

Р.Б. Атаманюк

## Можливості молекулярного нашарування та спосіб тестового контролю якісного формування контактів в субмікронних структурах ВІС

*Прикарпатський Національний університет ім. В. Стефаника*

Основною тенденцією розвитку субмікронної та наноелектроніки є підвищення степеня інтеграції і швидкодії за рахунок зменшення елементів структур великих інтегральних схем. Вимоги до отримання субмікронних та наномікронних елементів та їх високої відтворюваності на всій площі напівпровідникового кристала, на якому розміщена топологія і багаторівнева розводка в межах 3-5 % диктують необхідність розробки досконаліших процесів проекційної електронної літографії та анізотропного плазмохімічного проявлення і травлення. Ці процеси є особливо актуальними для відтворення кроку багаторівневої розводки (менше 1.5 мкм).

Розглядаються технологічні прийоми, за допомогою яких можна понижувати потенційні бар'єри між металом та легованим напівпровідником та вимірювати перехідні контактні опори. Після якісного відкриття і профілювання контактів в міжшаровій ізоляції на спеціально підготовлених тестових структурах проводиться осадження міді в контакти, використовуючи спеціальні розчинники. При наявності атомарно чистої поверхні в донній частині контактів проходить осадження суцільної плівки міді на моно - Si . Якщо контактні вікна не достатньо якісно відкриті, то мідь або не буде осаджуватись, або плівка міді буде неоднорідною.

**Ключові слова:** наноелектроніка, інтегральна схема, молекулярне нашарування, тестовий контроль.

*Стаття постуила до редакції 07.03.2008; прийнята до друку 15.03.2009.*

### I. Можливості молекулярного нашарування.

Метод молекулярного нашарування (МН) ґрунтується на синтезі твердих речовин на поверхні твердого тіла, кристалічна ґратка якого служить матрицею для побудови на ній структурних топологічних одиниць [1]. Синтезовані речовини з великою точністю можуть відтворювати кристалічну будову матеріалу підкладки чи структури.

Молекулярне нашарування як метод має ряд унікальних властивостей і дозволяє реалізувати чи відтворити:

- регулярно побудовані шаруваті структури з високою стехіометрією;
- фазове перетворення при низьких енергіях;
- хімічний склад і будову синтезуючої речовини;
- синтез однієї чи декількох хімічних речовин в заданій послідовності при порівняно невисоких температурах і тиску;
- планарну, конформну поверхню під субмікронні контакти;
- малий крок металізації чи розводки в структурах ВІС.

Різновидністю методу молекулярного нашарування є метод атомарно-шарової епітаксії, який є близьким до молекулярно-пучкової та газозфазної епітаксії, що дозволив синтезувати тонкоплівкові шари оксидів і сульфідів в шаруватих структурах ВІС [2, 3].

Сьогодні даний метод з успіхом використовується для низькотемпературного вирощування шарів арсеніду галію GaAs [4].

Аналіз показує, що метод МН за сукупністю параметрів відповідає низькій температурі осадження, кристалографічній структурі, стехіометрії плівок, конформності відтворення рельєфу поверхні, високої прецизійності росту, – має найвищі переваги. Тут також треба зауважити, що при молекулярному нашаруванні можливе застосування радіаційної обробки, що дозволяє отримувати шари із заданими властивостями при низьких температурах і тисках.

Розглянемо реальні можливості методу МН в субмікронній і нанотехнології формування структур.

Найбільший інтерес викликає застосування методу МН для формування і стабілізації гетеромереж розподілу та модифікації властивостей напівпровідникових матеріалів і металів.

#### 1. Формування гетеромереж розподілу в

### шаруватих структурах.

Основні параметри ВІС, їх елементів та функціональних приладів в значній мірі визначається характеристиками границь розподілу, які формуються за правилами структурного і геометричного проектування [5].

Виходячи із цих правил сформулюємо вимоги до технологічних умов формування міжфазових меж шаруватих структур. Так, у випадку гетероморфної межі розподілу, коли плоскі ґратки двох або більше фаз перебувають в контакт і повинні мати загальну кристалографічну природу та близькі геометричні параметри (в межах до 15%), задача її формування зводиться до вилучення не контрольованих домішок і дефектів з поверхні матриці, до відновлення атомарної поверхні та нанесення необхідної фази високого степеня стехіометрії. Для виконання цієї задачі необхідно реалізувати так званий суміщений процес (рис.1)



**Рис. 1.** Суміщений процес формування стабільної гетерофазної межі розподілу: 1 – напівпровідникова прокладка; 2 – природний оксид; 3 – розірвані хімічні зв'язки; 4 – стабілізація хімічних зв'язків; 5 – наращений функціональний шар.

Як бачимо, суміщений процес вимагає вилучення з поверхні напівпровідникової підкладки неконтрольованих за хімічним складом фаз, наприклад, природних оксидів, які утворюються в результаті контакту поверхні підкладки з атмосферою і технологічним середовищем ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ ). Далі, в єдиному технологічному циклі проводиться стабілізація підготовленої поверхні шляхом обробки її легкодисоціюючими сполуками, які містять атоми галогенів, сірки та інших стабілізуючих елементів. В цьому випадку проходить стабілізація розірваних зв'язків на поверхні напівпровідникової підкладки з утворенням комплексів, що стабілізують властивості межі розділу. Далі на заключному етапі наноситься необхідний шар напівпровідника, діелектрика чи металу у відповідності із структурними і геометричними принципами побудови стабільних міжфазних гетеромереж.

Метод МН дозволяє здійснити суміщений процес при досить низьких температурах, коли дифузійні процеси не відбуваються. Це дуже важливо для кремнієвої технології ВІС і стає принциповим в субмікронній технології ВІС та функціональних приладах на основі багатокомпонентних напівпровідників. Надзвичайно висока прецизійність росту при молекулярному нашаруванні дозволяє вже управляти ним на рівні моношару близько 0,3 нм та добиватися високої степені стехіометрії нанесеної сполуки, що стабілізує і мінімізує міжфазну межу.

Прикладом такого суміщеного процесу в методі МН є обробка Si – пластин із структурами в гексаметилдисалазані (ГМДС) перед нанесенням фоторезиста як маски для формування топології функціональних шарів з високою роздільною здатністю (меншою за 0,5 мкм), з малими планаризованими контактами (менше за  $0,5 \times 0,5$  мкм) та малим кроком розводки (меншим за 1,5 мкм) [6].

### 2. Стабілізація параметрів гетерофазної межі розподілу.

В технології формування межі розподілу існує проблема стабільності границі розподілу в залежності від температурних впливів радіаційної і фотонної обробки, плазмохімічної дії. Особливо характерна деградація властивостей шаруватих структур ВІС на основі багатокомпонентних напівпровідників. Вона, в першу чергу, визначається хімічною нестабільністю міжфазового гетеророзподілу. В цьому випадку швидкість деградації можна значно зменшити шляхом підбору і формування надтонкого шару безпосередньо на межі розподілу, хімічно інертного відносно пограничних фаз. Такий проміжний шар називається бар'єрним.

До бар'єрних шарів виставляються наступні вимоги. Кожен такий шар повинен бути досить тонким (меншим за 10 нм) щоб не впливати на кристалографічну природу границі розподілу. В цьому випадку бар'єрний шар успадковує природу матриці і формуючого функціонального шару, не порушуючи тим самим принцип структурної відповідності. Крім того бар'єрний шар має бути суцільним щоб забезпечити хімічну пасивацію поверхні. Прикладом такого бар'єрного шару можуть бути шари діоксиду та нітриду кремнію, за допомогою яких формують спейсери в затворній системі субмікронних структур МОН ВІС (рис.2). За допомогою спейсерної технології [6] забезпечується високоякісна планаризація поверхні структури для надійної металізації розводки, а також бічна пасивація затворної системи.

Враховуючи властивості методу МН, а саме, високу прецизійність росту (0,3 – 0,5 нм) швидко досягається суцільність покриття (через 5 -10 моношарів). За рахунок хемосорбційного механізму росту та низької температури процесу його формування забезпечується надійна стабілізація міжфазової межі розподілу.

Теплота утворення оксидів, які використовуються в ролі бар'єрних шарів, повинна бути за абсолютною величиною в декілька разів більшою, ніж у сульфиду цинку. Для позитивного ефекту при використанні бар'єрного шару у вигляді оксиду необхідно, щоб його нормований об'єм був меншим нормованого об'єму напівпровідника або функціонального шару структури ВІС. Наприклад, пасивація алюмінієвої металізації бар'єрним шаром, сформованим оксидуванням в гарячій деіонізованій воді [6], який забезпечує пасивацію металізації із алюмінієвих сплавів та мінімізує хіллокоутворення, що є причиною корозійного руйнування як контактів, так і розводки структур ВІС.

### 3. Модифікація поверхонь шаруватих структур.

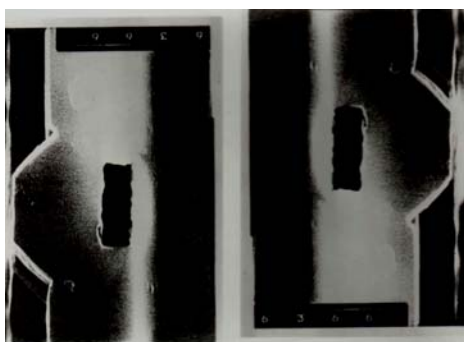
Зазвичай методи модифікування поверхні напівпровідників або функціональних шарів структур ВІС пов'язані з обробкою у водних розчинах [5].

Проте процеси модифікування, які проходять в різних реагентах, погано відтворюються і дуже залежні від чистоти самих реагентів.

Метод МН дозволяє достатньо просто модифікувати поверхню напівпровідників для різних цілей, наприклад, формувати один або декілька моношарів, що містять кисень, сірку чи азот, тобто проводити оксидування, сульфатування або нітридизацію поверхні.

В цьому випадку гомоморфна межа розділу формується за правилами відповідності нормованих об'ємів в системі напівпровідник – перехідна область – функціональний шар [6]. Зокрема, розроблений технологічний процес нітридизації підзатворного діелектрика структур МОН ВІС, який забезпечує термохвильову стабілізацію зарядового стану Si - SiO<sub>2</sub> або порогової напруги  $\Delta U$  - чи напруги плоских зон  $\Delta U_{ФВ}$ . Така гібридизація оксиду проводиться або з газового середовища кисню, легованого аміаком, ще при формуванні підзатворного діелектрика або швидким фотонним відпалом в атмосфері азоту.

При формуванні фотолітографічного рисунка (топології) на поверхні структур ВІС з високою планаризацією поверхні велике значення має адгезійна здатність поверхні оксиду, нітриду, полікремнію алюмінію, ФСС, БФСС, до плівок фоторезисту які наносяться при формуванні рисунка. Адгезія резистивної плівки до функціональних шарів структур ВІС знижується за рахунок наявності вологи в плівках оксиду, чи полікремнію і алюмінію. Це суттєво знижує роздільну здатність проєкційної літографії. Саме плазмова обробка пластин із структурами ВІС в парах гексаметилдісалазану підвищує на порядок адгезивні властивості фоторезисту ФП-051МК, що забезпечує анізотропне плазмохімічне травлення їх, та забезпечує крок



**Рис. 2.** Бар'єрні шари в спейсерній технології формування затворної системи структури МОН ВІС.

розводки, як по металу так і по полікремнію (силіциду) менше ніж 1,5 мкм. Така обробка

забезпечує модифікацію атомарно-чистої поверхні пластини.

Одним із найбільш перспективних методів МН є метод локального модифікування експонованих плівок фоторезиста та іонно-плазмового проявлення прихованого модифікованого зображення [6].

В основі методу лежить використання відомих в хімії високомолекулярних сполук реакцій модифікування полімерів та процесів літографії.

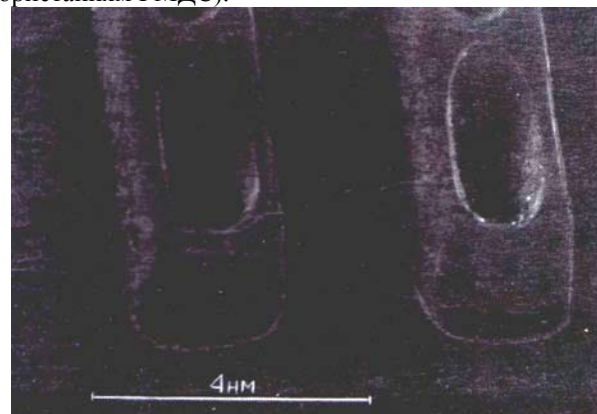
Сутність методу полягає в наступному:

- сильне поглинання актинічного випромінювання резистом і запис зображення в тонкому поверхневому шарі відносно товстого шару фоторезиста (приблизно 1 мкм);
- фіксування захованого зображення шляхом модифікування експонованих (або не експонованих) областей плівки резиста неорганічними або елементарно органічними сполуками, які вступають з резистом в хімічну взаємодію, так зване локальне модифікування;
- проявлення захованого модифікованого зображення анізотропним іонно-плазмовим травленням не модифікованих областей плівки, що зберегли елементарний склад.

Переваги локального модифікування при проєкційній літографії:

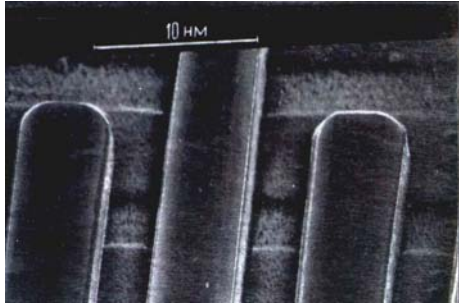
- виключення утворення стоячих хвиль та неконтрольованих засвіток інтерференції чи дифракції внаслідок використання висококонтрастного резиста;
- використання оптичних систем з високою числовою апертурою, що дає високу роздільну здатність;
- підвищення контрастності за рахунок іонно-плазмового анізотропного проявлення;
- можливість використання для захисту фотшаблонів від повторюючих дефектів.

Базовим процесом методу МН є локальне хімічне модифікування (ЛХМ) в основі якого є реакція силірування (введення триметилсилільної групи замість активного атома водню з використанням ГМДС).



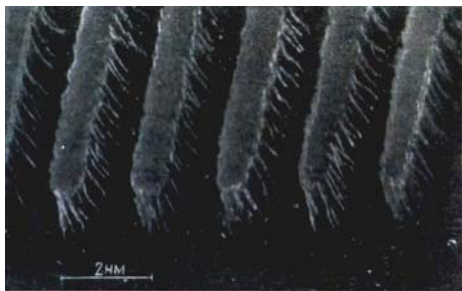
**Рис. 3а.** Негативний рельєф в плівці позитивного резиста ФП-051МК, сформований кисневим плазмовим травленням (модифікування ГМДС).

Дана технологія дозволяє отримувати як негативний так і позитивний рельєф в функціональних шарах (рис. 3). Особливо це важливо для формування захищених контактів у багаторівневій розводці (рис. 3а) та забезпечення малого кроку полікремнієвої чи алюмінієвої металізації (рис. 3б).

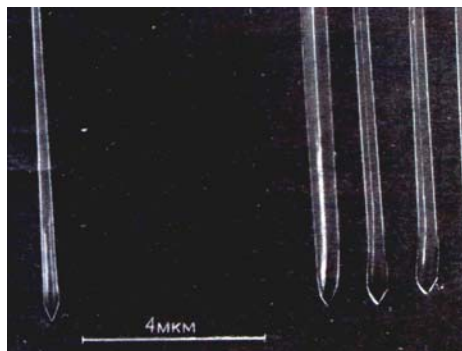


**Рис. 3б.** Позитивний рельєф в двошаровій структурі ВІС (модифікування ГМДС), що забезпечує крок розводки менше 1 мкм.

Даним методом визначалися граничні розміри, яких можна досягти проекційною літографією з використанням при експонуванні ртутно-ксеонової лампи ДРКс-500 з довжиною хвилі 193 нм та  $[(\text{CH}_3)_3\text{Si}]_2\text{NH}$  силіліруванням заекспонованої плівки резиста в гексаметилдіссалазані (ГМДС) (рис. 4).

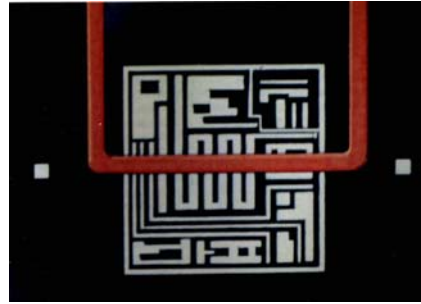


**Рис. 4а.** Формування позитивного рельєфу силіцидної розводки.



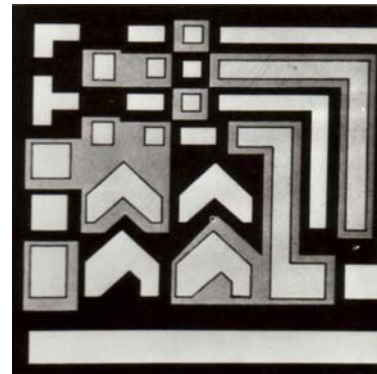
**Рис. 4б.** Модифікований електронний резист типу МАК для формування негативного рельєфу в шаруватих структурах.

Із рисунка видно, що процес дозволяє відтворювати нанорозміри. Особливо цікавий даний метод для локальної багатофазної епітаксії.



**Рис. 5.** Проміжний фотоортпал (ПФО) для проекційної літографії використовується із захисною плівкою реліктів.

Як метод МН для захисту фотошаблонів від повторюючих дефектів. Відповідна оцінка роздільної здатності субмікронної і наномікронної проекційної літографії проводилася за тестовою структурою, зображеною на рис 6.



**Рис. 6.** Тестова структура на визначення роздільної здатності проекційної літографії.

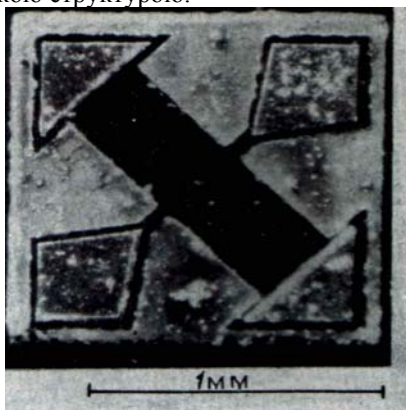
На рисунку 7 показана алюмінієва металізація субмікронних структур з використанням резиста ФП-051МК в парах ГМДС, що забезпечує крок металізації менше 1 мкм. Тут розмір протравленого рельєфу складає 0,1 мкм (відмітка на фото рис. 7).



**Рис. 7.** Модифікування фоторезиста ФП-051МК силіруванням в ГМДС для відтворення субмікронних розмірів по аргону (менше 1 мкм) алюмінієвої металізації.

Використовуючи процес модифікації позитивного фоторезиста ФП-051МК в парах гексаметилдіссалазана, можна зменшити площу металізованих контактів та розводки структур ВІС з

70% до 45-48%, що дасть можливість підняти вихід придатних субмікронних структур ВІС до рівня 50-60%. Наступна тестова структура (рис 8) називається холлівською структурою.



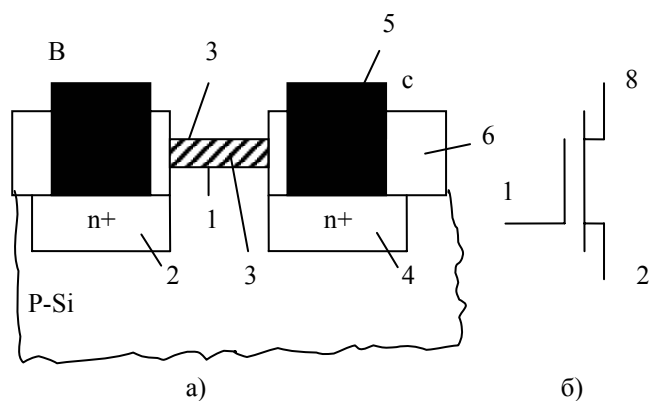
**Рис. 8.** Холлівська тестова структура, за допомогою якої визначається холлівська рухливість в шаруватих структурах чи каналах польових транзисторів як з індукованим каналом так і з модельованим легуванням.

## Висновки

Метод молекулярного нашарування можна застосувати з великим успіхом як в субмікронній, так і в нанотехнології формування структур ВІС з гетеро – і гомоморфними межами розділу для забезпечення високої термопольової стабільності шаруватих структур ВІС, виконаних на різних підкладках (Si, GaAs, і т.д.) з використанням проекційної літографії. Із вище викладеного матеріалу видно, що метод МН з використанням модифікації позитивного резисту типу ФП-051МК в проекційній літографії дозволяє довести топологічні розміри функціональних шарів, в тому числі багаторівневої розводки, до рівня електронної літографії. Причому рельєф можна створювати як позитивний так і негативний, а також виконувати на високому рівні профілювання захораних контактів.

## II. Спосіб тестового контролю якісного формування контактів

1. За останні роки польовий транзистор із структурою метал – окисел – напівпровідник (МОН) став реальною основою елементної бази Ві – К – Д – МОН – структур ВІС.



**Рис. 9.** Структура типового польового МОН – транзистора з металевим затвором: а) та його схемне позначення; б) 1- тонкий окисел затвора, 2 – витік, 3 – металевий електрод затвора або канал трьох - чи дисиліциду; 4 – стік; 5 – контакт достокової області; 6 – товстий шар оксиду.

Характеристики такого МОН – транзистора залежать від декількох параметрів, із яких найбільш важливим є постійна часу RC – ланка. Через R і C позначено відповідно повний ефективний опір і ємність затвора між'єднань даного рівня. Чим більше значення RC, тим менша швидкість функціональної структури. Зв'язок між величиною RC і розмірами структури є досить складним тому, що повна ємність залежить від характеристичного розміру та вигляду топології. Якщо приймати

$$R = R_s \frac{L}{W}, C = LW \epsilon_0 / t_{ok} \quad (1)$$

$$RC = R_s L^2 \epsilon_0 / t_{ok} \quad (2)$$

де L і W – відповідно довжина і ширина електрода затвора,  $\epsilon_0, t_{ok}$  – діелектрична постійна та товщина оксиду,  $R_s$  – поверхневий опір між'єднання:

$$R_s = \frac{\rho}{t}, \rho \text{ і } t - \text{питомий опір і товщина шару}$$

між'єднання. Таким чином, зменшення розмірів по вертикалі при якому зменшується  $t$  і  $t_{ok}$ , приводить до різного зростання RC ланки. При заданих  $t$  і  $t_{ok}$  величина RC залежить тільки від L і не залежить від W. Але для субмікронних розмірів ця залежність порушується із-за крайових польових ефектів. Крайовий ефект вносить суттєвий вклад в загальну ємність при ширині вже менше за 5 мкм, але при ширинях (W більше за 5 мкм) ним можна знехтувати. На рис. 10 показана залежність прольоту електронів в структурі від характеристичного розміру статичної мішені з полікремнієвим затвором та із затвором із тугоплавкого металу. Очевидно, що час прольоту носіїв зростає для структур із характеристичним розміром менше за 2 мкм. Ці криві характеризують ефект обумовлений високим опором між'єднань, який визначається ступенем профілювання контактних вікон, частотою контактних вікон, їх

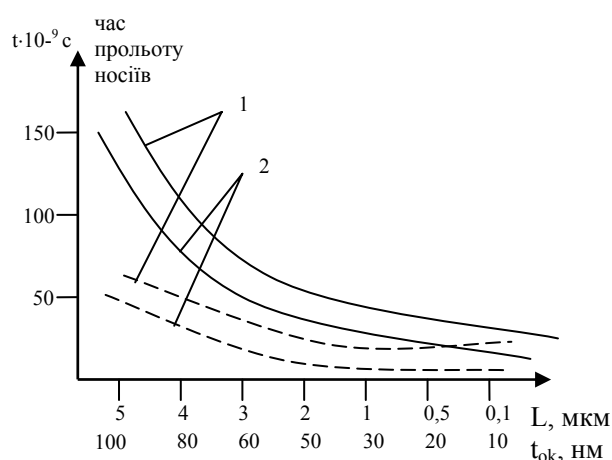
ступенем легування, сегрегацією домішок, типом затвора та багаторівневої розводки, її кроком. Ряд дослідників проводили розрахунок повної ємності розводки від ширини електроду затвора. Вони подали повну ємність у вигляді суми трьох складових:

$$C = C_A + C_B + C_S \quad (3)$$

де  $C_A, C_B, C_S$  – відповідно позначають власну ємність паралельного площинного конденсатора згідно виразу (1), ємність нижньої межі металу над затворним оксидом та ємність бічних стінок.

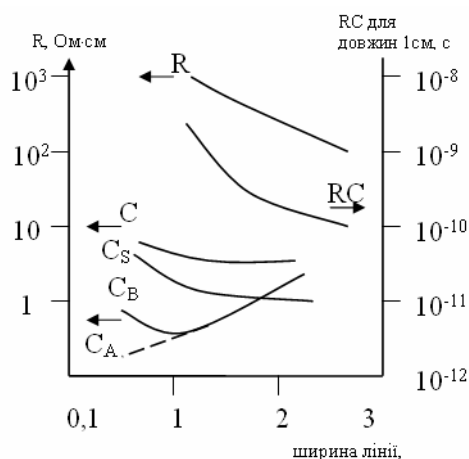
## 2. Теоретичні розрахунки і аналіз результатів.

Дослідженнями встановлено, що при ширині затвора меншій за 3 мкм ємність бічних стінок вносить основний вклад в повну ємність структури.



**Рис. 10.** Залежність часу прольоту носіїв заряду від товщини каналу  $L$  (суцільна лінія) та товщини підзатворного діелектрика  $t_{ок}$  для різних затворів: 1 – полі – Si –затвор (20 Ом/на одиницю площі) і 2 – силіцидний затвор (1 Ом/на одиницю площі).

На рис. 11 подано залежності ємності, опору і постійної ланки ( $RC$ ) в залежності від норми проектування (ширини лінії). Ці дослідження проведені для структури, що містить нітрид кремнію товщиною 0,2 мкм, який покриває доріжку алюмінію Al, товщиною 1 мкм, яка, в свою чергу, знаходиться на плівці двооксиду кремнію товщиною 0,6 мкм. Величина  $RC$  майже не залежить від ширини лінії, яка більше за 3 мкм.

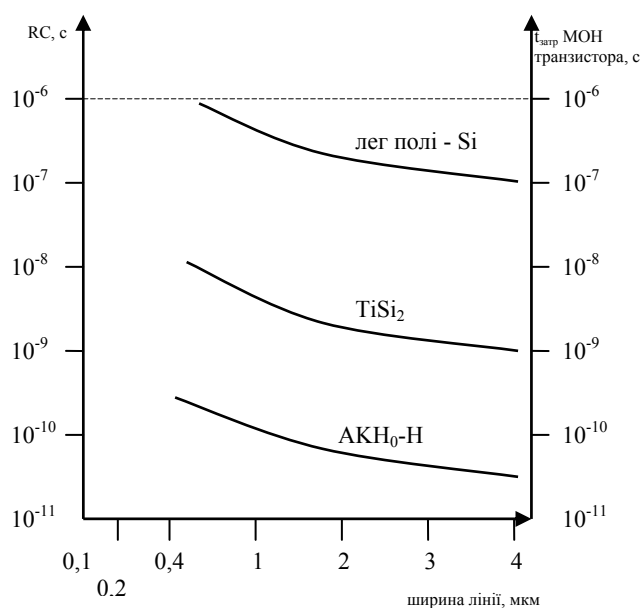


**Рис. 11.** Залежність ємності, опору і постійної часу  $RC$  ланки від норми проектування для лінійного провідника  $l = 1$  см ( $C_A$  – власна ємність,  $C_B$  – ємність нижньої межі металу,  $C_S$  – ємність бічних стінок,  $C$  – загальна ємність).

На рис. 12 показані залежності постійної часу  $RC$  і часової затримки в польовому транзисторі з МОН структурою та з  $n$ -каналом, затвори якого виконані з легуваного полі – Si, дисиліциду титану, алюмінієвого сплаву  $AKH_0-H$ .

Струмопровідна система із силіциду забезпечує покращення часових властивостей в порівнянні з полі – Si майже на порядок, тоді як для алюмінієвого сплаву такі часові характеристики на 1,5 – 2 порядки кращі, ніж у силіциду  $TiSi_2$ .

Дослідження також показали, що при ширині лінії меншій за 2 мкм на сталу часу  $RC$  впливає діелектрична константа міжшарової ізоляції, товщина підзатворного тонкого оксиду і товщина електроду затвора. Це свідчить про те, що треба шукати технологічні способи зниження поверхневого опору силіциду менші за 1 Ом (чи питомого опору меншого за 10 мкОм/см), покращувати контактний опір і його температурну стабільність, знижувати висоту потенціального бар'єру між металом і напівпровідником.



**Рис. 12.** Залежність сталої RC для легованого фосфором полі – Si (30 Ом/на одиницю площі), TiSi<sub>2</sub> (1,2 Ом/на одиницю площі) на підзатворному оксиді товщиною 250 Å, а також для алюмінієвого сплаву AKH<sub>0</sub>-H (0,029 Ом/на одиницю площі) на підзатворному діелектрику товщиною 500 Å для різної ширини лінії.

Вирівнювання рівнів Фермі на контакті приводить до появи потенціального бар'єру, який вносить заряд в перехідну область між металом і напівпровідником. Такий бар'єр називають бар'єром Шотткі і він зумовлений різною роботою виходу металу і напівпровідника. Якщо  $\phi_M > \phi_{n-ка}$ , то контакт з металом буде випрямляючим і, навпаки, якщо  $\phi_M < \phi_{n-ка}$ , то контакт вже не буде випрямляючим. Вольт-амперна характеристика для бар'єру Шотткі записується у вигляді:

$$J = A^* T^2 [\exp(-qY\epsilon / KT)] \cdot [\exp(qY\epsilon / KT) - 1] \quad (4)$$

де  $A^*$  – постійна Річардсона, яка визначається ефективною масою електрона.  $T$  – температура в Кельвінах,  $q$  – заряд електрона,  $Y\epsilon$  – висота бар'єру Шотткі,  $R$  – стала Больцмана,  $n$  – коефіцієнт, що визначає генераційно-рекомбінаційні процеси на бар'єрі ( $n = 1/2$ ).

Цікаво, що величина потенціалу Шотткі  $Y\epsilon$ , яка визначена із вольт-амперних характеристик, знаходиться в межах від 0,55 еВ до 0,7 еВ. Наприклад, для TiSi<sub>2</sub> вона дорівнює 0,6 еВ, а для MoSi<sub>2</sub> вона рівна 0,55 еВ.

Дослідженнями встановлено 5 важливих факторів, які визначають висоту бар'єра Шотткі для силіцида на кремнії:

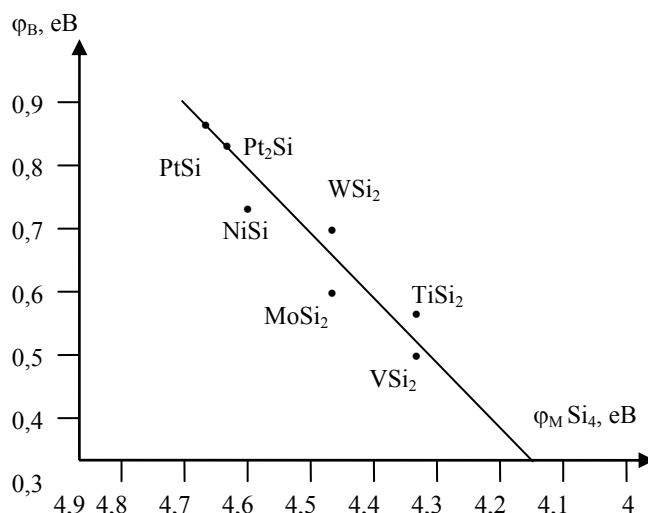
- 1) робота виходу металу  $\phi_M$ ;
- 2) кристалічна чи аморфна структура на межі розподілу Me - Si<sub>2</sub>;

- 3) утворення пасток металом, який дифундує в кремній;
- 4) електронна конфігурація зовнішніх оболонок атомів металу;
- 5) степінь легування напівпровідника.

Робота виходу силіциду визначається за формулою Фріоуфа:

$$\phi_M Si_4 = (\phi_M \phi_{Si}^4)^{1/5} \quad (5)$$

На рис. 13 подані вже значення висоти бар'єру Шотткі в залежності від роботи виходу проміжного шару силіциду згідно формули (5).



**Рис. 13.** Залежність висоти бар'єра Шотткі та n - Si від середньої роботи виходу  $\phi_M Si_4$ .

Таким чином, зменшення роботи виходу металу  $\phi_M$  веде до зменшення роботи виходу перехідного силіциду, який і визначає висоту бар'єру Шотткі.

На рис. 14 аналогічним чином подана залежність висоти бар'єра Шотткі від теплоти утворення силіциду:

$$\phi_B = 0,83 - 0,18 \Delta H \quad (6)$$

Згідно цього виразу висота бар'єру Шотткі не повинна перевищувати 0,73 еВ.

Дослідження показали, що роботу виходу  $\phi_B$  можна регулювати шляхом зміни рівня легування поверхневих шарів Si. Для створення заданого поверхневого концентраційного профілю може бути використана як іонна імплантація так і дифузійні процеси. Дуже ефективним в цьому плані є імплантація донорів в n - Si, або імплантація акцепторів в p - Si. Для переводу аморфного поверхневого шару в кристалічний рекомендується швидкий імпульсний відпал імпантованих шарів.

Для зменшення сегрегації між Si і силіцидом необхідно сильно легувати n+ - Si чи p+ - Si шари легувати багатозарядними домішками з великим іонним радіусом типу VF<sub>3</sub><sup>+</sup> чи PF<sup>+</sup>, які сильно зменшують коефіцієнти дифузії (майже на 1 – 2 порядки), що і виключає сегрегацію на межі

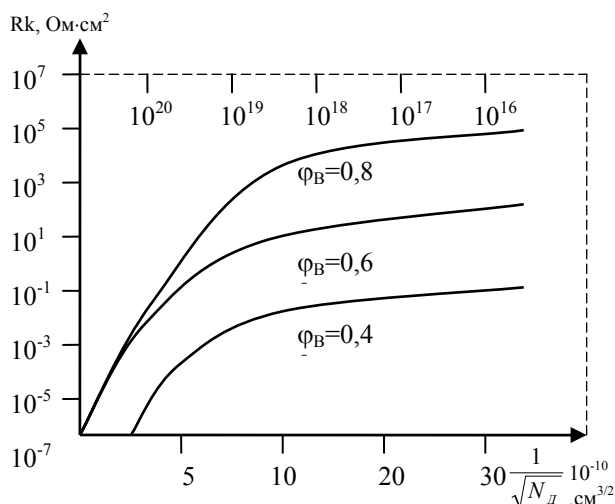
розподілу Si – силіцид.

Таким чином, для створення непрямої контактів між Si та силіцидом необхідно створити сильнолеговані n<sup>+</sup> чи p<sup>+</sup> – області багатозарядними іонами типу BF<sup>++</sup>, VF<sub>2</sub><sup>++</sup>, PF<sup>++</sup>, AsF<sup>++</sup>, які і забезпечать мілкі p-n – переходи міжвиткових областей польових МОН – транзисторів.

Формування добрих контактів є дуже важливим для роботи субмікронних ВІС. Високоякісний контакт, який формується методом нанесення металу на напівпровідник, не впливає на характеристики та температурну стабільність структур, крім того його опір, що називається перехідним опором контакту, є незначним у порівнянні з опором областей біполярних чи МОН транзисторів. Як уже зазначено вище, всі контакти метал – напівпровідник, мають потенціальний бар'єр, який приводить до ефекту випрямлення на контакті. Контакт тим кращий, чим менша висота бар'єру. Але один і той самий метал не може мати низьку або близьку до нуля висоту бар'єра відносно напівпровідника як n-, так і p-типу. Метал, який має низький бар'єр на Si n-типу, буде утворювати бар'єр на кремнії p-типу, і навпаки. Ця проблема розв'язується тим, що під шаром металу формується сильно легований напівпровідник. Тоді протікання струму забезпечується електронним тунелюванням через бар'єр і утворюється майже омичний контакт. Питомий контактний опір R<sub>k</sub> (Ом/см<sup>2</sup>) визначається виразом:

$$Rk = \frac{\left(\frac{dU}{dy}\right)}{U} = 0 \quad (7)$$

Цей опір можна визначити за вольт-амперною характеристикою. Його величина сильно залежить від степені легування напівпровідника (рис. 14).



**Рис. 14.** Залежність питомого перехідного опору контакту R<sub>k</sub> від концентрації домішки N<sub>d</sub> та висоти бар'єру Шотткі.

Із рисунка видно, що опір R<sub>k</sub> швидко зменшується із збільшенням концентрації легуючої

домішки N<sub>d</sub> та зменшенням висоти бар'єру Шотткі. Якщо N<sub>d</sub> більше за 10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>, то вже переважає струм, зумовлений тунельним ефектом проходження електронами через бар'єр, і величина R<sub>k</sub> є досить малою. Крім того, опір R<sub>k</sub> залежить від температури. Чим вища температура, тим нижча величина контактного опору. Це справедливо тільки для низьких концентрацій домішок N<sub>d</sub> = 10<sup>16</sup> – 10<sup>17</sup> см<sup>-3</sup>. Як правило, питомий перехідний опір контакту R<sub>k</sub> визначають із вимірювань загального опору контактів різного діаметра. Загальний опір є сумою опору розтікання обумовленого опором напівпровідника, перехідного опору контакту та інших опорів, зв'язаних із схемою вимірювання. Тоді величина загального опору визначається за формулою:

$$R_{\Sigma} = \frac{\rho}{\pi d} \arctg \left( \frac{4t}{d} + \frac{4Rk}{\pi d^2} + R_0 \right) \quad (8)$$

де ρ – питомий опір напівпровідникового матеріалу, d – діаметр контакту, t – товщина напівпровідника, R<sub>0</sub> – інший опір, пов'язаний із схемою виміру.

В іншій моделі планарного контакту, де струм в контактах протікає так, як в «довгій лінії» передачі, вертикальна структура напівпровідника до уваги не береться, а розглядається контакт, де основна частина струму протікає в горизонтальному напрямі (індуктивна складова), яка приводить до росту струму біля краю контакту. Згідно цієї моделі «довгої лінії» повний опір напівпровідникового резистора шириною W і довжиною L між двома контактами описується виразом:

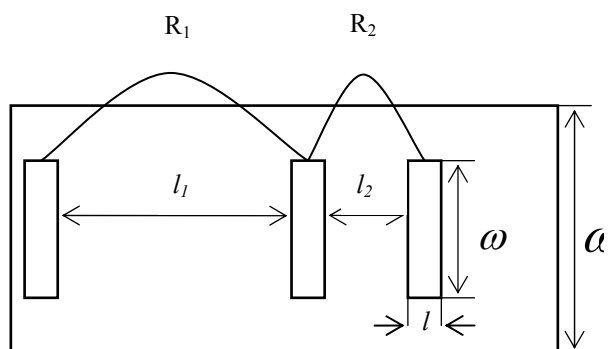
$$R_{\Sigma} = R_s \frac{L}{W} + 2R_{k_0} \quad (9)$$

де R<sub>k<sub>0</sub></sub> – перехідний опір контакту (Ом), а R<sub>s</sub> – поверхневий опір дифузійного шару напівпровідника (Ом/на одиницю площі). Якщо контакти мають ширину ω і довжину l і при цьому ω = W, то контактний опір:

$$R_{k_0} = \left[ \frac{\sqrt{(R_s \cdot Rk)}}{\omega} \right] \operatorname{ctg} \left[ l \sqrt{\frac{R_s}{Rk}} \right] \quad (10)$$

Таким чином, при збільшенні довжини контакту l величина R<sub>k<sub>0</sub></sub> наближається до значення  $\frac{\sqrt{(R_s \cdot Rk)}}{\omega}$  і, якщо відомі R<sub>s</sub> і ω, то можна розрахувати R<sub>k</sub>. Величину R<sub>k<sub>0</sub></sub> можна також визначити, вимірюючи R<sub>Σ</sub> на резисторі за трьома аналогічними контактами (тобто з однаковими ω і l), які розміщені на різних віддалях, використовуючи вираз (9). Тестова структура для проведення вимірювань подана на рис 15.



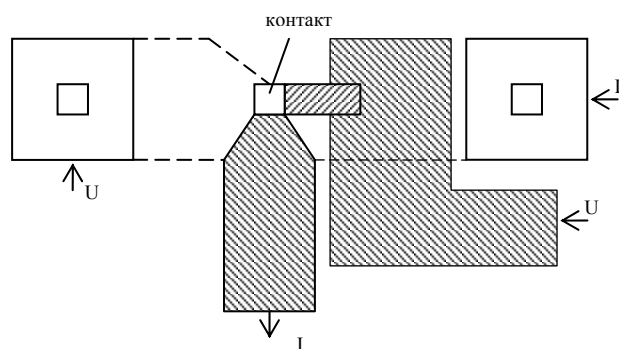


**Рис. 15.** Тестова структура для визначення перехідного опору  $R_k$ .

В цьому випадку:

$$R_{k_0} = \frac{R_2 l_1 - R_1 l_2}{2(l_1 - l_2)} \quad (11)$$

Перехідний контактний опір можна безпосередньо виміряти, якщо використати чотирьох - зондовий метод з використанням тестових структур Ван – дер – Пау (рис. 16).



**Рис. 16.** Тестова структура Ван – дер – Пау для вимірювання контактного опору.

Проникнення контакту в зону р – n – переходу можна виключити шляхом використання силіцидів, або поліцидів чи силіцид – метал. Із викладеного матеріалу видно, що для зменшення контактного опору між з'єднань необхідно забезпечити:

- 1) профілювання вікон під контакти;
- 2) якісне травлення донної частини контакту від  $\text{SiO}_2$  або ФСС;
- 3) якісний тестовий контроль формування субмікронних контактів багаторівневої силіцидної розводки;
- 4) температурну компенсацію опору в контактні за рахунок від'ємного ТКО кремнію та позитивного

ТКО силіциду титану ( $\text{TKOSi} = - 3 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ ,  $\text{TKOTiSi}_2 = 4,510^{-3} \text{K}^{-1}$ );

- 5) наближення температурних коефіцієнтів лінійного розширення (ТКЛР) силіциду до кремнію;
- 6) подавлення перерозподілу (сегрегації) домішок в контактах при їх імпульсному випалюванні.

### 3. Застосування тестових структур.

Осадження міді проводиться в контакти на спеціально підготовлених тестових структурах з використанням розчинників:

320 см<sup>3</sup> деіонізованої води, 8см<sup>3</sup> 49% HF, 8см<sup>3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> і 8г CuSO<sub>4</sub>;

320 см<sup>3</sup> деіонізованої води, 8см<sup>3</sup> 49% HF і 8г CuSO<sub>4</sub>;

320 см<sup>3</sup> деіонізованої води, 4см<sup>3</sup> 49% HF і 4г CuSO<sub>4</sub>;

При наявності атомарно чистої поверхні в донній частині контактів проходить осадження суцільної плівки міді на моно - Si . Якщо контактні вікна не достатньо якісно відкриті, то мідь або не буде осаджуватись, або плівка міді буде неоднорідною.

На іншій тестовій структурі аналогічним чином перевіряється якість контактів уже після металізації сплавом АКН<sub>0</sub>-Н або дисиліцидом титану TiSi<sub>2</sub> уже після їх імпульсного випалювання швидким фотонним відпалом. Попередньо із тестових структур з використанням ортофосфорної кислоти чи суміші Каро проводиться якісне зняття алюмінієвого сплаву чи дисиліциду титану з контактних вікон із наступним осадженням міді із вищезгаданих розчинів.

При наявності кремнію в контактах мідь осаджується суцільною плівкою, а в протилежному випадку плівки міді або взагалі не буде, або вона буде острівною.

Аналогом до вказаної процедури може бути спосіб контролю контактів за допомогою тестової структури Ван – дер – Пау, викладений в [6].

Контроль процесу відкриття вікон під контакти здійснюється за допомогою спектрофотометра, який монтується до оглядового вікна вакуумного ковпака установки плазмохімічного травлення з використанням відповідного світлофільтра.

Момент закінчення процесу плазмохімічного травлення відповідає перетворенню в нуль інтенсивності вибраної спектральної лінії (СПЛ), яка реєструється самописцем.

**Атаманюк Р.Б.** – аспірант кафедри прикладної фізики фізико-технічного факультету.

- [1] В.Б. Аніковський. Химия твердых веществ. Высшая Школа, М. 350с. (1988).
- [2] M. Pessa, R. Makella. Characterisation fo surface exchange reaction used to grow compound fields // *Apple Phisic lett.*, **38** (2, 1). pp. 1196-1201 (1981).
- [3] J. Huvarinen, M. Sonninen. Masspectrometry study of ZnS atomic layer epitacsy process // *Journal cristall growth*, **86**, pp. 695-697-(1988).
- [4] J. Nishisava. Molecular Layer Epitacsy // *Journal electrohim. Soc.*, **132**, pp. 1196-1198 (1985).

- [5] А.В. Смельянов. Граница раздела – ключ к построению приборов функциональной электроники // *Электронная промышленность*. **В.86** сс. 36-38 (1983).
- [6] С.П. Новосядлий. Фізико-технологічні основи субмікронної технології формування структур ВІС. Сімик, Івано-Франківськ. с. 351 (2003).

R. Atamanyuk

## **Possibilities of Molecular Stratification and Method of Test Control of Contacts High-Quality Forming in Submicron Structures BIC**

*Precarpathian national university named after V.Stefanyk  
e-mail: roman.atamanyuk@mail.ru*

Technological receptions by which it is possible to lower potential barriers between metal and alloyed semiconductor and measure transitional contact supports are examined. After the high-quality opening and profiling of contacts in an interlaminar isolation on specially geared-up test structures, besieging of copper is conducted in contacts, utilizing the special solvents. At presence of atomic clean surface in the ground part of contacts besieging of continuous tape of copper passes on mono - Si . If contact windows are high-quality not enough opened, copper either will not be besieged, or tape of copper will be heterogeneous.