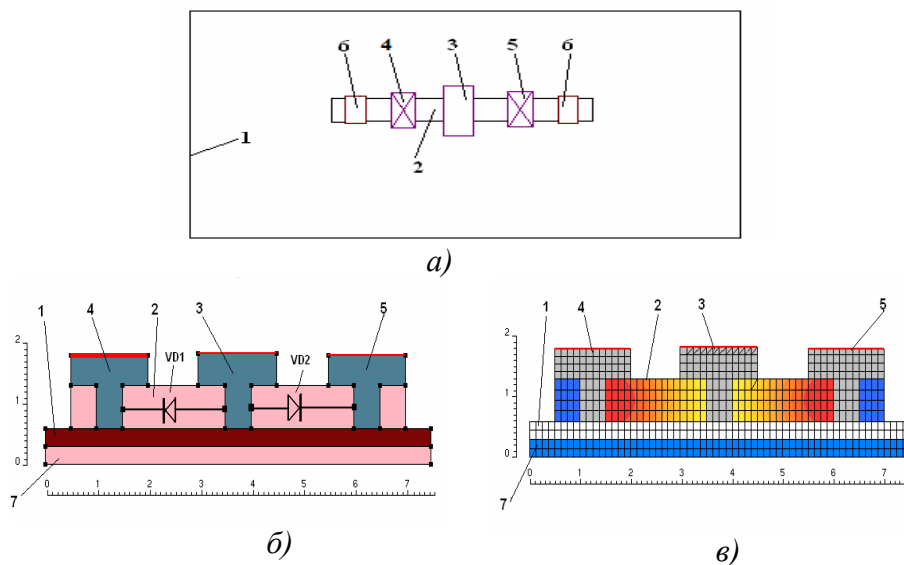


Рис.5. Ключовий елемент на діодах Шотткі зі структурами КНІ, а) схематична топологія; б) поперечний перетин структури, який використовувався для комп'ютерного моделювання; в) концентраційний розподіл домішок, одержаний в результаті моделювання: 1 - поверхня SiO_2 в КНІ структурі; 2 – смужка із плівки кремнію в структурі КНІ; 3 - керуючий електрод (затвор); 4, 5 - стік-витоківі області ключового КНІ-елемента; 6 - міжелементні ізолюючі канавки в смужці кремнію; 7 - кремнієва пластина. (Елементи 2, 1 і 7 - утворюють структуру КНІ).

Результати комп'ютерного моделювання свідчать, що у разі подачі позитивної напруги на стік 5 і заземленні витоку 4 та затвору 3 струм стоку буде рівним струму обернено-зміщеного діода Шоттки VD2. У випадку подачі напруги або струму на керуючий затвор суттєво змінюються властивості збідненої області закритого діода Шоттки VD2, і він починає відкриватися та проводити струм. Діод VD1 при цьому має пряме включення з низьким опором.

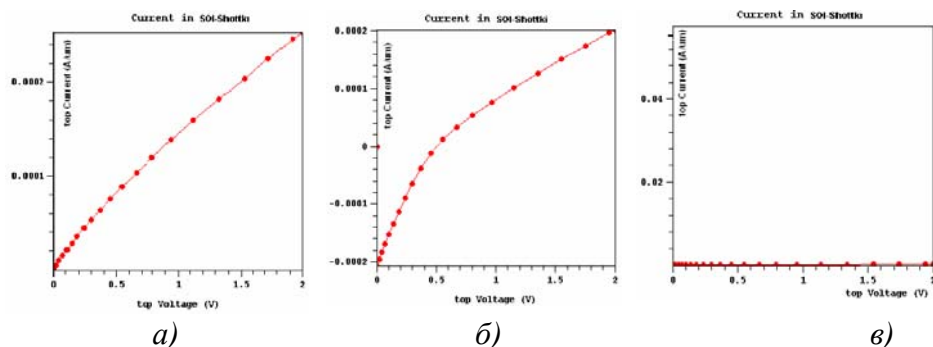


Рис.6. ВАХ ключового КНІ-елемента на діодах Шоттки в діапазоні напруг 0 - 2В між витоком 4 і стоком 5 відповідно (до рис.5.) а) - при нульовому зміщенні затвора; б) - при зміщенні затвора 0.5 В; в) - при зміщенні затвора мінус 1 мВ.

Отже, конструкція, в якій керуючий електрод ключового КНІ- елемента утворений на основі діодів Шоттки на слабколегованих вертикальних стінках вузької канавки та омичних контактів до стік-витокових областей до сильнолегованих вертикальних стінок у сусідніх до керуючого електроду канавках з ізоляцією ключового елемента вузькими канавками, заповненими окислом, дозволяє суттєво зменшити геометричні розміри елемента в цілому, що підвищить ступінь інтеграції на кристалі, а реалізації керуючого електроду із металу між двома зворотньо-включеними діодами Шоттки дозволяє одержати високу швидкодію пристрою. У цьому елементі на основі КНІ- структур, керуючий електрод виконує функцію затвору (бази) і виконаний з металу, тому його ширина фактично не впливатиме на транспортування носіїв в тілі цього електроду. Це означає, що відсутність дифузійних ємностей, пов'язаних із накопиченням і розсмоктуванням неосновних носіїв у тілі такого керуючого електроду суттєво підвищить швидкодію ключового КНІ- елемента при змінах струмів чи напруг у колі керуючого електроду, в тому числі і при переключеннях з прямого напрямку на зворотній, та навпаки. Час таких переключень буде визначатися тільки бар'єрними ємностями переходів Шоттки, і оскільки в даному елементі ці діоди реалізовані на вертикальних стінках КНІ-плівки, їх площа буде дуже малою, тому час переключень таких елементів за попередніми оцінками становитиме одиниці і десятки долі пікосекунд. Важливою перевагою таких пристроїв буде і те, що для них характерне значно менше пряме падіння напруги порівняно зі стандартним дифузійним р-n-переходом.

Реалізація даного елемента з використанням вузьких субмікрометрових і нанометрових канавок для створення областей стоку, витоку і затвора, а також і міжелементної ізоляції дозволить суттєво зменшити загальні топологічні розміри на кристалі, тобто суттєво підвищити ступінь елементної інтеграції. Технологія створення таких елементів є відносно простою і фактично сумісною з виготовленням МОН- транзисторів, що відкриває додаткові можливості для конструювання нових приладних структур, логічних чи цифрових елементів ІС, пристроїв сенсорної та мікросистемної техніки, створення базових матричних кристалів, надшвидкодіючих ключових елементів для вихідних каскадів ІС.

Висновки. Результати приладно-технологічного моделювання свідчать що запропонованими способом можливо формувати локальні тривимірні структури типу «кремній-на-ізоляторі» (КНІ) та виготовляти на цій основі активні приладні елементи, зокрема тривимірні, як для ІС, сенсорної мікроелектроніки і пристроїв мікросистемної техніки (МСТ) та їх монолітної інтеграції при створенні МСК. На отриманих таким методом структурах розроблено і промодельовано як планарні, так і тривимірні інтегральні елементи, зокрема, МОН-транзистор з тривимірним затвором, тривимірні контакти, оригінальний ключовий елемент на діодах Шотткі. Тому локальні тривимірні КНІ-мікроструктури, формування яких є “прив’язаним” до топології мікроелектронних пристроїв, можуть застосовуватися для проектування мікросенсорів, елементів МСТ, інтегрованих МСК.

Література

1. Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. – 1999. – № 1. – С. 3-6.
2. В.Г. Вербицкий. Ионные нанотехнологии в электронике. Монография.– К.: МП Леся, 2002. – С.7-8.
3. Jean-Pierre Collinge, Silicon-on-Insulator Technology: materials to VLSI, 2nd Edition, by Kluwer Academic Publishers, 1997.
4. Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices. Ed. by J.-P. Collinge, V.S. Lysenko and A.N. Nazarov. 1995 Kluwer Academic Publishers, Printed in Netherlands. NATO ASI Series 3: High Technology. – 1995. – Vol.4. – P.41- 48.
5. A. Druzhynin, I. Kogut. Digital CMOS ARRAY based on SOI Structures // Electron Technology, Warshawa. – 1999. – Vol.32, No. 1-2. – P.142-145.
6. Патент України на корисну модель № 29701UA. Контакт в інтегральних пристроях зі структурами «кремній-на-ізоляторі»/ Когут І.Т., Дружинін А.О., Голота В.І. Опубл. 25.01.2008, бюл. №1.
7. Патент України на корисну модель №29698UA «Ключовий елемент на діодах Шотткі зі структурами «кремній-на-ізоляторі» /Когут І.Т., Голота В.І., Дружинін А.О., – Опубл. 25.01.2008, бюл. №1.

LOCAL KHI-STRUCTURES - PERSPECTIVE MATERIAL FOR INTEGRATED MIKROСИСТЕМ-ON-CRYSTAL**I.T.Cogut**

²*PreCarpathian National University by V. Stefanic
Ivano-Frankivs'k, Shevchenko Street, 57, Ivano-Frankivs'k, 76000, Ukraine,
ph. (0342) 71 48 48, e-mail: micro@il.if.ua*

An original method of fabrication of the local 3-dimensional “silicon-on-insulator” (SOI) structures is developed and a device-technological simulation for this method is provided. It's showed, on the base of such structures are possibilities for creating the different elements of integrated microsystem-on-chip to design with the standart, planar constructions, as well as with the 3-dimensional architectures. On the base of such SOI-structures some microsystem elements were developed and their electrical characterics were investigated.

Keywords: *silicon-on-insulator(SOI), microsystem-on-chip, device technological simulation, 3-D elements.*