

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ
Центр заочного та дистанційного навчання

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ТРАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ЯК БАЗОВОЇ
ІНТЕГРАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

студента гр. ЕІ₃-71_к

В.В. Кайнари

Науковий керівник,
к.ф.-м.н., ст. викладач

І.П. Бурик

Конотоп 2021

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ПЛАЗМОВОГО ТРАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ	5
1.1 Застосування плазмових технологій у приладобудуванні.....	5
1.2 Травлення діелектричних шарів тривимірних наноструктур.....	10
1.3 Формування затворів МОН транзисторів.....	16
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	21
2.1 Основи проектування в Silvaco TCAD	21
2.2 Налаштування моделювання процесу травлення матеріалів.....	22
2.3 Інструменти для створення «машини травлення».....	25
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	28
3.1. Травлення канавок із заданими кутами нахилу стінок.....	28
3.2 Травлення канавок з використанням моделі RIE.....	29
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33
ДОДАТОК А. СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ	35

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є процес травлення матеріалів для виготовлення елементів мікросхем.

Мета роботи полягає у дослідженні впливу умов травлення матеріалів на формування структури елементів мікро- та наноелектроніки при використанні комп'ютерного моделювання.

Робота складається із вступу, трьох розділів основної частини та висновків. У першому розділі наведено огляд сучасних методів плазмового травлення матеріалів. У другому розділі розглядається методика комп'ютерного моделювання процесу травлення матеріалів за допомогою програмного пакету Silvaco TCAD. У третьому розділі наведено результати моделювання ізотропного та анізотропного травлення кремнію, а також метод реактивного іонного травлення.

Робота викладена на 36 сторінках, у тому числі включає 14 рисунків, 2 таблиці, список цитованої літератури із 23 джерел, 1 додатку.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТРАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ, ПЛАЗМОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ІНТЕГРАЛЬНА МІКРОСХЕМА, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ВСТУП

Постійне збільшення рівня інтеграції елементів, а також розробка нових технологій створення НВІС стимулює збільшення роздільної здатності процесів травлення шарів з використанням низькотемпературної плазми [1-10]. Зокрема, при виробництві схем надвисокої ступеня інтеграції (НВІС), до процесів травлення пред'являються безпрецедентні вимоги по рівномірності. Характерною вимогою для формування елементів схем плазмовими методами при топологічних нормах 0,1 мкм і менше є досягнення високої анізотропії травлення при одночасно "м'якому" впливі на нижній шар, що виражається у вимозі практичній відсутності його стравлювання і мінімального рівня внесених в нього радіаційних ушкоджень. Все це повинно бути забезпечено при одночасному досягненні значних (близько 0,5 мкм/хв) швидкостей травлення, необхідних для отримання необхідної продуктивності процесу [11-20], оскільки обробка підкладок проводиться індивідуально.

На сучасному етапі при виробництві кристалів НВІС перед технологами та розробниками технологічного обладнання стоїть завдання створення повністю замкнутої і інтегрованою в просторі системи. Основними перешкодами на шляху вирішення даної проблеми є рідинні процеси нанесення і прояви фоторезистивних масок, хіміко-механічної планарізації функціональних шарів і хімічної очистки поверхні підкладок [21-29]. Тому провідні зарубіжні фірми проводять експериментальні дослідження (комп'ютерне моделювання) з метою заміни цих процесів на «сухі», що проводяться в вакуумі з використанням лазерних та іонних пучків і газорозрядної плазми.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД МЕТОДІВ ПЛАЗМОВОГО ТРАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Застосування плазмових технологій у приладобудуванні

В даний час процеси з використанням низькотемпературної газової плазми знайшли широке застосування в технології виготовлення твердотільних приладів і пристроїв наноелектроніки. Ці процеси можна об'єднати в три великі групи [1-13]:

- видалення матеріалу з поверхні твердого тіла (всі види розпилення, травлення і очищення),
- нанесення матеріалу на поверхню твердого тіла (хімічне з газової фази, фізичне з матеріалу мішені, фізико-хімічне з матеріалу мішені, що модифікується в газовій фазі),
- модифікація поверхневого шару твердого тіла (окислення, анодування, нітридизація, легування іншими елементами, гетерування, відпалювання, стуктурування).

Вимоги до сучасних плазмовим технологій представлені в табл.1.1 [4].

Таблиця 1.1

Вимоги до сучасних плазмових технологій

Виробничі обмеження	Вимоги до плазми
Контроль критичних розмірів НВІС	Мінімальна кутова розсіювання іонів
Висока селективність до нижчого прошарку	Незалежний контроль щільності іонного потоку і енергії іонів
Висока продуктивність для зниження собівартості	Висока щільність іонного потоку для збільшення швидкості травлення
Мінімальний вплив на оброблювану поверхню.	Низькі енергії іонів для зниження радіаційних впливів.

Зросли вимоги до плазмових процесів викликані використанням в технології виготовлення ІМС більш тонких фоторезистів з високою роздільною здатністю і як правило володіють меншою плазmostійкістю; збільшеними Аспектне співвідношеннями, які зажадали спеціальних конструктивних рішень; а також зростанням вимог до селективності, такими, наприклад, як вимога, щоб формовані контакти були самосумісні.

Відповідні розрахункові значення технологічних характеристик процесів плазмового травлення функціональних шарів НВІС для виробів класу ДОЗУ 64М наведені в табл.1.2 [4].

Орієнтири, наведені в табл.1.1 - 1.2, однозначно показують неможливість використання класичних технологій плазмового травлення, оскільки при цьому досягнення необхідної величини одного з параметрів процесу, наприклад анізотропії і швидкості травлення, призводить до однозначного погіршення інших характеристик, наприклад селективності травлення до нижчого прошарку або ступеня радіаційних ушкоджень поверхні.

Таблиця 1.2

Розрахункові значення технологічних характеристик процесів плазмового травлення

Параметр	Операція травлення затворів	Операція травлення контактних вікон	Операція травлення канавок
Швидкість травлення, мкм / хв	0,34	0,57	6,3
Селективність травлення функціонального шару до підслою	81	17	-
Селективність травлення функціонального до маски	1,5-3,6	2,3	34
анізотропія травлення	20	35	300

Подальше збільшення щільності монтажу і технологічні обмеження наказують більш жорсткі вимоги до зміни ширини лінії по діаметру пластини, мікрозагрузочному ефекту і вноситься дефектності.

В результаті системи плазмового травлення для критичних рівнів технології (менше 0,1 мкм) постійно удосконалюються і від традиційних багатофункціональних систем травлення в плазмі з ємнісний зв'язком переходять до систем із середньою і високою щільністю плазми, що використовують спеціальні і сильно полімеризуючі газів середовища, розроблені виключно для одного типу оброблюваної плівки [10-13].

На сьогоднішній день тенденції розвитку технології плазмового травлення в наноелектроніки вимагають переходу від використання відносно простих паралельно - плоских конфігурацій реакторів для різних типів плівок, до реакторів з багаточастотними генераторами, електростатичними притисками, зовнішнім контролем температури стінок, різними датчиками контролю процесу, спроектованих для обробки конкретного виду плівки, вартістю, що досягає декількох мільйонів доларів [5-7].

Тим часом спостерігалось і використання більш складних газових хімічних систем, які використовуються для травлення матеріалів, еволюціонували відповідно до вимог до селективності і аспектного відношенню. Прості системи, засновані на хлор - і фторовмісних газах розвинулися в різноманітні композиції спеціалізованих газів з незалежним контролем полімеризації і травлення. Тенденції вдосконалення обладнання для плазмохімічного травлення в субмикронной технології наноелектроніки виражаються в наступному [8]:

- зниженні робочого тиску до рівня $10^{-4} - 10^{-2}$ Торр;
- зниженні температур підкладки в процесі обробки до кімнатних або нижчих (охолодження);
- зниженні енергії іонів, що бомбардують підкладку, в процесі обробки від 100 до 10 еВ по порядку величини;

- збільшенні щільності потоків іонів і радикалів на кілька порядків величини за рахунок збільшення щільності плазми ($10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$).

Робота з високоплотною плазмою при низькому тиску забезпечує більш тонку область просторового заряду і, відповідно, меншу ймовірність розсіювання іонів в цьому проміжку, що гарантує більшу анізотропію процесу травлення.

В даний час найбільший розвиток отримали три типи плазмохімічних реакторів (джерел плазми), кожен з яких має багато модифікацій [8]:

- джерело НВЧ - плазми, порушуємо в умовах електронного циклотронного резонансу (ЕЦР СВЧ - П),
- джерело ВЧ - плазми в умовах порушення Гелікон хвилі (ГПП),
- джерела ВЧ - плазми з індуктивної (ІСП) або трансформаторної зв'язком (ТСП).

Головні труднощі у створенні джерел щільної плазми полягає в необхідності виключення ємнісний зв'язку. Однак, це не єдина проблема їх розробки, перерахуємо основні з них [8]:

- система подачі газу повинна створювати рівномірний потік газу на підкладку,
- основний процес повинен бути поєднаний в технологічному модулі з періодичної плазмової очищенням стінок камер і інших внутрішніх поверхонь від депозиту без формування частинок,
- матеріали внутрішніх стінок камер повинні протягом основного процесу допускати рівномірне осадження деякого депозиту без лушення, що в іншому випадку може бути джерелом утворення частинок, аж до моменту ручної рідинного очищення джерела і технологічного реактора.

Однак, в основному, вибір системи плазмового травлення визначається її продуктивністю і вартістю.

Важливою тенденцією розвитку мікроелектроніки в сучасних умовах є інтеграція технологічних процесів, яка реалізується за допомогою технологічних кластерних установок, в яких поєднуються кілька технологічних модулів, що оточують центральний робот, що передає пластини послідовно з

одного модуля в інший в умовах вакууму. Конструкція установки даного типу показана на рис.1.1 [10].

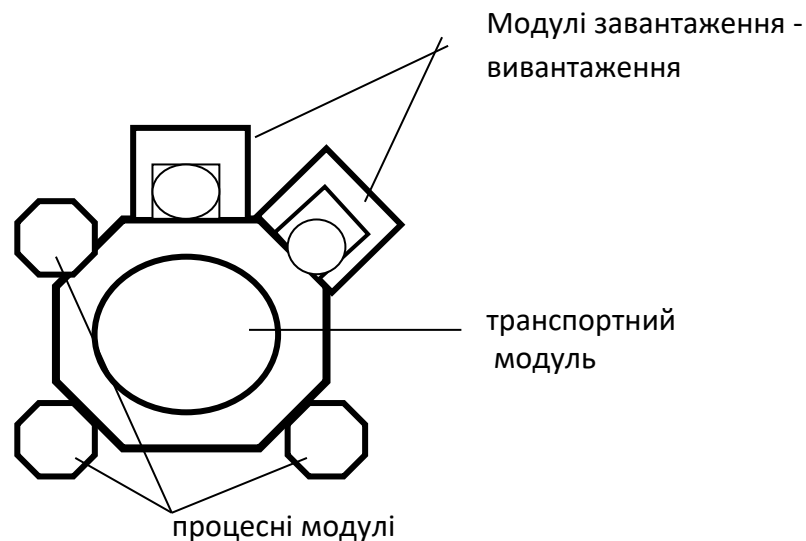


Рис.1.1. Схема кластерної установки [10]

При цьому слід зазначити, що обробка пластин в кластерах зменшує рівень вноситься дефектності і виключає вплив атмосфери на працездатність елементів ІС пластини.

Іншою важливою причиною впровадження кластерного обладнання є можливість найбільш економічного і ефективного використання розроблюваних нових процесів, що реалізуються в процесних модулях.

Дійсно, в цьому випадку немає необхідності у виготовленні нової дорогої установки з усією інфраструктурою, що включає системи завантаження - вивантаження і транспортування пластин, управління, забезпечення вакуумом і енергоносіями. У кластері використовується економічна конструкція робочої камери, адаптована до нового процесу, і її стикування на вільну позицію транспортного модуля. Тільки після того, як модуль з новим процесом доводить свою ефективність у порівнянні зі старим, він повністю витісняє останній з кластерного обладнання.

1.2. Травлення діелектричних шарів тривимірних наноструктур

Завдяки великій енергії зв'язку при травленні оксиду кремнію потрібні системи, засновані на фторсодержащих газових сумішах і сильною іонною бомбардуванням оброблюваної поверхні. Вертикальні профілі травлення досягаються завдяки пасивації бічних стінок за рахунок введення в плазму вуглеродсодержащих компонентів. Сильна іонна бомбардування необхідна для видалення полімеру з горизонтальних поверхонь, а також для подвода активних частинок до поверхні оксиду для подальшої освіти летючого SiF_x . При травленні діелектриків необхідно оптимізувати співвідношення швидкостей процесів полімеризації і РІТ, щоб одночасно забезпечити як вертикальний профіль травлення, так і зупинку процесу травлення на нижележащем шарі. У той час як розмір вікон твердої маски зменшується до 0,1 мкм і менше, аспектне співвідношення зростає до 7: 1 і більше. Потік радикалів та іонів на нижню поверхню цих структур зменшується через зіткнення з бічними стінками структури і іншими частинками. Продукти травлення ($\text{Si}_x\text{F}_y\text{O}_z$ і C_xF_y) не можуть вільно дифундувати з таких структур, що призводить до інтенсивної полімеризації в області дна структури, що створює конічний профіль травлення і погану передачу розмірів маски.

При плазмовому травленні контактних (перехідних) вікон в діоксиді кремнію (рис.1.2) необхідно не тільки точно відтворити розміри вікна, але і зупинитися на поверхні нижчого шару, наприклад, на поверхні нітриду кремнію, який діє як стоп - шар, що ізолює нижележащие провідники або на поверхні полікремнію. В іншому випадку можуть або недовскритись контактні вікна в діелектрику, або протрави нижележащие провідники. Як в одному, так і в іншому випадку схема стає непрацездатною. Тому при проведенні даної операції селективність до нижчого матеріалу грає першорядну роль і процес травлення (газові суміші, тип реактора і т.д.) вибирається так, щоб забезпечити достатню полімеризацію для захисту нижчих шарів [4-11].

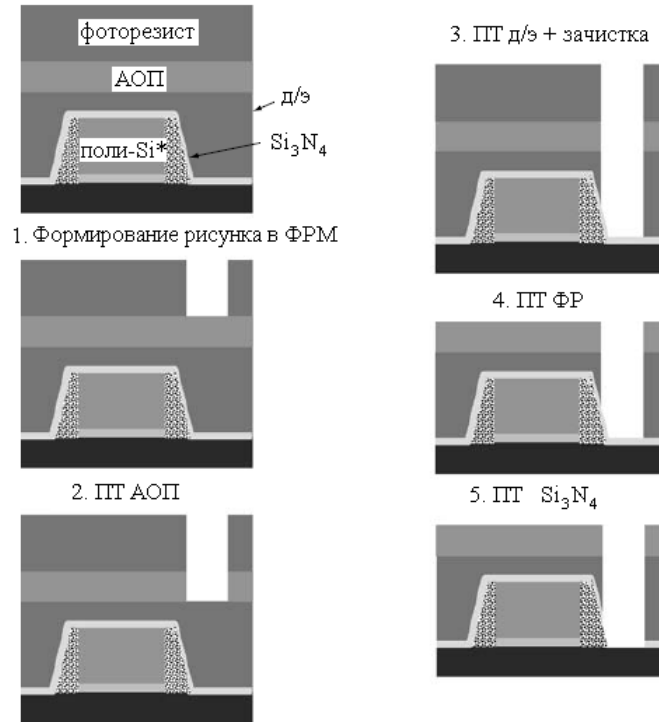


Рис.1.1. Схема формування контактної вікна плазмовим методом [4]

Традиційні комбінації газів для травлення діелектриків (наприклад, CHF_3/CF_4) використовувалися для забезпечення селективності травлення окисла по відношенню до нижчого кремнію. У виробництві сучасних пристроїв наноелектроніки спеціалізовані газові склади, необхідні для зупинки травлення окисла на нітриді або нітриду на оксиді, стали грати все більш важливу роль. Через ємнісних обмежень стоп шар в сучасних логічних схемах повинен бути досить тонким - в діапазоні від декількох сотень ангстрем до 50 ангстрем. В цілому, селективність може бути досягнута або шляхом використання газової суміші, що утворює полімер на нижньому шарі або не утворюються з нижнім шаром летючих з'єднань. Процес, заснований на осадженні полімеру, повинен бути ретельно налаштований,

Селективність до нітриду кремнію і, особливо до нітриду, який лежить на рельєфі, є ключовою проблемою при виборі відповідних газових сумішей і систем для травлення окисла. При травленні оксиду використовуються газові

суміші, засновані на фтор вуглецю, що забезпечують селективне осадження захисного полімерного шару.

Найбільші проблеми виникають при травленні само сумісних контактів (SAC) (рис.1.3). У цьому випадку проблеми наявності незахищених кутів, високого аспектного співвідношення і необхідність трукції між структурами затворів вимагають наявності дуже стійкого процесу травлення. Крім того, топологічний рельєф формуються структур призводить до необхідності великого перетравити (близько 50%).

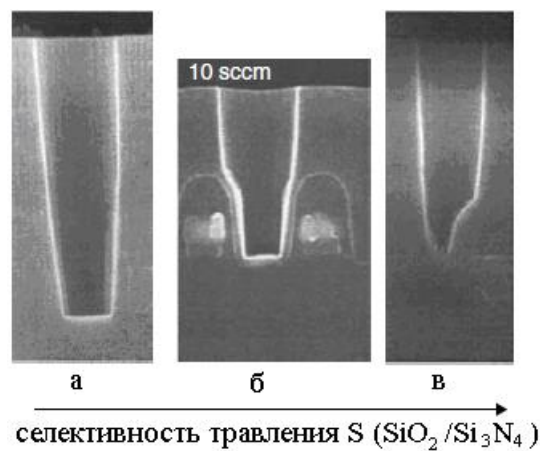


Рис.1.3. Профілі самосумісних контактів після ПТ [4]: а - процес ПТ з низькою селективністю до Si_3N_4 ; б - процес ПТ з достатньою селективністю до Si_3N_4 ; в- процес ПТ з високою селективністю до Si_3N_4 , що призвела до зупинки процесу травлення

В даний час для забезпечення необхідної селективності по відношенню до нітриду кремнію були розроблені процеси травлення діоксиду кремнію з високою полімеризацією (наприклад, засновані на C_4F_8). Так, використовувані фірмою IBM процеси в реакторах високоплотной плазми (із сумішами $\text{Ar} / \text{C}_4\text{F}_8 / \text{C}_2\text{F}_6$) засновані переважно на захисному C_xF_y полімерному шарі, який забезпечує селективність. В ході протікання такого процесу травлення відбувається осадження товстого полімерного шару. Більш важким завданням в процесах ПТ SAC є досягнення необхідної селективності на кутах структури

через більшого розпилення захисного полімеру на кутах. Нещодавно, висока селективність до нітриду на кутах структур в процесі травлення SAC була продемонстрована при добавці водню в засновану на C_4F_8 газову суміш. Використання високополімерізуючих робочих газів може призводити до більшого ризику зупинки травлення через додаткового осадження полімеру. Для керованості швидкістю осадження полімеру до робочої суміші додається, як правило, кисень. Однак, занадто велика добавка кисню призводить до ерозії фоторезиста. Керуючи ВЧ-потужністю і тиском, можна домогтися збільшення потоку іонів на підкладку, що також дозволяє уникнути припинення травлення. Однак даний прийом може призвести до збільшення пошкоджень в фоторезисте. можна домогтися збільшення потоку іонів на підкладку, що також дозволяє уникнути припинення травлення. Однак даний прийом може призвести до збільшення пошкоджень в фоторезисте. можна домогтися збільшення потоку іонів на підкладку, що також дозволяє уникнути припинення травлення. Однак даний прийом може призвести до збільшення пошкоджень в фоторезисті.

Технологія створення дрібнощільової ізоляції (shallow trench isolation (STI)) представлена на рис.1.4 і включає в себе операції осадження шару діелектрика на поверхню кремнію, службовця твердої маскою при подальшому плазмовому травленні Si, плазмового травлення щілинних структур, заповнення їх SiO_2 методом хімічного осадження з газової фази (ХОГФ) або осадження з газової фази стимульованою плазмою (ПА ХОГФ) і хіміко-механічної планаризації (ХМП).

На етапі формування твердої маски необхідно забезпечити анізотропний профіль травлення діелектрика для точної передачі лінійних розмірів. Як матеріал твердої маски в процесі ПТ STI, як правило, використовується нітрид кремнію. Плазмове травлення Si_3N_4 , що відповідає цій вимозі, проводять в суміші CF_4 / CHF_3 .

Вимоги, що пред'являються до процесу ПТ Si, зазвичай зводяться до отримання щілинних структур з бічними стінками, що мають незначний нахил від вертикалі; згладженими кутами в верхній частині формуються елементів.

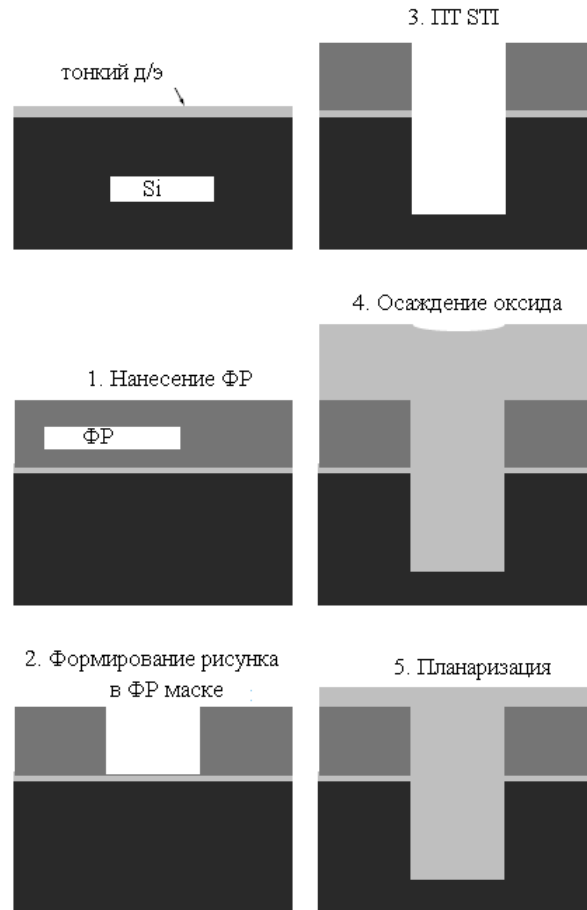


Рис.1.4. Этапы формування STI [7]

Нахил бічних стінок потрібно для виключення нерівностей країв осажденого діелектрика в процесах ХОГФ (ПА ХОГФ), які при змиканні утворюють порожнечі (рис. 1.5) і, тим самим, знижують ізоляційні характеристики STI-структури.



Рис.1.5. Зображення STI-структури з порожнистою областю в діелектрику в результаті змикання нерівних країв [7]

Згладжування кутів у верхній частині формується структури необхідно для виключення виникнення електричного пробоя.

Відомо, що в процесах ПТ одночасно можуть протікати стадії травлення і полімеризації поверхні. Цей механізм покладено в основу забезпечення вищевказаних вимог до процесу плазмового травлення Si при створенні STI.

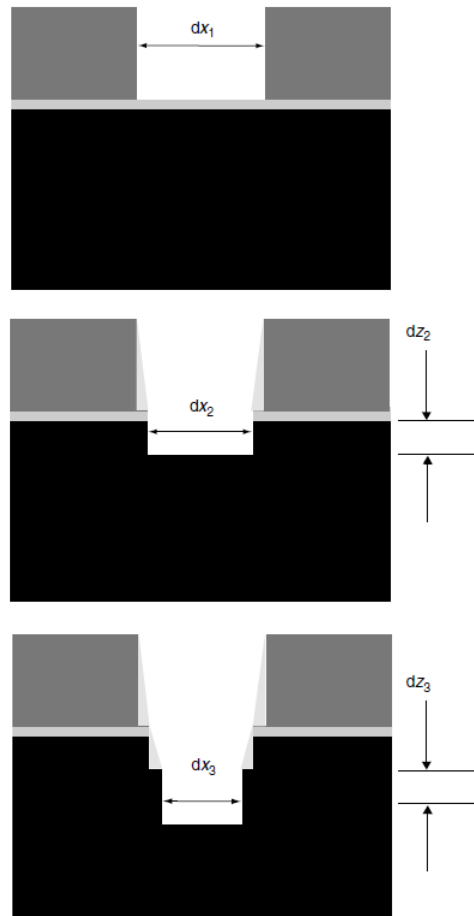


Рис.1.6. Схематичне зображення процесу плазмового травлення Si для формування похилого профілю STI-структури [7]

В якості робочої суміші використовується газова система Cl_2 - HBr - He - O_2 . В результаті травлення кремнію утворюються продукти реакції у виглядіплівок SiO_x , які пасивують в основному бічні стінки структури, оскільки з горизонтальної поверхні полімеризуючися шари видаляються в результаті енергетичної бомбардування іонами.

Більший процентний вміст газів He-O₂ в робочій суміші призводить до значного звуження профілю в нижній його частині і підвищенню селективності до маскується покриттю з нітриду кремнію. Схематичне зображення процесу плазмового травлення Si при створенні дрібнощільової ізоляції показано на рис.1.6, що ілюструє механізм формування похилого профілю структури.

1.3. Формування затворів МОН транзисторів

Плазмове травлення полікремнієвих затворів з шириною 0,1 мкм і нижче виявило нові проблеми, пов'язані в першу чергу з можливістю керувати профілем травлення, селективність травлення і граничним мінімальним лінійним розміром (ЛР) затвора. Формування ПЗ включає в себе дві стадії сухого травлення: формування маски, яка визначає конфігурацію і ЛР провідника затвора і безпосередньо травлення Si затвора (рис.1.7).

Як правило, в якості маски для формування елементів пам'яті і логічного вентиля використовується фоторезист і «жорстка маска».

Для логічних пристроїв, основний параметр - критична ширина провідника затвора, який визначає швидкодію пристроїв. Основним матеріалом, використовуваним в якості тонкої плівки провідника затвора, є полікристалічний кремній. Для елемента пам'яті, велика частина виробників використовує складовою затвор, що складається з силіциду вольфраму (WSix) і полікристалічного кремнію. Використання в структурі складеного провідника затвора поряд з полікристалічним кремнієм силіциду вольфраму, дозволяє знизити питомий опір провідника, що в свою чергу підвищує швидкодію елементів пам'яті. З додаванням другого матеріалу в провідник затвора, складність процесу плазмового травлення значно збільшується.

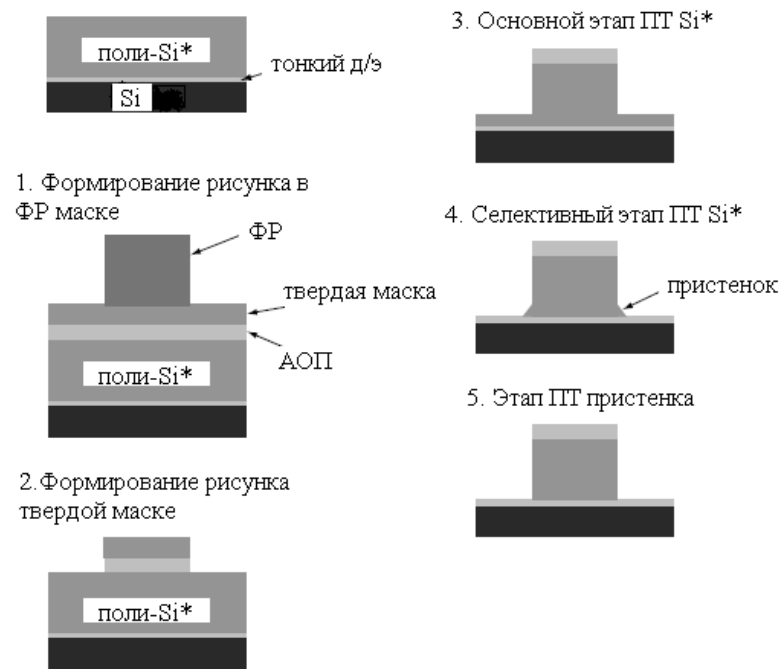


Рис.1.7. Маршрут изготовления Si затвора [8]

Для підвищення керованістю процесом плазмового травлення формування затвора в даний час в напівпровідниковому виробництві використовуються реактори високоплотной плазми, зокрема, джерела індуктивно-зв'язаної плазми (ІЗП).

Тверда маска повинна з точністю відтворювати лінійний розмір ФР маски. При ПТ діелектрика через фоторезистивной маски зазвичай використовуються фторовані газові суміші. Крім того, в процесах травлення важливим моментом є рівномірність осадження полімеру. Надмірне формування полімеру звужує розмір витравлюють елемента малюнка, що переноситься на зразок, приводячи до збільшення ширини затвора. Якщо плазма забезпечує незначну полімеризацію, то бічна стіна переслідуювані профілю незахищена і труїться по краях, що призводить до появи похилого профілю. На рис.1.8 зображено приклад впливу плазмового складу на профіль травлення.

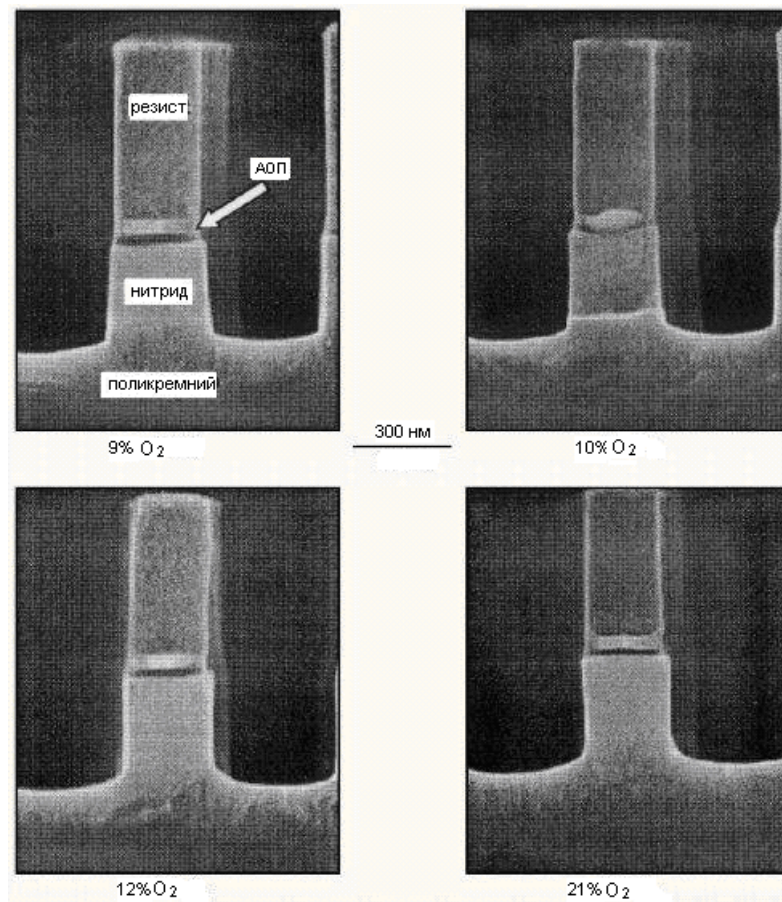


Рис.1.8. Мікрознімки поперечних перерізів, що ілюструють травлення жорсткої маски провідника затвора, з добавкою декількох відсотків кисню в газову суміш [8]

Ці зразки були оброблені, з використанням звичайної фторированої газової суміші з регульованим потоку кисню. Як видно з рисунка 1.8, виготовлена маска, при використанні добавки 9% O_2 має профіль з позитивним нахилом; виготовлена з використанням 21% O_2 , має істотний негативний кут.

Після формування малюнка в твердій масці полікристалічний кремній легується домішкою, типу фосфору, що робить його струмопровідних. Полікристалічний кремній повинен бути сформований без істотного руйнування підзатворного діелектрика. Як і в процесі створення твердої маски, процес стекового травлення не повинен змінювати мінімальний розмір переслідувані елемента. Дані процеси ПТ Si * використовують гази типу Cl_2 , HBr , або HCl , що забезпечують хімічну селективність до підзатворного діелектрика.

Для сучасних логічних схем і елементів пам'яті значення ширини провідника затвора і товщини подзатворного діелектрика представлені в табл.1.3 [9].

Таблиця 1.3

Товщини підзатворного діелектрика для декількох поколінь пристроїв

Покоління пристрої (мінімальна ширина провідника затвора), (мкм)	Еквівалентна товщина подзатворного діелектрика, нм
0,18	2-3
0,13	1,3-1,6
0,09	1,2-1,4
0,065	0,9-1,1
0,045	0,5-0,8

Ці два параметри більше впливають на параметри логічних схем, ніж на схеми пам'яті. Для травлення провідників затвора Si * з високою селективністю до подзатворного діелектрика і прийнятним профілем травлення традиційно використовується HBr.

На рис.1.9 показані графіки швидкості травлення полікристалічного кремнію від повної витрати газу для заснованих на Cl₂- і HBr- процесів травлення. В діапазоні 75-150 см³/с потоку для Cl₂ системи, швидкість травлення обмежена доставкою реагенту до поверхні підкладки.

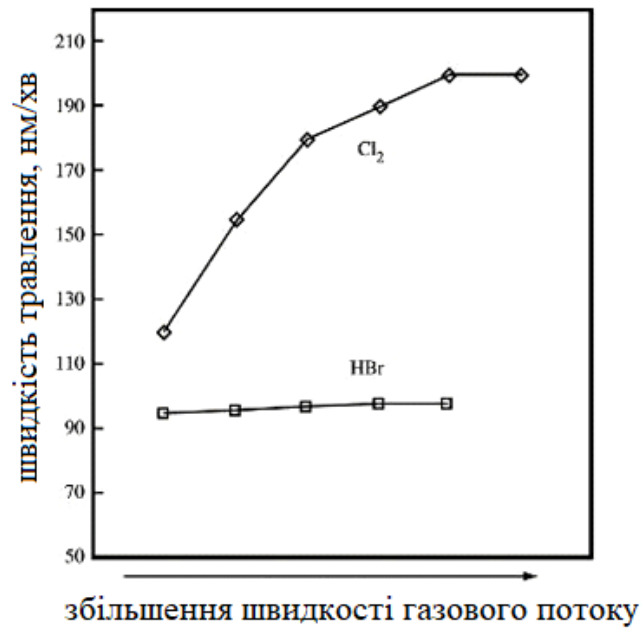


Рис.1.9. Швидкість травлення полікристалічного кремнію для газових HBr і Cl₂ сумішей від їх витрати [9]

З рис.1.9 видно, що при потоках Cl₂ в 200 см³/с і більше, швидкість травлення виходить в насичення. У разі HBr-заснованих систем, зі зростаючою витратою реагенту ніякої зміни в швидкості травлення не спостерігалось. Передбачається, що HBr-процес травлення обмежений в основному швидкістю поверхневих хімічних реакцій, ніж потоком частинок до поверхні.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Основи проектування в Silvaco TCAD

Для комп'ютерного моделювання в даній роботі було використано інструменти Silvaco TCAD [14-20]. Зазвичай це програми для формування вхідних даних DeckBuild [14], програми які безпосередньо проводять моделювання техпроцесів ATHENA [15] та структур та їх властивостей ATLAS [16], засоби перегляду і обробки результатів TonyPlot або TonyPlot3D. Їх взаємозв'язок можна зрозуміти із наведеної на рис.2.1 блок-схеми.

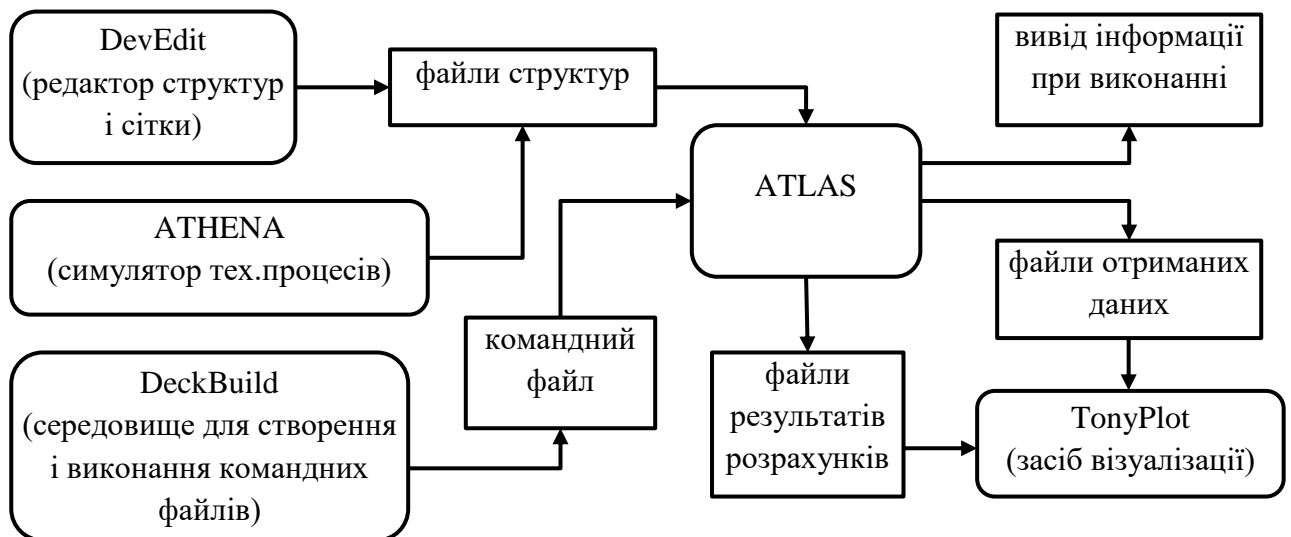


Рис. 2.1. Блок-схема засобів Silvaco TCAD [15]

У DevBuild здійснюється запуск програм, задається порядок виконання та їх координування. В роботі в основному був використаний симулятор технологічних процесів ATHENA, який дозволяє моделювати стандартні технологічні процеси для НВІС – фотолітографії, дифузії, окислення, травлення, пошарового нанесення, тощо.

2.2 Налаштування моделювання процесу травлення

Редактор Athena дозволяє проводити моделювання травлення областей структури двома методами - класичним травленням області заданої геометричної форми в заданому матеріалі і травленням за допомогою «машини травлення», яка дозволяє будувати модель реального механізму багатосарової структури з урахуванням спрямованості і ізотропності процесу.

Звичайне травлення областей заданої геометрії:

etch

[material] [name.resist]

[all | dry] [thickness = <n>] [angle = <n>] [undercut = <n>]

[left | right | above | below] [p1.x = <n>] [p1.y = <n>] [p2.x = <n>] [p2.y = <n>]

[start | continue | done] [x = <n>] [y = <n>]

[infile = <c>] [top.layer] [noexpose] [direct.angle = <n>]

Параметри, які використовуються при травленні в модулі Elite (код використовується для завдання команди на травлення матеріалу):

[machine = <c>] [time = <n>] [hours | minutes | seconds]

Параметри, які використовуються при травленні по RIE, WET.ETCH і PLASMA моделям:

[dt.fact = <n>] [dt.max = <n>] [dx.mult = <n>]

Параметри, які використовуються при травленні по моделі MC.PLASMA:

[mc.redepo] [mc.smooth = <N>] [mc.dt.fact = <N>] [Mc.modfname = <c>]

material - задається матеріал, який буде стравлюватися; якщо матеріал вказано, матеріали, що лежать в області травлення, стравлюватися не будуть;

name.resist - тип фоторезисту, який стравлюють,

all - параметр вказує, що стравлювати будуть окреслені матеріали,

dry - структура поверхні, яку стравлюють, буде повторювати вихідний матеріал,

thickness - товщина шару, який стравлюють, мкм,

angle - нахил бокової стінки в градусах,
 undercut - підтравлювання під маску, мкм,
 left | right | above | below - напрямок травлення, p1. * - координата,
 infile - зовнішній файл з координатами травлення,
 top.layer - стравлюється тільки верхній шар заданого матеріалу,
 poexpose - отримана в ході травлення поверхня не піддається подальшому окисненню або нанесення матеріалу,
 direct.angle - кут травлення від вертикалі (0°).

Розглянемо методику використання інструменту Elite [17-19] для моделювання травлення канавок (рис.2.2). При використанні «машини травлення» спочатку задається конфігурація самої машини травлення (через `rate.etch machine = ***` і її параметри), потім машина підключається до зазначеного в її конфігурації матеріалу (через `etch machine = ***` з зазначенням часу травлення).

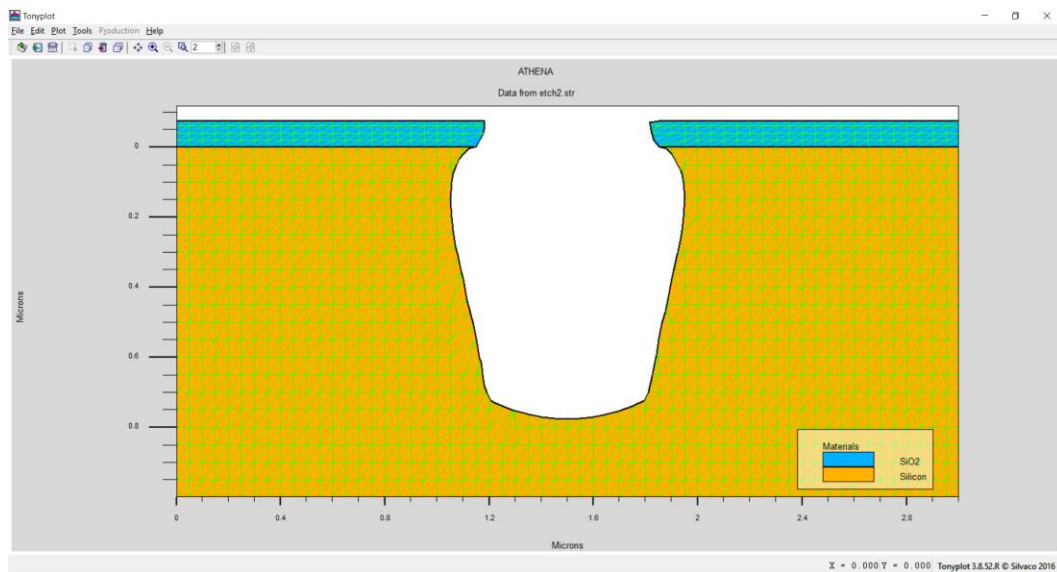


Рис. 2.2. Профіль травлення канавки

go athena

Травлення з використанням моделі реактивного іонного травлення:

line x loc = 0.00 spac = 0.05

line x loc = 3.00 spac = 0.05

line y loc = 0.00 spac = 0.05

line y loc = 1.00 spac = 0.05

Вихідна підкладка - кремнієва пластина з орієнтацією (100), сітка задається при визначенні геометричних розмірів кристала, множник сітки не змінює складність розрахунку структури:

init orientation = 100 space.mult = 1

Нанесення оксиду товщиною 0.1 мкм заввишки в 5 поділок сітки:

deposit oxide thick = 0.10 div = 5

Стравлювання прямокутної області оксиду за заданими координатами (верхній лівий кут, нижній лівий кут, нижній правий кут, у верхньому правому куті):

etch oxide start x = 1.2 y = -10

etch cont x = 1.2 y = 10

etch cont x = 1.8 y = 10

etch done x = 1.8 y = -10

Для оптимізації процесу травлення використовується шаблон, по якому можна проводити травлення в різних процесах моделювання:

etch2 - назва «машини» травлення,

rie - метод травлення, комбінує ізотропне і анізотропне травлення, кремній - матеріал, для якого будуть застосовуватися параметри травлення,

nm - нанометра в хвилину (швидкість травлення),

chemical - напрямок травлення, нормальне для іонного пучка,

directional - компонента анізотропного (направлено- го) травлення,

divergence - розбіжність пучка в RIE моделі

rate.etch machine = etch2 rie silicon nm chemical = 125 directional = 100

divergence = 90

Зміна конфігурації травлення для оксиду з використанням створеної раніше «машини» травлення.

rate.etch machine = etch2 rie oxide nm chemical = 5.0 direc- tional = 5

dx.mult - множник похибки для травлення з використанням інструменту

Elite


```
etch mach = etch2 time = 5.0 minutes dx.mult = .5
structure outfile = etch2.str tonyplot etch2.str
quit
```

2.3. Інструменти для створення «машини травлення»

Розглянемо основні інструменти для створення «машини травлення».

```
rate.etch
```

```
machine = <c> material | name.resist = <n>
```

```
wet.etch | rie | plasma | mc.plasma
```

Параметри, які використовуються для моделей RIE і WET.ETCH:

```
ah | am | as | uh | um | us | nm
```

```
[directional = <n>] [isotropic = <n>] [chemical = <n>] [diver- gence = <n>]
```

Параметри, які використовуються в моделі плазмового травлення:

```
[pressure = <n>] [tgas = <n>] [tion = <n>] [vpdc = <n>] [vpac = <n>]
```

```
[lshdc = <n>] [lshac = <n>] [freq = <n>] [mgas = <n>] [mion = <n>] [qio = <n>]
```

```
[qcht = <n>]
```

```
[child.langm | collision | linear | constant] [ions.only]
```

```
[nparticles = <n>] [energy.div = <n>] [outf.table = << n >>] [outf.angle = <c>]
```

```
[er.linear | er.inhib | er.coverage | er.thermal]
```

```
[ki = <n>] [kf = <n>] [kd = <n>] [sparam = <n>] [theta = <n>]
```

```
[ionflux.thr = <n>] [max.ionflux = <n>] [max.chemfl = <n>] [max.depofl = <n>]
```

Параметри, які використовуються для плазмового травлення по моделі

Монте-Карло:

```
[ion.types = <n>] [mc.polymp = <n>] [mc.rflctdif = <n>] [mc.etch1 = <n>]
```

```
[mc.etch2 = <n>] [mc.alb1 = <n>] [mc.alb2 = <n>]
```

```
[mc.plm.alb = <n>] [mc.norm.t1 = <n>] [mc.norm.t2 = <n>] [mc.lat.t1 = <n>]
```

```
[mc.lat.t2 = <n>] [mc.ion.cu1 = <n>]
```

```
[mc.ion.cu2 = <n>]
```

```
[mc.parts1 = <n>] [mc.parts1 = <n>] [mc.angle1 = <n>] [mc.angle2 = <n>]
```

machine - ім'я машини травлення,

material / name.resist - матеріал або фоторезист, для якого буде використана машина травлення,

wet.etch / rie / plasma / mc.plasma - параметр визначає модель, за якою буде проводитися розрахунок на машині травлення,

ah / am / as / uh / um / us / nm - швидкість травлення (\AA / год, \AA / хвилини, \AA / секунди, мкм / год, мкм / хвилини, мкм / с, нм / хвилини),

directional - спрямованість травлення (в частках), isotropic - спрямованість потоку травлення (в частках),

chemical, divergence - ступінь травлення в RIE моделі щодо пучка іонів, (дивергенція не дорівнює нулю) при кутовому розбіжності потоку іонів по Гаусу.

У режимі побудови графіків 1D машина травлення працювати не буде.

Просте спрямоване травлення може бути змодельоване з використанням двох параметрів травлення [17-19]: ізотропності і спрямованості. Вибираючи позитивні або від'ємні величини компоненти isotropic, можна побудувати модель травлення канавок з підтравлюванням або конічних областей.

go athena

Просте травлення канавок :

line x loc = 0.00 spac = 0.10

line x loc = 3.0 spac = 0.10

line y loc = 0.00 spac = 0.05

line y loc = 2.0 spac = 0.05

initialize

Нанесення позитивного фоторезиста SPR500 на кремнієву підкладку, товщина дорівнює 1,16 мкм, 11 поділок сітки по осі Y :

deposit material = SPR500 thick = 1.16 divisions = 11

Стравлювання фоторезисту в області між вказаними координатами :

etch material = SPR500 start x = 1.1 y = -10 etch cont x = 1.1 y = 10

etch cont x = 1.9 y = 10 etch done x = 1.9 y = -10

Створення першого файлу структури (рис.2.3а) після формування виїмки в фоторезисті [17,18]:

```
structure outfile = etch1_0.str
```

Створення машини травлення m1 для моделі реактивного іонного травлення кремнію, ізотропність дорівнює 0, напрямок травлення дорівнює 1 (в частках), швидкість процесу визначається в мкм / хв.

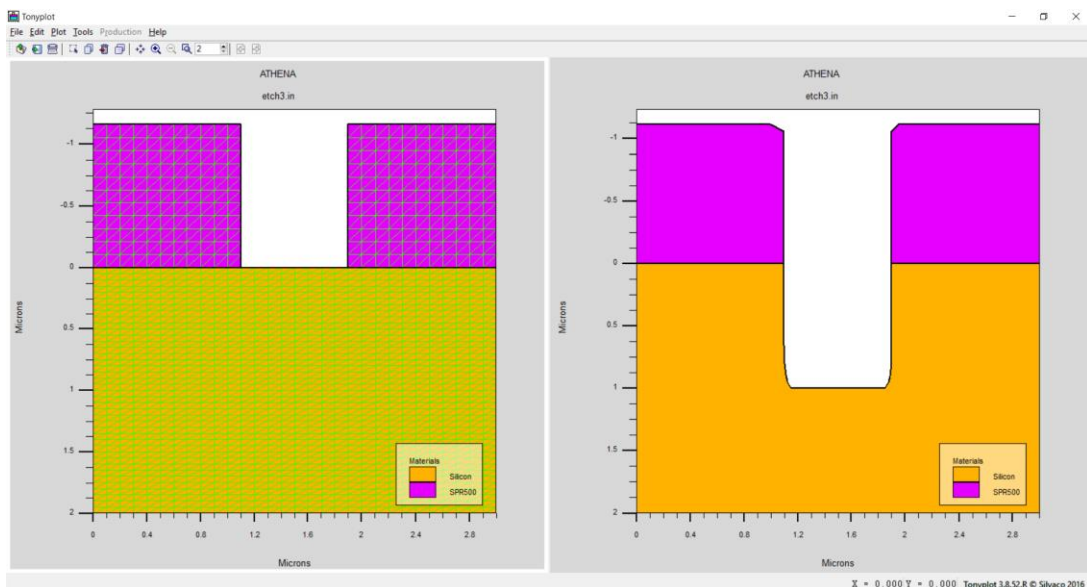
Аналогічна машина травлення фоторезисту, напрям травлення :

```
rate.etch machine = m1 rie silicon iso = 0.0 dir = 1.0 um
```

```
rate.etch machine = m1 rie material = SPR500 iso = 0.0 dir = 0.05 um
```

Запуск машини травлення на 1 хвилину, dx.mult - множник точності (знижується для підвищення точності):

```
etch machine = m1 time = 60.0 second dx.mult = 0.5
```



а

б

Рис.2.3. Профілі травлення, отримані за допомогою машини травлення

Створення другого файлу структури (рис.2.3б) після травлення фоторезисту і кремнію за допомогою машини травлення

```
structure outfile = etch 1_1.st.
```

Виведення на екран 2 фалів структури :

```
tonyplot -tttitle etch 1.in -st etch 1_0.str etch 1_1.str
```

```
quit
```

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Травлення канавок із заданими кутами нахилу стінок

Розглянемо використання інструментів `angle` і `undercut` в аналітичному моделюванні травлення кремнію, оксиду і нітриду кремнію в технології сухого травлення [17-19]. Кут нахилу стінки канавки визначається від горизонталі і за замовчуванням дорівнює 90° (вертикальні стінки). Підтравлення під маску задається в мкм.

```
go athena
```

Аналітичне травлення канавок із заданими кутами стінок і певною величиною подтравлювання під маску (рис.3.1):

```
line x loc = 0.00 spac = 0.10 line x loc = 0.2
spac = 0.005 line x loc = 1 spac = 0.10
line y loc = 0.00 spac = 0.01 line y loc = 0.2
spac = 0.02 line y loc = 2 spac = 0.1
init silicon c.boron = 1.0e14 orientation = 100
deposit oxide thick = 0.01 div = 4
deposit nitride thick = 0.2 div = 4
```

Стравлювання нітриду кремнію зліва від точки на осі X, що дорівнює 0,2 мкм.

Стравлювання оксиду зліва від точки на осі X, що дорівнює 0.2 мкм. Віддзеркалювання структури вліво, так що канавка травлення буде розташовуватися посередині структури :

```
etch nitride left p1.x = 0.2
etch oxide left p1.x = 0.2
struct mirror left
```

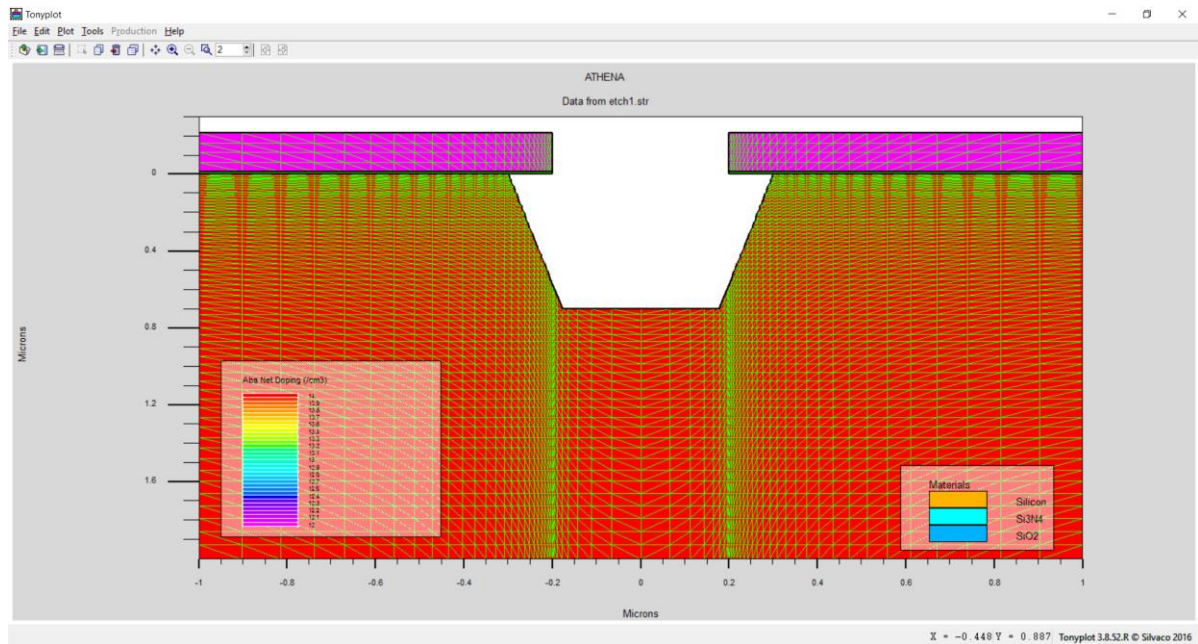


Рис.3.1. Профіль травлення із заданим кутом та підтравлюванням під маску

Витравлювання канавки з заданими кутами нахилу стінок. Підтравлювання під оксиди одно 0.1 мкм, кут нахилу стінок дорівнює 80° від горизонталі :

etch silicon thickness = 0.7 undercut = 0.1 angle = 80

structure outf = etch1.str

tonyplot etch1.str

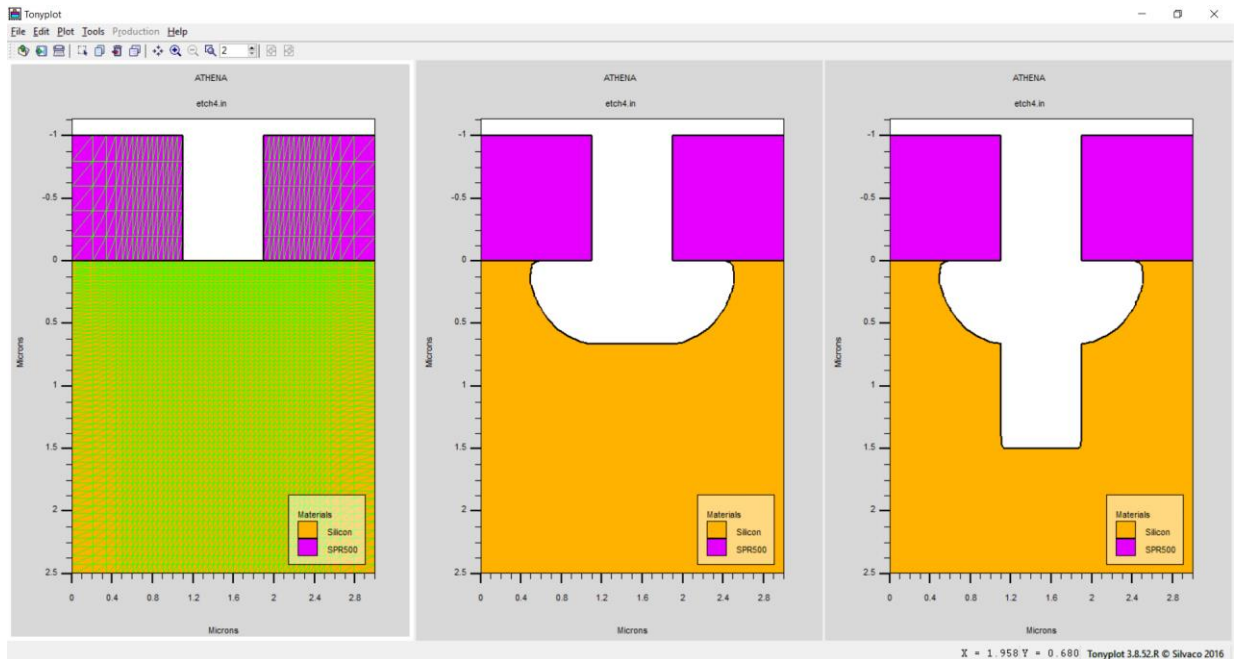
quit

3.2. Травлення канавок з використанням моделі RIE

Розглянемо просте травлення канавок з використанням комбінації ізотропної і спрямованої компонент машини травлення [17,19]. Створення структури проходить в 3 етапи. Команда initialize встановлює в якості матеріалу підкладки кремній і визначає його геометричні розміри. Далі використовується просте нанесення фоторезисту. На третьому етапі моделюється процес фотолітографії шляхом розтину області фоторезисту довжиною 0.8 мкм з нахилом стінок 89° методом звичайного травлення ETCH.

Реактивний іонне травлення формується в 2 етапи: на першому використовується сильна ізотропність травлення (рис.3.2б) в результаті

формується округлений профіль зі значним підтравлювання фоторезисту, на другому етапі задана сильна спрямованість травлення (рис.3.2в).



а

б

в

Рис.3.2. Профілі травлення, отримані методом реактивного іонного травлення: а – травлення фоторезисту; б – ізотропне травлення, в – спрямоване травлення

Травлення канавок з використанням моделі реактивного іонного травлення:

```
go athena
```

```
line x loc = 0.00 spac = 0.20
```

```
line x loc = 0.5 spac = 0.05
```

```
line x loc = 1 spac = 0.05
```

```
line x loc = 1.5 spac = 0.05
```

```
line x loc = 2 spac = 0.05
```

```
line x loc = 2.5 spac = 0.05
```

```
line x loc = 3.0 spac = 0.20
```

```
line y loc = 0.00 spac = 0.02
```

```
line y loc = 2.5 spac = 0.1
```

```
initialize
deposit material = SPR500 thick = 1 div = 5
etch material = SPR500 start x = 1.1 y = -10
etch cont x = 1.1 y = 10
etch cont x = 1.9 y = 10 etch done x = 1.9 y = -10
structure outfile = etch4_0.str
rate.etch machine = m1 rie silicon iso = 1.0 dir = 0.0 um
etch machine = m1 time = 40.0 second dx.mult = 0.5 structure
outfile = etch2_1.str
rate.etch machine = m2 rie silicon iso = 0.0 dir = 1.0 um
etch machine = m2 time = 50.0 second dx.mult = 0.5
structure outfile = etch2_2.str
tonyplot -st etch2_0.str etch2_1.str etch2_2.str -ttitle etch2.in
quit
```

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз фізичних та хімічних методів травлення матеріалів мікро- та наноелектроніки, показано, що вони технологічно освоєні та широко використовуються для травлення шарів різних матеріалів.

2. Хімічне травлення широко застосовується при виготовленні напівпровідникових приладів; можливість вживання того чи іншого травника пов'язана зі швидкістю його взаємодії з кристалом; травлення, що протікає з надзвичайно малою, або дуже великою швидкістю практично у приладобудуванні не застосовується.

3. Перевагами плазмового травлення є краща відтворюваність критичних розмірів елементів, великі значення швидкості травлення, селективності, поліпшені профілі травлення, можливість незалежно регулювати енергією і щільністю потоку іонів, що впливають на оброблювану пластину.

4. В даній роботі розглянуто методику комп'ютерного моделювання технологічних процесів для виготовлення базових елементів електроніки; за допомогою програмного пакету Silvaco TCAD проведено моделювання технологічного процесу травлення шарів, зокрема ізотропного та анізотропного травлення кремнію, а також метод реактивного іонного травлення; отримані результати мають добре узгодження з відомими експериментальними даними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

література:

1. Готра З.Ю. Технологія електронної техніки: навч. посібник: у 2 т. /З.Ю.Готра. – Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – Т.1. – 888 с.
2. Словецкий Д.И. Проблемы плазмохимического травления в технологии микроэлектроники / Д.И. Словецкий // Микроэлектроника. -1987. Т. 16, № 6. - С.497-512.
3. Абрамов А. В. Способ локального плазмохимического травления материала / А.В. Абрамов, Ю.И. Дикарев, И.С. Суровцев // Патент № 2091904, 27. 09. 1997.
4. Абрамов А. В. Травление материалов локализованным газовым разрядом / А.В. Абрамов, Е.А. Абрамова, И.С. Суровцев // Письма в ЖТФ. 2001. - Т. 27. № 3. - С. 45-48.
5. Suzuki K. The roles of ions neutral active species in microwave plasma etching / K. Suzuki, S. Okudaira, I. Kanomata // Solid State Science and Technol.-1979. -V.126, № 6. P.1024-1-28.
6. Врублевский Э.М. Высадка на конструкционных материалах реакторов при проведении процесса ПХТ / Э.М. Врублевский, И.С. Трубин, А.В. Холопов // Микроэлектроника. 1994. - Т.23. №4. - С. 80-85.
7. Высокочастотный емкостной разряд / Ю.П. Райзер, М. Н. Шнейдер, Н.А. Яценко М.: МФТИ. Наука. - 1995. - 320 с.
8. Энергия разрыва химических связей. / Л. В. Гурвич, Г. В. Каранченцев и др. - М.: Наука, 1974.-351 с.
9. Holstein T. Energy Distribution of Electrons in High Frequency Gas Discharges / T. Holstein // Phys. Rev. 1946. - 69, 50 (A). - P. 367-384.
10. Boswell R.W. Pulsed High Rate Plasma Etching with Variable Si/SiO₂ Selectivity and Variable Si Etch Profiles / R.W. Boswell, D. Henry. //Appl. Phys. Lett. -1985.-Vol.47, № 10.- P. 1095-1097.

11. Панфилов Ю.В. Оборудование для нанесения тонких пленок в вакууме / 12-й Международный симпозиум «Тонкие пленки в электронике». – ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2002. – 400с.
12. Проценко І.Ю. Технологія та фізика тонких металевих плівок: навч. посібник / І.Ю. Проценко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2000. – 148 с.
13. Беленький М.А. Электроосаждение металлических покрытий / М.А. Беленький, А.Ф. Иванов . – Л.: Машиностроение, 1979. – 544 с.
14. Silvaco, DeckBuild User's Manual Device Simulation Software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018. – 241 p.
15. Silvaco, ATHENA User's Manual Device Simulation Software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018 – 444 p.
16. Silvaco, ATLAS user's manual device simulation software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018 – 1776 p.
17. Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике / В.В. Денисенко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 408 с.
18. Арсентьев А.В. Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем: лабораторный практикум / А.В. Арсентьев, Е.Ю. Плотникова.- Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – 138 с.
19. <https://silvaco.co.kr/examples/tcad/>– Silvaco, TCAD Exaples, дата доступу: 29.05.2021 р.
20. Приладово-технологічне моделювання Silvaco TCAD при викладанні навчальних дисциплін інженерно-технічного циклу / [І.П. Бурик, А.О. Головня, М.М. Іващенко] // Матеріали Х Науково-методичної конференції, м.Суми, 14-15 травня 2020 р. – Суми: СумДУ, 2020. – С. 39-41.
21. Ануфриев Л.П. Технология интегральной электроники: учеб. пособие / Л.П. Ануфриев, С.В. Бордусов, Л.И. Гурский [и др.]; / Под общ. ред. А.П. Достанко, Л.И. Гурского. – Минск: «Интегралполиграф», 2009. – 379с.
22. Дробот П.Н. Наноэлектроника : учеб. пособие / П.Н. Дробот. - Томск : ТУСУР, 2016. - 286 с.

23. Ефимов И.Е. Основы микроэлектроники: учебник / И.Е.Ефимов, И.Я.Козырь.– СПб.:Изд-во «Лань», 2008. – 384 с.
24. Закалик Л. І. Основи мікроелектроніки: навч. посібник. / Л.І. Закалик, Р.А. Ткачук.– Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 1998. –352 с.
25. Горина С. Н. Травление полупроводников / С. Н. Горина– Москва: Мир, 1965. – 356с.
26. Пантелєєва Т. С. Двовимірне топологічне травлення / Т. С. Пантелєєва. – Львів: Центр ЛНУ ім. І. Франка, 1986. – 480с.
27. Голосев В. В. Электрохимическое травления GaAs / В. В. Голосев. - Таллин: Валгус, 1981.- 197с.
28. Будник М.М., Войтович І.Д., Коваленко А.В.,Корсунський В.М., Курашов В.Н., Прокопенко О.В. Сучасна радіофізика та електроніка: навчальний посібник. – Київ: ФРЕКС, 2015. – 402 с.
29. Воротынцев В.М. Базовые технологии микро- и нанoeлектроники : учебное пособие / В.М. Воротынцев, В.Д. Скупов. - Москва : Проспект, 2017. - 519 с.

ДОДАТОК А**СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ**