



УКРАЇНА

(19) UA (11) 62085 (13) U  
(51) МПК (2011.01)  
B81C 1/00  
B82B 3/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

### (54) СПОСІБ ФОРМУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ ПОРОЖНИН В КРЕМНІЄВИХ ПЛАСТИНАХ

1

(21) u201101007

(22) 31.01.2011

(24) 10.08.2011

(46) 10.08.2011, Бюл.№ 15, 2011 р.

(72) КОГУТ ІГОР ТИМОФІЙОВИЧ, ГОЛОТА ВІКТОР ІВАНОВИЧ

(73) ПРИКАРПАТСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТЕФАНИКА

(57) 1. Спосіб формування багаторівневих порожнин в кремнієвих пластинах, що включає маскування за заданою топологією поверхні пластини, витравлювання в немаскованих місцях на задану глибину вертикальних щілин, покриття поверхні щілин нітридом кремнію і його селективне витравлення на дні щілини, поглиблення щілин витравлюванням кремнію та формування горизонтальних порожнин-тунелів і звисаючих в них зі стінок щілин ділянок із нітриду кремнію, травлення нітриду кремнію на поверхні стінок щілин і наступне термічне окислення поверхонь порожнин і щілин до змикання окисних плівок між протилежними стінками щілин і їх перекриття, який **відрізняється** тим, що вертикальні щілини і горизонтальні порожнини-тунелі формують в кремнієвій пластині послідовно

2

одна над одною на двох і більше рівнях методами плазмохімічного травлення з приладної сторони пластини, утворюючи під її поверхнею спочатку перший, верхній рівень вертикальних щілин та горизонтальних порожнин-тунелів, захищають вертикальні стінки щілин плівкою із нітриду кремнію, плазмохімічним травленням формують другий, нижній рівень вертикальних щілин та порожнин-тунелів, видаляють плівку нітриду кремнію з вертикальних стінок щілин, після чого одночасно локально окислюють поверхні порожнин та вертикальних щілин до змикання окислів між поверхнями протилежних стінок щілин всіх рівнів і їх перекриття.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що маскою при плазмохімічному травленні нижнього рівня щілин є щілини верхнього рівня, покриті плівкою нітриду кремнію заданої товщини, що забезпечує менші геометричні розміри щілин нижнього рівня порівняно із верхнім на величину подвійної товщини плівки нітриду кремнію і, відповідно, послідовну герметизацію порожнин від нижнього до верхнього рівнів при термічному окисленні поверхонь щілин і порожнин.

Спосіб належить до мікро- та наноелектронних технологій і може бути застосований як окремо, так і в поєднанні з методами формування нестандартних тривимірних «кремній-на-ізоляторі»(КНІ)-структур, включаючи багатошарові, та монолітно-інтегровані на кристалі як тривимірні, так і планарні архітектури елементів на об'ємному кремнії і/або КНІ для створення приладних елементів сенсорної електроніки та мікросистемної техніки.

Відомими є локальні, тривимірні «кремній-на-ізоляторі»(КНІ)-структури та спосіб їх формування [1], в якому у немаскованих за заданою топологією місцях в кремнієвій пластині витравлюють на задану глибину вертикальні щілини, покривають їх нітридом кремнію, який витравлюють на дні щілини селективним анізотропним плазмо-хімічним травленням, після цього ізотропним плазмохімічним витравлюванням кремнію поглиблюють щіли-

ни та формують порожнини, локально їх окислюють, знімають маскуюче покриття і планаризують поверхню піролітичним окислом з наступним його частковим видаленням на потрібну глибину у вертикальних щілинах.

Отже, в цьому способі, локальні, тобто, розташовані за заданою топологією, тривимірні КНІ-структури утворюють комбінуючи методи маскування, селективного плазмохімічного анізотропного та ізотропного травлення зі сторони робочої поверхні кремнієвої пластини для формування вертикальних щілин, їх поглиблення, формування горизонтальних порожнин-тунелів під поверхнею кремнієвої пластини в місцях КНІ-острівців, їх локального окислення, планаризації поверхні пластини піролітичним окислом та його витравлення у вертикальних щілинах на задану глибину. При цьому топологічні розміри вертикальних щілин для

U  
(13)

62085  
(11)

UA  
(19)

утворюваних порожнин підбирають таким чином, що в процесі локального окислення порожнин-тунелів, термічні окисли на поверхнях порожнин проокислювали сусідні міжпорожнинні перегородки і змикалися. Після заповнення порожнин піролітичними окислом утворюються локальні тривимірні КНІ-структури, і як проміжний варіант цієї технології, можливим є також формування за заданою технологією негерметизованих порожнин під поверхнею кремнієвої пластини, які в поєднанні з КНІ-структурами можуть використовуватися як конструктивні елементи інтегрованих мікросистем- і мікролабораторій-на-кристалі (МСК і МЛК).

Проте недоліком даного способу є відсутність можливостей безпосереднього формування герметизованих порожнин в кремнієвій пластині, що обмежує можливість його застосування для створення нових приладних елементів мікросистем.

Найбільш близьким технічним рішенням, прийнятим авторами за найближчим аналогом, є спосіб формування герметизованих порожнин в кремнієвих пластинах [2], який включає маскування поверхні пластини за заданою топологією плівкою із нітриду кремнію, плазмохімічні витравлювання в немаскованих місцях на задану глибину вертикальних щілин, покриття їх стінок нітридом кремнію і його селективне витравлення на дні щілини, поглиблення щілин витравлюванням кремнію та формування порожнин і звисаючих в них ділянок із нітриду кремнію на стінках щілин та окислення порожнин, а для герметизації порожнин та мікроканалів в кремнієвих пластинах або пластинах зі структурами кремній-на-ізоляторі, поверхню порожнин локально окислюють до змикання звисаючих ділянок плівки із нітриду кремнію для перекриття щілин, після чого на зімкнені ділянки із нітриду кремнію осаджують, наприклад, піролітичний окисел, полікремній, метали або інші матеріали до повного або часткового заповнення щілин.

У цьому способі, змикання нависаючих ділянок із нітриду кремнію, яке відбувається унаслідок їх підйому в процесі локального окислення порожнин при відповідно підібраних топологічних розмірах щілин і довжин нависаючих ділянок плівки із нітриду кремнію, утворює п'єдестал, на який можна осаджувати необхідні матеріали.

Іншим методом герметизації порожнин у цьому способі є одночасне термічне окислення незахищених поверхонь стінок щілин і порожнин в кремнієвій пластині, при цьому відстань між протилежними стінками щілин вибирають такою, щоб в процесі окислення їх поверхонь, окисні плівки на протилежних стінках щілин зімкнулися до повного перекриття щілин. Герметизовані мікропорожнини і мікроканали можуть бути використані, для побудови елементів сенсорних мікросистем або мікролабораторій, конструктивно і технологічно інтегрованих зі схемами обробки інформації на одному кристалі.

Основним недоліком цього способу є обмежені можливості конструювання приладних елементів мікросистем-на-кристалі.

В основу корисної моделі пропонуваного способу поставлене завдання розширення можливостей для конструювання на основі багаторівневих

мікропорожнин та нестандартних тривимірних КНІ-структур різноманітних приладних архітектур такі як сенсорні та актюаторні елементи, елементи мікросистем- і мікролабораторій-на-кристалі зі схемами обробки інформації та їх конструктивна й технологічна інтеграція на кристалі.

Поставлене завдання вирішується тим, що в способі формування багаторівневих порожнин в кремнієвих пластинах, який включає маскування за заданою топологією поверхні пластини, витравлювання в немаскованих місцях на задану глибину вертикальних щілин, покриття поверхні щілин нітридом кремнію і його селективне витравлення на дні щілини, поглиблення щілин витравлюванням кремнію та формування горизонтальних порожнин-тунелів і звисаючих в них зі стінок щілин ділянок із нітриду кремнію, травлення нітриду кремнію на поверхні стінок щілин і наступне термічне окислення поверхонь порожнин і щілин до змикання окисних плівок між протилежними стінками щілин і їх перекриття, який відрізняється тим, що згідно із корисною моделлю, вертикальні щілини і горизонтальні порожнини-тунелі формують в кремнієвій пластині послідовно одна над одною на двох і більше рівнях методами плазмохімічного травлення з приладної сторони пластини, утворюючи під її поверхнею спочатку перший, верхній рівень вертикальних щілин та горизонтальних порожнин-тунелів, захищають вертикальні стінки щілин плівкою із нітриду кремнію, плазмохімічним травленням формують другий, нижній рівень вертикальних щілин та порожнин-тунелів, видаляють плівку нітриду кремнію з вертикальних стінок щілин, після чого одночасно локально окислюють поверхні порожнин та вертикальних щілин до змикання окислів між поверхнями протилежних стінок щілин всіх рівнів і їх перекриття.

Таким чином, в процесі одночасного локального термічного окислення поверхонь щілин і порожнин при відповідно підібраних топологічних розмірах щілин до змикання окислів між протилежними поверхнями стінок вертикальних щілин приводить до їх перекриття, і як наслідок, до герметизації мікропорожнин. Зменшуючи час окислення або збільшуючи геометричні розміри щілин, що не буде приводити до змикання окислів між протилежними стінками щілин, можна отримувати також і багаторівневі негерметизовані мікропорожнини.

Поставлене завдання може бути вирішене також і тим, що згідно із корисною моделлю за даним способом, маскою при плазмохімічному травленні нижнього рівня щілин є щілини верхнього рівня покриті плівкою нітриду кремнію заданої товщини, що забезпечує менші геометричні розміри щілин нижнього рівня порівняно із верхнім на величину подвійної товщини плівки нітриду кремнію, і відповідно, послідовну герметизацію порожнин від нижнього до верхнього рівнів при термічному окисленні поверхонь щілин і порожнин.

Тому при менших геометричних розмірах щілин нижнього рівня у порівнянні з наступним верхнім рівнем, перекриття щілин і герметизація мікропорожнин в процесі їх локального термічного окислення, для нижнього рівня наступить швидше, порівняно із верхнім. Більші розміри щілин верх-

ного рівня забезпечують проходження кисню до нижніх щілин при одночасному окисненні поверхонь і гарантують послідовне перекриття спершу нижніх, а після цього верхніх щілин, і відповідно, таку ж послідовність герметизації мікропорожнин. При певному співвідношенні геометричних розмірів верхніх і нижніх щілин можливим є отримання герметизованих мікропорожнин на нижньому рівні, і негерметизованих - на верхньому.

Отже суть пропонованого способу полягає у проведенні послідовності технологічних операцій, в результаті яких в кремнієвій пластині формують щілини на задану глибину, покривають їх нітридною плівкою, здійснюють поглиблення щілин і формують під поверхнею пластини перший рівень мікропорожнин під поверхнею пластини з утворенням нависаючих в них ділянок із плівки нітриду кремнію, після чого формують аналогічно другий нижній рівень щілин і мікропорожнин, після цього знімають захисну для окислення нітридну плівку на вертикальних стінках щілин обох рівнів, проте залишаючи такий захист на поверхні пластини, і що дає змогу проводити локальне термічне окислення тільки поверхонь мікропорожнини і щілин. Змінюючи співвідношення топологічних розмірів щілин на різних рівнях, яке можна задати на стадії проектування топології або використовуючи маскуючі покриття, при цьому під поверхнею пластини утворюються герметизовані або негерметизовані мікропорожнини та мікроканали.

Приклад конкретного виконання

Суть пропонованого способу детально пояснюється поданою послідовністю базових операцій технологічного процесу формування дворівневих мікропорожнин та мікроканалів в кремнієвих пластинах, а саме, на фіг. 1-12 зображено результати приладно-технологічного комп'ютерного моделювання технології формування окисно-герметизованих мікропорожнин без маскування вертикальних щілин нітридною плівкою згідно із корисною моделлю у вигляді поперечних перетинів структур. При цьому топологічні розміри розраховують таким чином, щоб в процесі локального окислення поверхонь порожнин і щілин, окисні плівки на поверхнях щілин зімкнулися, і під ними утворилися незаповнені окислом, а з термічно-окисленою поверхнею порожнини.

На кожній із фігур 1-12 подані горизонтальні і вертикальні шкали у мікрометрах, які дозволяють оцінити реальні топологічні розміри елементів і товщини елементів на поперечних перетинах. Всі перетини структур, зображені на фіг. 1-12, були отримані в результаті комп'ютерного приладно-технологічного моделювання. Технологічна послідовність формування дворівневих герметизованих мікропорожнин і мікроканалів в кремнієвих пластинах, орієнтованих на комбінацію із локальними тривимірними КНІ-структурами, відповідно до фіг. 1-12 є наступною:

на фіг. 1 зображено кремнієву пластину 1 після осадження шару нітриду кремнію 2 товщиною 0,15 мкм після проведеної фотолітографії для формування маски із  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при витравлюванні першого рівня щілин;

на фіг. 2 зображено поперечний перетин структури після наступної технологічної операції - анізотропного плазмохімічного травлення кремнієвої пластини 1 у немаскованих  $\text{Si}_3\text{N}_4$  2 місцях на глибину 1,5 мкм і формування вертикальних щілин 3;

на фіг. 3 зображено поперечний перетин структури після повторного осадження шару 4  $\text{Si}_3\text{N}_4$  товщиною 0,05 мкм на поверхні пластин і щілин. Сумарна товщина плівки нітриду кремнію 2 на поверхні пластини становить 0,20 мкм, а на вертикальних стінках щілини - 0,05 мкм;

на фіг. 4 зображено поперечний перетин структури після локального плазмохімічного травлення плівки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на дні щілини 5;

фіг. 5 - зображена структура пластини після ізотропного травлення кремнію на величину 0,6 мкм з утворенням верхнього рівня порожнин 6 та нависаючих в них ділянок із  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ;

на фіг. 6 зображено поперечний перетин структури після наступної технологічної операції - анізотропного плазмохімічного травлення кремнієвої пластини 1 у немаскованих верхньою щілиною в комбінації із  $\text{Si}_3\text{N}_4$  плівкою 4 місцях на глибину 1,5 мкм і формування нижнього рівня вертикальних щілин 7;

на фіг. 7 зображено поперечний перетин структури після повторного осадження шару  $\text{Si}_3\text{N}_4$  товщиною 0,05 мкм на поверхні пластин і щілин. Сумарна товщина плівки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  2 на поверхні пластини становить 0,25 мкм і на вертикальних стінках щілини - 0,05 мкм;

на фіг. 8 зображено поперечний перетин структури після локального плазмохімічного травлення плівки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на дні нижньої щілини 9;

на фіг. 9 зображено структуру пластини після поглиблення нижніх щілин анізотропним травленням та наступного ізотропного травлення кремнію на величину 0,6 мкм з утворенням нижнього рівня порожнин 10 та нависаючих в них ділянок із  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ;

на фіг. 10 - зображено поперечний перетин структури після травлення плівки 8 із  $\text{Si}_3\text{N}_4$  товщиною від 0,05 мкм з поверхонь щілин, порожнин і поверхні пластин;

на фіг. 11 - зображено поперечний перетин структури після локального термічного окислення поверхонь порожнин і щілин на двох рівнях. Окисні плівки на протилежних поверхнях щілин змикаються, утворюючи герметизовані, покриті окислом поверхні порожнин 6 і 10 в кремнієвій пластині 1. Маскою для локального окислення служить плівка із  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на поверхні пластини із залишеною товщиною приблизно 0,15 мкм.

на фіг. 12 - зображено поперечний перетин структури після травлення плівки плівка із  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на поверхні пластини товщиною 0,15 мкм і часткового травлення локального окислу над верхньою щілиною для отримання локальної тривимірної структури «кремній-на-ізоляторі» 12, а також утвореної в процесі термічного окислення структури «кремній-в-ізоляторі» 13.

Отже, як видно із результатів приладно-технологічного комп'ютерного моделювання, запропонованим методом можна формувати в кремнієвих пластинах на заданій глибині герметизовані

мікропорожнини та мікроканали на двох і більше рівнях.

При формуванні таких структур важливим є вибір і розрахунок топологічних розмірів щілин. Вказані розміри вибираються із розрахунку змикання термічно-окисних плівок на протилежних стінках щілин. В основі цих розрахунків вирощування термічних окисних плівок на поверхнях щілин, що приводять до змикання окислів і герметизації мікропорожнин. Для прикладу, реальні конструктивно-топологічні розміри структури в мікрометрах, подані на вертикальних і горизонтальних шкалах для отримання герметизованих дворівневих мікропорожнин були підібрані шляхом комп'ютерного, приладно-технологічного моделювання. Запропонованим методом і варіацією топологічних розмірів щілин в комбінацією з товщиною термічного окислу (часом термічного окислення) на поверхнях щілин і порожнин аналогічним чином можуть бути теж отримані й негерметизовані мікропорожнини, або герметизовані на одному рівні і негерметизовані на другому.

Тому отримані запропонованим способом дворівневі мікропорожнини і мікроканали під поверхнею пластини, і як похідні цього способу - локальні тривимірні структури «кремній-на-ізоляторі» та «кремній-в-ізоляторі» дадуть змогу розширити можливості конструювання на цій основі елементів мікросистем-на-кристалі, мікролабораторій-на-кристалі, в яких герметизовані каналці під поверхнею пластини можуть виконувати функції мікро- і нанотрубок, розташування яких зрозуміло, буде задаватися необхідною топологією пристрою. Окрім цього, такі мікропорожнини можуть бути використані, наприклад, для побудови сенсорних елементів абсолютного тиску, конструктивно і технологічно інтегрованих зі схемами обробки інформації на одному кристалі, елементів системи охолодження на кристалі, елементів вбудованих в кристал мікроджерел живлення і накопичення енергії та ін.

Перспективним видається використанням запропонованих дворівневих мікроканалів та структур «кремній-в-ізоляторі» як елементів оптоелектроніки та ін. Оскільки, як аналог і найближчий аналог для створення багаторівневих мікропорожнин і мікроканалів було використано технологію формування локальних тривимірних «кремній-на-ізоляторі»-структур, базові технологічні операції для яких є спорідненими з технологією формування дворівневих мікропорожнин, дані технології можуть бути легко інтегрованими одна в одну, що буде перспективним напрямком для побудови інтегрованих мікросистем і мікролабораторій-на-кристалі на основі локальних тривимірних КНІ-структур та створення мікро- і нанoeлектронних конструкцій як зі стандартними, планарними архітектурами, так і з тривимірними, об'ємними конфігураціями елементів, інтеграції стандартних об'ємних технологій і технологій на основі КНІ-структур на одному кристалі.

Перелік фігур креслення та прийняті позначення

Фіг. 1 - перетин кремнієвої пластини після осадження шару  $\text{Si}_3\text{N}_4$  для формування маски при витравлюванні першого рівня щілин;

Фіг. 2 - перетин структури після формування вертикальних щілин анізотропним плазмохімічним травленням кремнієвої пластини;

Фіг. 3 - перетин структури після повторного осадження шару  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на поверхні пластин і щілин.

Фіг. 4 - перетин структури після локального плазмохімічного травлення плівки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на дні щілини;

Фіг. 5 - структура пластини з утворенням верхнім рівнем порожнин ізотропним травленням кремнію;

Фіг. 6 - перетин структури зі сформованим нижнім рівнем вертикальних щілин;

Фіг. 7 - перетин структури після повторного осадження шару  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на поверхні пластин і щілин;

Фіг. 8 - перетин структури після локального плазмохімічного травлення плівки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на дні нижньої щілини;

Фіг. 9 - структура пластини з утворенням нижнім рівнем порожнин та нависаючими в них ділянками із  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ;

Фіг. 10 - перетин структури з відкритими для локального окислення поверхнями щілин і порожнин;

Фіг. 11 - перетин структури після локального термічного окислення поверхонь порожнин і щілин на двох рівнях;

Фіг. 12 - перетин структури зі сформованими дворівневими мікро-порожнинними і локальними тривимірною структурою «кремній-на-ізоляторі» та «кремній-в-ізоляторі».

На фіг. 1-12 цифрами позначені: 1 - кремнієва пластина, наприклад, КДБ-40 з кристалографічною орієнтацією поверхні (100); 2 - плівка нітриду кремнію  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (або оксинітриду кремнію) товщиною 0,15 мкм; 3 - вертикальна щілина в кремнієвій пластині; 4 - осаджена плівка  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на поверхню вертикальної щілини і кремнієвої пластини; 5 - локально витравлена плівка нітриду кремнію на поверхні дна щілини в кремнієвій пластині; 6 - ізотропно витравлені порожнини-тунелі першого рівня в кремнієвій пластині після анізотропного поглиблення щілин; 7 - анізотропно витравлена вертикальна щілина нижнього рівня глибиною 1,5 мкм; 8 - осаджена плівка  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на поверхню порожнини, вертикальних щілин і кремнієвої пластини; 9 - локально витравлена плівка  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на поверхні дна нижньої щілини в кремнієвій пластині; 10 - ізотропно витравлені порожнини-тунелі другого рівня в кремнієвій пластині після анізотропного поглиблення щілин другого рівня; 11 - локально-вирощений, герметизуючий термічний окисел на поверхнях порожнин і щілин; 12 - локальний тривимірний острівцець «кремнію-на-ізоляторі» першого рівня з відкритою поверхнею; 13 - локальний тривимірний острівцець «кремнію-в-ізоляторі» другого рівня із закритою поверхнею.

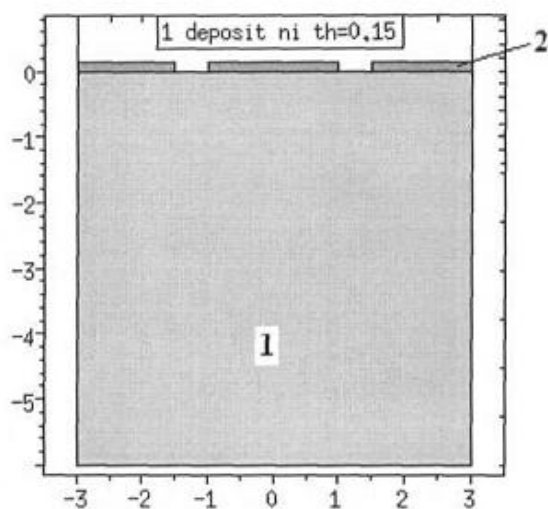
Використані джерела інформації:

1. Anatoliy Druzhynin, Victor Holota, Igor Kohut, Sergij Sapon and Yuriy Khoverko "The Device-Technological Simulation of The Field-Emission micro-Cathodes Based on Three-Dimensional SOI-

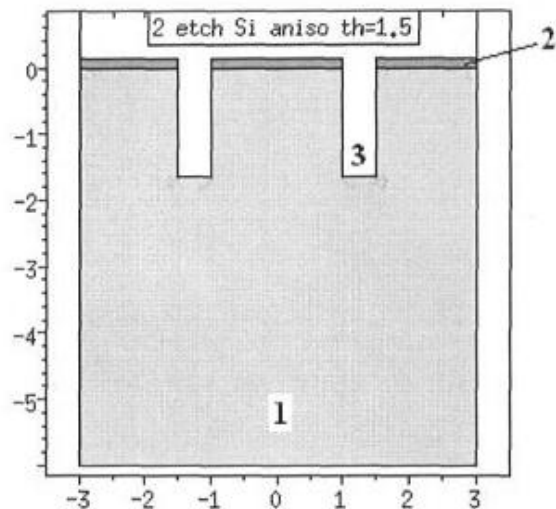
Structures". - Journal of The Electrochemical Society, ESC Trans. 14, (1) 569 (2008).

2. Патент України на корисну модель № 43198 UA. Спосіб формування герметизованих порожнин

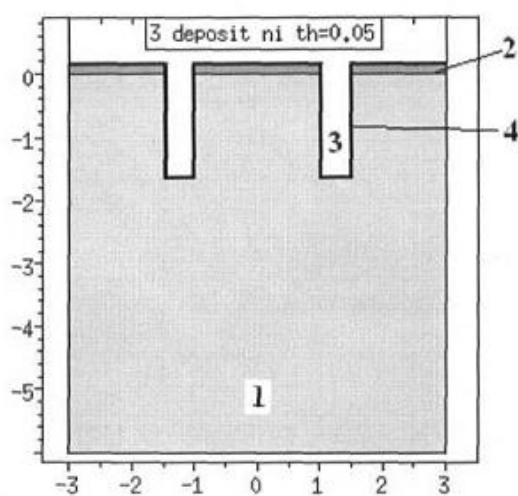
в кремнієвих пластинах / Корут І.Т., Голота В.І.; опубл. 15.08.2008. - Бюл. № 15.



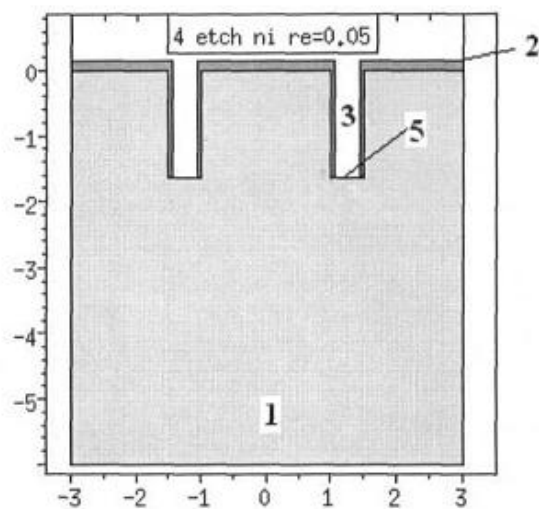
Фиг. 1



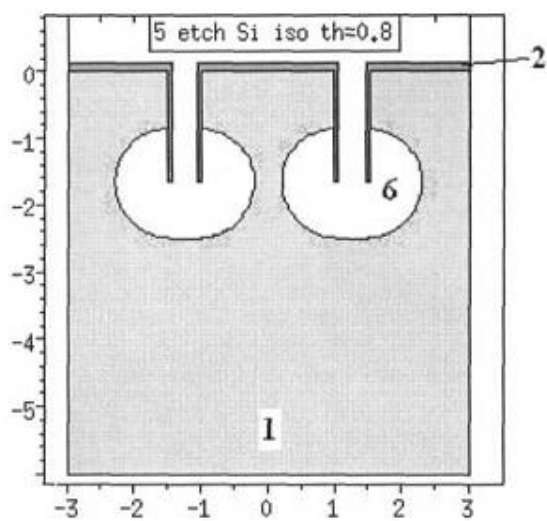
Фиг. 2



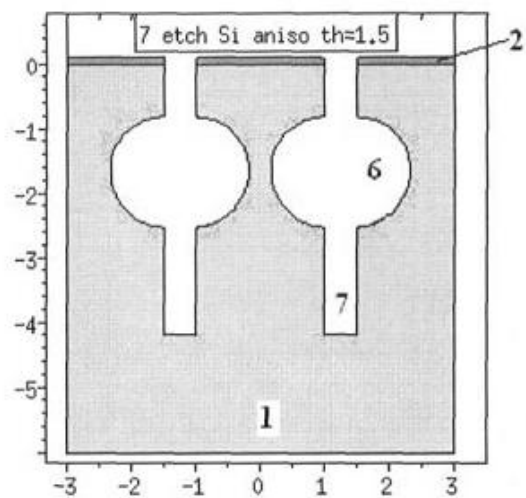
Фиг. 3



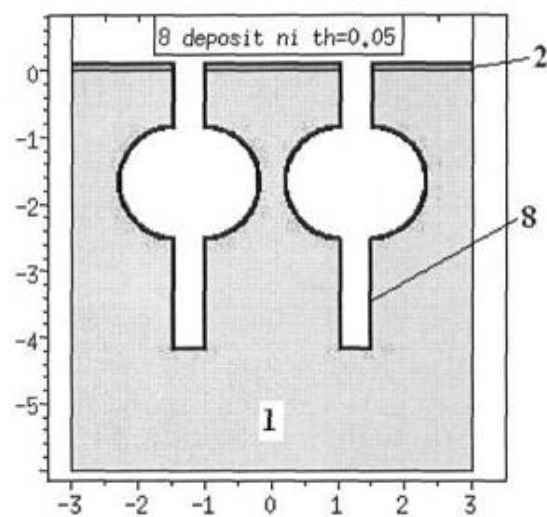
Фиг. 4



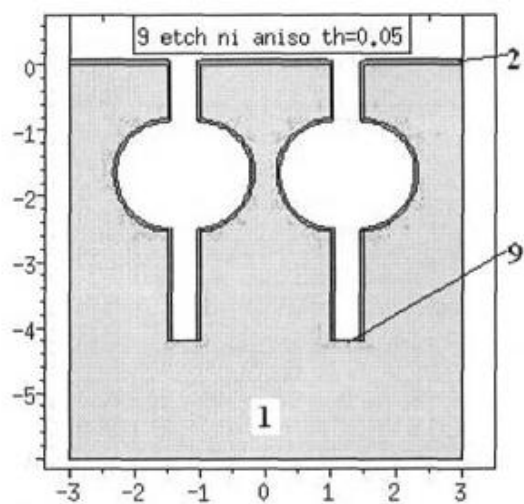
Φir. 5



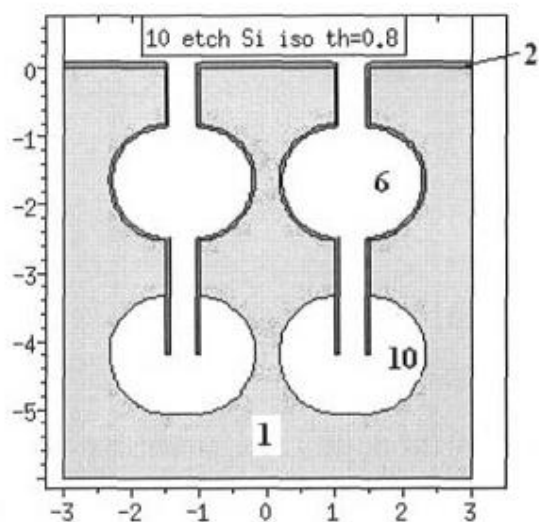
Φir. 6



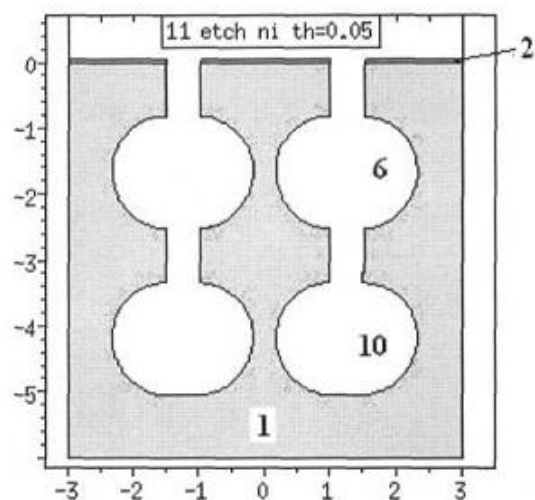
Φir. 7



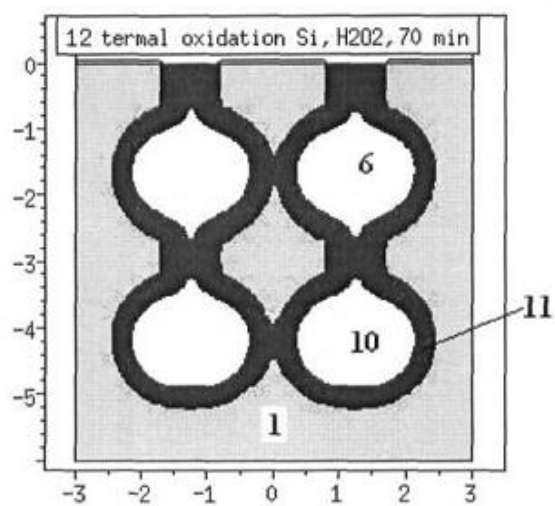
Φir. 8



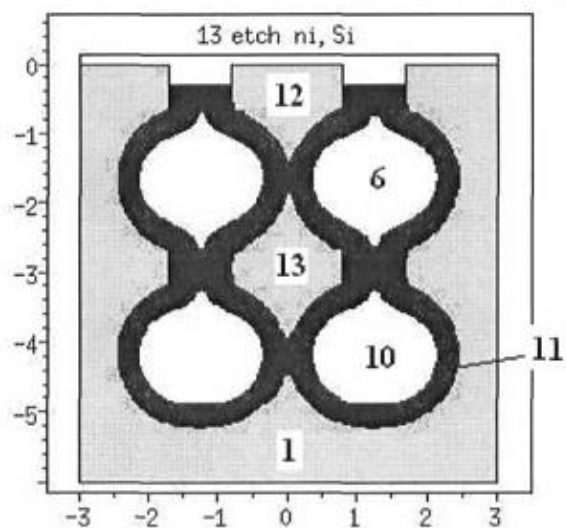
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12