

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 ОКИСНЕННЯ ЯК БАЗОВОЇ
ІНТЕГРАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

студента гр. ЕІ₃-71_к

В.С. Корольова

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

І.П. Бурик

Конотоп 2021

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ОКИСНЕННЯ КРЕМНІЮ	5
1.1 Загальна характеристика процесу окиснення	5
1.2 Отримання плівок SiO ₂ методом окиснення	10
1.3 Осадження плівок SiO ₂	15
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	18
2.1 Основи проектування в Silvano TCAD	18
2.2 Налаштування моделювання процесу окиснення.....	19
2.3 Окиснення полікремнію.....	20
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	23
3.1 Залежність окиснення від параметрів середовища.....	23
3.2 Поєднання стиків в локальному окисненні канавки	26
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	29
ДОДАТОК А. СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ	31

РЕФЕРАТ

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

Мета роботи полягає у дослідженні впливу умов окиснення 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 окиснення кремнія. У другому розділі розглядається методика комп'ютерного моделювання процесу окиснення за допомогою програмного пакету Silvaco TCAD. У третьому розділі наведено результати моделювання впливу параметрів середовища на процес окиснення кремнію, а також поєднання стиків в локальному окисненні канавки (SILO).

Робота викладена на 31 сторінці, у тому числі включає 5 рисунків, 2 таблиці, список цитованої літератури із 22 джерел, 1 додатку.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ОКИСНЕННЯ, ДІОКСИД КРЕМНІЯ, ІНТЕГРАЛЬНА МІКРОСХЕМА, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ВСТУП

У сучасній мікроелектроніці кремній поки залишається основним матеріалом у виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних схем (ІС). Це багато в чому пов'язано з унікальним поєднанням фізико-хімічних властивостей його оксиду SiO_2 , що обумовлює широке застосування SiO_2 в якості універсального багатофункціонального діелектрика. Серед прикладів застосування SiO_2 можна виділити його використання в якості функціонального діелектричного шару в польових транзисторах із структурою метал-діелектрик-напівпровідник або МОН-транзисторах, електричної ізоляції активних і пасивних елементів ІС, а також міжшарової ізоляції багаторівневої металізації, тощо [1-10].

Плівки, що використовуються для зазначених цілей, повинні задовольняти ряду вимог за своїми електрофізичними властивостями. Найбільш важливими електрофізичними параметрами при цьому є питомий опір плівки, пробивна напруга і електрична міцність (величина напруженості електричного поля, при якій відбувається пробій), відносна діелектрична проникність, щільність поверхневих станів, ступінь стабільності поверхневого заряду і ін. Важливе значення має термічна і хімічна стійкість. Залежно від призначення плівки вимоги до цих параметрах виявляються різними. Так, для пасивуючих плівок необхідно, щоб відносна діелектрична проникність була гранично мінімальною, бо в іншому випадку паразитна електрична ємність між металевими плівковими лініями і напівпровідникової пластиною може виявитися чималою. У той же час для діелектрика затвора МОН-транзисторів відносна діелектрична проникність повинна бути максимальною для створення ефективного керуючого поля між затвором і напівпровідником.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД МЕТОДІВ ОКИСНЕННЯ КРЕМНІЮ

1.1. Загальна характеристика процесу окиснення

Окиснення кремнію - фізико-хімічний процес, застосування якого необхідно в ході всього технологічного циклу виготовлення сучасних інтегральних мікросхем. Нині для формування оксидних шарів розроблені методи, які включають термічне окиснення, анодування в розчинах електролітів, Піролітичне осадження (осадження з газової фази) і полум'яне анодування, або окиснення. У тих випадках, коли на межі розділу фаз необхідно отримати низьку щільність поверхневих станів, перевага віддається методу термічного окиснення. Однак в зв'язку з тим, що маскує оксид згодом найчастіше видаляють, умова отримання мінімальної щільності поверхневих статків не відіграє ролі при виборі методу формування маскує шару для процесів дифузії легуючої домішки в кремній. Очевидно, що при необхідності формування оксидної плівки на поверхні металевому шару (а це характерно для процесів формування багат шарових металевих шарів), придатними виявляються тільки методи газофазного осадження. Коли на межі поділу фаз необхідно отримати низьку щільність поверхневих станів переважно термічне окиснення [4-6].

Вибір методу окиснення визначається необхідної товщиною і властивостями формованого оксиду. Щодо тонкі оксидні плівки і ті оксиди, для яких поставлено умову отримання мінімального заряду на межі поділу, зазвичай вирощуються в сухому кисні. Коли критичним параметром є вміст іонів натрію в плівках оксиду, перевага віддається методу окиснення в системі HCl-O_2 . При формуванні товстих оксидних плівок ($> 0,5$ мкм) використовують окиснення у вологому кисні (як правило, при нормальному тиску (1 атм.) або

при підвищеному тиску (до 25 атм.). Більш високий тиск дозволяє вирощувати товсті оксидні плівки при середніх температурах і прийнятних витратах часу.

Найбільш поширений метод окиснення при атмосферному тиску реалізується в кварцових або кремнієвих дифузійних трубах, де підкладки кремнію розташовуються в вертикальному положенні в пазах спеціальної підставки (човники), зробленої з кварцу або кремнію. Типові температури окиснення лежать в інтервалі 800-1200 °С і повинні підтримуватися в процесі окиснення з точністю $\pm 1,0$ °С для забезпечення однорідності формованих плівок [4].

У стандартному технологічному процесі підкладки піддаються очищенню, сушці, розміщуються в човнику і автоматично всувають в піч, нагріту до температури 800-900 °С, після чого температура поступово підвищується.

Таке підвищення температури необхідно для запобігання розтріскування підкладок. Після закінчення процесу окиснення температура в печі поступово знижується, і підкладки виймають назовні. Для того щоб виростити високоякісний оксид з відтвореними властивостями, необхідно запобігти попаданню пилоподібних частинок в робочу зону печі. Перед приміщенням підкладок в високотемпературну піч необхідно провести їх очищення для знищення як органічних, так і неорганічних забруднень, що з'являються на попередніх етапах технологічного процесу або під час перенесення підкладок з одного технологічної лінії на іншу [4-8].

Процедура хімічної очистки зазвичай полягає у видаленні органічних забруднень; її проводять після видалення неорганічних іонів і атомів. Звичайна процедура очищення виконується в суміші $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{NH}_4\text{OH}$, яка забезпечує видалення органічних сполук за рахунок сольватуються дії гідроксиду амонію і окисляє дії перекису водню. Для видалення атомів важких металів зазвичай використовують розчин $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{HCl}$. Повторне осадження розчинених іонів важких металів в цьому розчині запобігає за рахунок формування розчинних комплексів. Очищення в такому розчині проводиться при температурі 75-85 °С протягом 10-20 хв, після чого слідує охолодження підкладок, їх

відмивання і сушіння в центрифугі. Якщо такі забруднення не видалити, то можливе погіршення електричних характеристик приладів, а також зниження надійності ІМС [1-8].

Для досягнення однорідності і властивостей плівки і відтворюваності параметрів зростання тонких оксидних плівок повинен бути досить повільним. Це досягається різноманітними методами, що включають в себе окиснення в сухому кисні з додаванням або без HCl , комплексне окиснення при різних температурах і складі окисної атмосфери, окиснення у вологому кисні, окиснення при зниженому тиску. При роботі з HCl необхідно дотримуватися обережності, особливо щодо системи очищення, оскільки HCl сприяє корозії металевих частин обладнання. При проведенні цих процесів необхідно також пам'ятати, що невелика кількість водяної пари може сильно вплинути на швидкість окиснення.

Сучасні дифузійні печі (використовувані також і для окиснення) управляються за допомогою мікропроцесорів, які забезпечують необхідну послідовність процесу, здійснюють контроль температури і витрати газів. Вся описана раніше процедура, від завантаження підкладок в човник до вилучення їх звідти, повністю програмується. Мікропроцесорне управління забезпечує зворотний зв'язок для порівняння величин різних параметрів із заданими значеннями цих же параметрів і для введення відповідних змін. наприклад, при зміні витрати газового потоку температура процесу може змінюватися. Шляхом безпосереднього цифрового контролю проводиться порівняння цієї температури з заданим значенням, і необхідні зміни автоматично вводяться в систему нагріву. властивості оксидів кремнію залежать від експериментальних умов вирощування оксиду. Наприклад, коефіцієнт заломлення плівок оксиду, вирощеного в сухому кисні, зменшується зі збільшенням температури, досягаючи постійного значення 1,4620 при температурі вище 1190°C . швидкість травлення термічних оксидів при кімнатній температурі в HF (49%) становить 100 нм / хв і змінюється в залежності від температури і концентрації

травителя. Крім того, швидкість травлення залежить від щільності оксиду і, отже, від температури окиснення [4-9].

Технологічні умови вирощування істотно вплив на властивості оксидних плівок. Наприклад, зі зниженням температури окиснення отримуємо більш щільний оксид. Для пасивирования іонів натрію, підвищення пробивних напруг в плівках і гетерування домішок і дефектів у кремнії застосовується додавання HCl в окислювальну атмосферу.

До властивостей діелектричних шарів багатошарових ІМС пред'являють ряд вимог [4]:

- вимоги до електрофізичних властивостей;
- вимоги до хімічних властивостях;
- вимоги до фізичних властивостей;
- вимоги до технологічних властивостей.

Здатність шару діоксиду кремнію служити в якості локального маски при дифузії атомів легуючої домішки при підвищених температурах - дуже корисна властивість для технології формування ІМС. Загонками, або осадження, легуючої домішки шляхом іонної імплантації, термічної дифузії або методами центрифугування зазвичай призводить до утворення джерела легуючої домішки на поверхні оксидної плівки або поблизу неї. Для того щоб легирующая домішка не дифундувала через оксидну плівку в маскованих областях і не досягала поверхні кремнію, необхідно, щоб в ході етапу високотемпературної розгону дифузія цієї домішки в окисле була досить повільною по відношенню до дифузії в кремнії.

Оксид кремнію являє собою широкозонний діелектрик (ширина забороненої зони E_g дорівнює 8,1 eV). Величина його власної електропровідності при кімнатній температурі становить $10^{-18} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Багато дослідників вважають, що межа розділу монокристалічного Si і аморфної плівки SiO₂, отриманої при термічному окисненні кремнію слід розглядати як певний перехідний шар зі змінним хімічним складом. Передбачається, що на межі монокристалічного кремнію знаходиться моноатомний шар

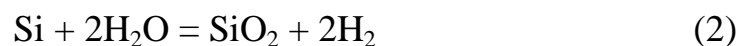
нестехіометрического SiO_x ($1 < x < 2$), що представляє собою не повністю окислений кремній. Потім слідує проміжний шар SiO_2 з великими внутрішніми механічними напруженнями товщиною 1-4 нм, який переходить в звичайний ненапружений стехіометричний аморфний SiO_2 . Однак в термічно вирощеному SiO_2 завжди виявляється позитивний заряд. В результаті в прилеглій області кремнію індукується негативний заряд. Позитивний заряд в оксиді може проявлятися у вигляді заряджених фіксованих станів на поверхні або заряду на межі поділу, рухомого заряду в оксиді, заряджених швидких поверхневих станів, а також пасток в оксиді, індукованих, наприклад, за допомогою радіаційного опромінення [3-9].

Накопичення зарядів характеризується вираженою нестабільністю, що викликає значну нестабільність вихідних параметрів приладів. заряджених швидких поверхневих станів, а також пасток в оксиді, індукованих, наприклад, за допомогою радіаційного опромінення. Накопичення зарядів характеризується вираженою нестабільністю, що викликає значну нестабільність вихідних параметрів приладів. заряджених швидких поверхневих станів, а також пасток в оксиді, індукованих, наприклад, за допомогою радіаційного опромінення.

Правильне розуміння механізмів виникнення залишкових напруг, в системі плівка - підкладка має важливе значення, оскільки високі значення напруг можуть привести до утворення тріщин в плівці і виникнення дефектів в розташованих під плівкою шарах кремнію [4]. Основною причиною виникнення залишкових напруг є різниця коефіцієнтів термічного розширення між Si і SiO_2 , а також поліморфні перетворення в SiO_2 . В ході технологічного процесу формування ІМС в оксидної плівці витравлюються вікна, що призводить до складного розподілу залишкових напружень на краях оксидної плівки. Тут на кордоні розриву суцільності плівки може виникати надзвичайно високий рівень залишкових напружень. зазвичай ці напруги релаксують за рахунок пластичної деформації або інших механізмів.

1.2. Отримання плівок SiO₂ методом окиснення

Суть методу термічного окиснення зводиться до окислювальному обробці поверхні кремнієвих пластин в середовищі сухого, вологого кисню або парак води при підвищеній температурі. Сумарні реакції відбуваються хімічних перетворень при такій обробці кремнію відображаються рівняннями [8]:



Процес окиснення здійснюється зазвичай при температурах від 900 до 1350°С. Численними експериментальними дослідженнями було показано, що процес термічного окиснення кремнію складається з наступних найбільш важливих елементарних актів:

- дифузії окислювачів з газового потоку до поверхні кремнію;
- адсорбції окислювачів на поверхні кремнію;
- дифузії окислювачів через оксидний шар (коефіцієнт дифузії кисню і води в SiO₂ значно вище коефіцієнта дифузії Si в SiO₂);
- хімічної взаємодії окисників з кремнієм на кордоні розділу Si / SiO₂;
- відведення газоподібних продуктів реакції (за участю води).

Як відомо, в загальному вигляді кінетичний закон зростання оксидної плівки має лінійно-параболічний вид:

$$d_{пл}^2 + Ad_{пл} = Bt \quad (3)$$

де $d_{пл}$ - товщина плівки;

t - час зростання;

A, B - константи лінійного і параболічного росту відповідно.

На практиці граничний лінійний випадок кінетичного контролю, коли товщина плівки лінійно пропорційна часу окиснення, реалізується на першому

етапі окиснення, коли поверхня кремнію вільна або покрита тонким оксидом, а також при температурах окиснення менше 1000 °С. Значна частка окиснення протікає відповідно до параболічних законів.

Найбільш складно піддається математичному опису окиснення у вологому кисні, коли в процесі беруть участь два окислювача O_2 і H_2O . Закон зростання оксиду залежить також від температури окиснення: при знижених температурах виконується лінійний закон, а при підвищених - параболічний. Слід зазначити, що окиснення в середовищі вологого кисню або парам води при інших рівних умовах протікає з істотно більшою швидкістю, ніж в середовищі сухого кисню (рис. 1.1), незважаючи на те, що швидкість дифузії кисню в кілька разів більше швидкості дифузії парів води в плівці діоксиду кремнію. Це пояснюється тим, що в умовах вологого кисню поверхнева рівноважна концентрація окислювача значно більше (на три порядки), ніж в умовах сухого кисню.

При вивченні кінетики процесу утворення оксидної плівки в середовищі водяної пари був виявлений цікавий факт. З підвищенням тиску пара в реакційному об'ємі швидкість росту окисного шару знижується, і при деякому критичному тиску зростання плівки припиняється. На думку дослідників, це обумовлено розчиненням оксиду у водяній парі. Імовірність розчинення SiO_2 у водяній парі високого тиску підтверджується утворенням шару оксиду, які облягають на внутрішніх стінках реакційної посудини після його охолодження і розкриття.

Крім температури і тиску окислювача, на швидкість окиснення істотно впливає концентрація домішки в підкладці. Так, наприклад, при окисненні пластини кремнію з поверхневою концентрацією фосфору 10^{21} см^{-3} при 850°C і тиску водяної пари 120 ат за 1 годину утворюється шар товщиною 2 мкм. При окисненні кремнію, що не містить домішок, в тих же умовах утворюється плівка товщиною лише 0,35 мкм. Легування бором в широкому температурному інтервалі збільшує коефіцієнт дифузії окислювачів і відповідно швидкість окиснення.

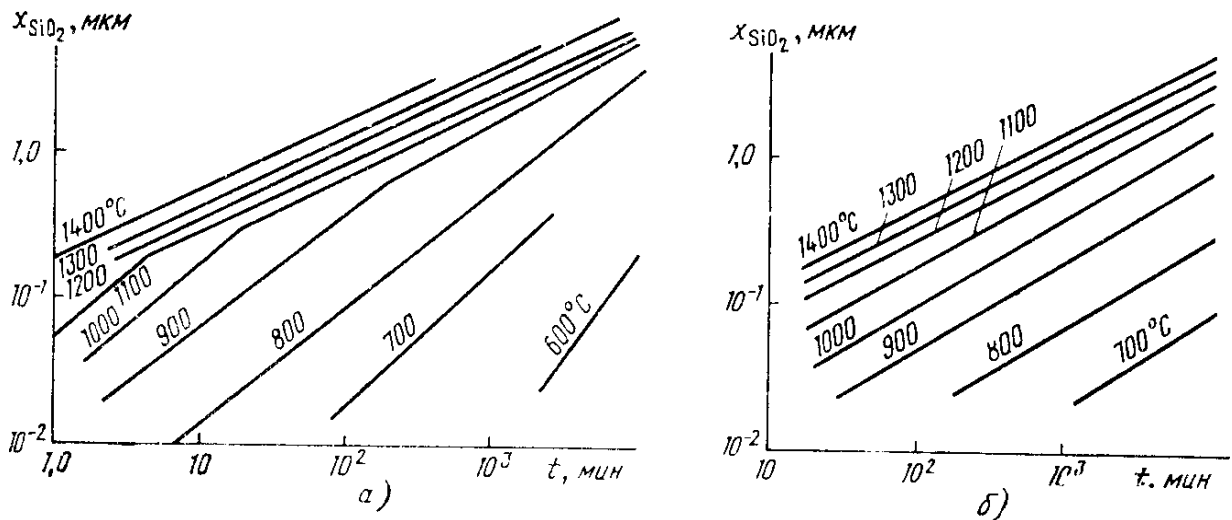


Рис. 1.1. Температурна залежність росту оксидної плівки на кремнії в середовищі водяної пари (а) і сухого кисню (б) [7]

Кристаліграфічна орієнтація поверхні кремнію також впливає на швидкість окиснення. Так, швидкість зростання оксидної плівки у вологому кисні при 1000°C в області лінійної ділянки залежності швидкості росту оксидного шару від часу для межі (100) становить 0,502, для (110) - 0,577 і для (111) - 0,580 нм / с. Отже по межі (111) окиснення здійснюється на 13% швидше, ніж по межі (100). Однак щільність поверхневих станів на межі поділу оксид - кремній орієнтації (100) - найменша, що вигідніше для технологічного процесу створення приладів на напівпровідниковому кремнії.

На ряду з вологим окисненням ще одним різновидом «швидкісного» окиснення є пірогенне окиснення кремнію. Сумарний процес пірогенного окиснення описується рівнянням (2). Власне пірогенним є етап отримання водяної пари поза реактора окиснення при взаємодії водню і кисню. Такий метод гарантує отримання високочистих парів води завдяки високому рівню очистки вихідних газів і синтезу води в безпосередній близькості від реактора. Отримання парів води здійснюється в кварцовою колбі - пальнику, яка знаходиться поза реактора, для чого подається водень підігрівається до

займання в атмосфері кисню. Температура в зоні підпалу водню повинна бути не менше 700°C . Співвідношення витрат водню і кисню має бути не більше 1.8:1. Температура пирогенного окиснення становить зазвичай 800°C . В ході процесу в реактор крім утворюються пари води, подається кисень для спалювання водню, що виділяється при окисленні. Час окиснення, наприклад, для формування подзатворного діелектрика товщиною 80 нм становить 30 хвилин. Приклад одного з виробничих режимів проведення операції "окиснення під затвор" наведено в таблиці 1.1 [6-10].

За своїми фізичними і хімічними властивостями оксидні плівки, отримані термічним окисненням кремнію, близькі до стекловидному кремнезему. Вони розчиняються тільки в плавикової кислоті, мають питомий електричний опір приблизно 10^{16} Ом * см при 25°C , мають електричну міцність $5 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^7$ В/см, діелектричної проникністю приблизно 3,7. Показник світлопереломлювання становить 1,458 - 1,462, в той час як для кварцового скла він дорівнює 1,459. Присутність парів води сприяє дефектоутворенню в оксидних шарах. Для поліпшення властивостей оксиду і кремнієвої підкладки при окисленні в газове середовище вводять галогени (наприклад, HCl). При цьому збільшується діелектрична міцність, зменшується щільність поверхневих станів, а також зменшується вміст домішок (наприклад, натрію) в плівці (за рахунок утворення летких хлоридів), ефект гетерування небажаних домішок. Введення HCl в окислювальну середу сухого кисню на кілька відсотків збільшує швидкість окиснення, а в пари води - в тій же мірі зменшує швидкість росту плівки.

До недоліків термічного оксиду кремнію слід віднести високі температури обробки, що призводить до автолегірування і зміни параметрів розподілу домішок в активних областях напівпровідникових структур. Окиснення поверхні кремнію в потоці дуже сухого кисню з вмістом води, меншим 10^{-7} г / л, при температурах $900 - 1200^{\circ}\text{C}$ і тиску 1 ат призводить до утворення більш чистого оксиду. Однак слід мати на увазі, що окиснення в середовищі сухого

кисню виробляється протягом тривалого часу з малою швидкістю. У цих умовах при високих температурах і при недостатньому очищенні поверхні кремнію перед окисненням в плівці можливе утворення кристалічних ділянок з мікротрещинами, що знижує її захисні властивості.

Таблиця 1.1

Режим виконання операції "окиснення під затвор"

Найменування операції	Температура в робочій зоні, °С			Час, хв.	Температура газу, °С	Витрата газів, л/год		
	Загр.	Центр	Газ			N ₂	O ₂	H ₂
Початок	750±5	750±5	750±5					
Герметизація	750±5	750±5	750±5	1		100		
Продування	750±3	750±3	750±3	5		1400		
Завантаження	750±20	750±50	750±25	20		1400		
Прогрівання	750	750	750	10		700		
Нагрів1	790±10	790±10	790±10	10		700		
Нагрів2	815±10	800±10	810±10	5		700		
Стабілізація	815	800	810	10	800	700		
Підпал	815±1	800	810±2	1	800	100	700	75
Горіння	815±1	800±1	815±2	2	800	100	750	250
Піроокиснення	815±1	800±1	810±21	30	800	100	750	250
Гасіння	815±1	800±1	810±2	2	800	100	700	75
Охолодження	650±10	650±10	650±10	60	700			
Вивантаження	650±10	650±50	650±25	20	700			

Вибір способу окиснення залежить від призначення оксиду. Швидкість окиснення в водяній парі вище, отже, для отримання товстих плівок цей метод краще. При необхідності отримувати тонкіоксидні плівки високої щільності з мінімальним зарядом на кордоні кремній-оксид перевага віддається окиснення

в середовищі сухого кисню. Плівки товщиною більше 0,5 мкм формують у вологому кисні. Присутність HCl в робочому середовищі зменшує вміст іонів натрію в оксиді. Достаточнотолстие плівки отримують в технологічному циклі «сухий - вологий - сухий» (товщина оксиду відповідно 0,1 мкм - 0,5 мкм - 0,1 мкм), що дозволяє поєднувати хорошу швидкість і премлемой якість оксиду.

Серед прямих методів отримання SiO₂ можна назвати електрохімічне окиснення кремнію. Процес проводять або в спеціальній електролітичній осередку, або в кислородсодержащей низькотемпературної плазмі. Електролітом служить деіонізованої вода, органічні розчинники, вищі спирти, гліколі. Неорганічні компоненти додаються для регулювання провідності. Анодом є кремній. Подаючи певну напругу на електроди (до 300 - 400 В), створюють умови для здійснення, наприклад, дисоціації молекул води з утворенням атомарного кисню, який окисляє кремнієвий анод. Окиснення кремнію р-типу може бути здійснено в розчині азотної або фосфорної кислоти, в н-метілацетаміде при щільності струму 7 мА / см². При цьому, тільки 54 мкА, тобто 0,8%, витрачається на окиснення, а в основному ток витрачається на електроліз електроліту. Електричні і маскувальні характеристики анодних плівок не вище оксидів, отриманих у вологому кисні. Кращими характеристиками володіють плівки, сформовані за допомогою низькотемпературного іонно плазмового окиснення. Швидкість такого окиснення становить 8-10 нм / хв [7].

1.3. Осадження плівок SiO₂

Існує кілька способів отримання плівок SiO₂ осадженням у вакуумі. Плівки можуть бути отримані методом термовакuumного випаровування, катодного, іонно - плазмового і реактивного розпилення. У разі термовакuumного випаровування оксидні мішені (зокрема, SiO₂) піддаються термічній дисоціації. Це призводить до того, що склад обложених плівок істотно відрізняється від складу вихідного оксиду. Розпад оксидів

відбувається тим інтенсивніше, чим більша різниця між величинами тиску дисоціації оксиду і тиску кисню у вакуумній системі. Прийнято вважати, що для отримання плівки SiO_2 оптимальне залишкове тиск повинен становити 10^{-4} мм. рт. ст. Розкладання оксидів при випаровуванні у вакуумі може бути обумовлено не тільки термічної дисоціацією. Воно також може бути наслідком хімічної взаємодії оксиду з матеріалом випарника або тигля. Наприклад, для зниження швидкості процесу відновлення діоксиду кремнію матеріал випарника покривають шаром платини або паладію. Використання покриттів з благородних металів іноді на два порядки знижує швидкість відновлення оксиду. Проте в процесі вакуумного випаровування SiO_2 частково відновлюється до SiO . Якщо вміст SiO в плівці діоксиду кремнію неприпустимий, то напилену в вакуумі оксидну плівку піддають короткочасної термоокислювальної обробці для переходу SiO в SiO_2 .

Зазначені труднощі отримання оксидних плівок в умовах термовакuumного випаровування відсутні при використанні іонноплазменного або реактивного розпилення. В якості мішені при отриманні плівок SiO_2 іонноплазменним методом використовують плавлений кварц. При реактивному розпиленні вихідним матеріалом є кремній. Швидкість осадження плівок SiO_2 цими методами може бути доведена до 100 нм / с і більше.

Найбільш широко поширений піроліз кремнійоксіорганічних з'єднань, при якому в якості твердого продукту реакції виділяється SiO_2 . Перевагами цього методу є висока однорідність, висока якість плівки і відтворюваність рельєфу. Однак підвищені температури процесу і виділення вуглеводневих радикалів ускладнюють використання цього методу для плівки SiO_2 в контакті з алюмінієвої металізацією. Шари SiO_2 поверх алюмінію краще осаджувати більш низькотемпературним силановим методом, хоча в цьому випадку погано відтворюється рельєф і відбувається осадження пластівчастого продукту на стінках реактора. Температура близько 350 °C необхідна для ущільнення плівки і видалення води. Процес гідролізу можливий навіть при кімнатній температурі. Однак на практиці його ведуть при 500-550 °C, щоб ущільнити

утворюється пухкий осад SiO_2 . Додаткову термообробку (близько 900°C) часто застосовують для поліпшення властивостей плівки SiO_2 у всіх методах осадження. Процеси окиснення та гідроліза можливо проводити в установці епітаксіального нарощування кремнію, що зменшує забруднення шарів сторонніми домішками.

При виборі методу отримання плівки SiO_2 необхідно враховувати призначення шару, швидкість росту, фізико-хімічні особливості утворюється в даному методі плівки (таблиця 1.2), структуру, на якій формується оксид, і інші вимоги [4-8].

Таблиця 1.2

Властивості плівок SiO_2 , отриманих різними методами

№ п. п.	Метод отримання	Температура, $^\circ\text{C}$	Швидкість росту, нм/хв	Густина, г/см^3	Пит. опір, Ом·см	Діел. міцн., $\cdot 10^6$ В/см	Відн. діел. проницн.	Швид. травл. в HF, нм/хв
1.	Сухе окиснення	1200	0,8	2,25	$10^{15}-10^{16}$	9	3,4	80
2.	Окиснення в парах води	800	0,5	2,1	$10^{15}-10^{17}$	2	3,2	100
3.	Анодне окислення	Без нагріву	залежить від густини струму (5–10 мА/см^2)	1,8	$10^{12}-10^{16}$	5,2-20	-	300-450
4.	Реактивне напилення	200	до 30	2,2-2,3	$10^{15}-10^{16}$	6-10	2,5	-
5.	Піроліз ТЭОС $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$	750	до 100	2,2	$10^{15}-10^{16}$	10	3,4	3
6.	Силановий метод	300	50	2,1	$10^{14}-10^{16}$	10	3	6

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Основи проектування в *Silvaco TCAD*

При механічній обробці або предепітаксiальній підготовці, перед проведенням процесів іонної імплантації, дифузії, фотолітографії і ін. На поверхні підкладок формують захисне покриття. В технології виготовлення напівпровідникових приладів і ІС в якості захисних покриттів використовують шари SiO_2 і Si_3N_4 . Вони грають роль маски при локальній обробці напівпровідникових пластин, служать для ізоляції елементів, як підзатворного або шару в МДН-структурах, міжшаровою ізоляцією в багатошарових комутаційних платах, підставою для розміщення плівкових контактних майданчиків і струмоведучих доріжок в ІС, для захисту кристала.

Для комп'ютерного моделювання в даній роботі було використано інструменти *Silvaco TCAD* [14-19]. 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.

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, окиснення, травлення, пошарового нанесення, тощо.

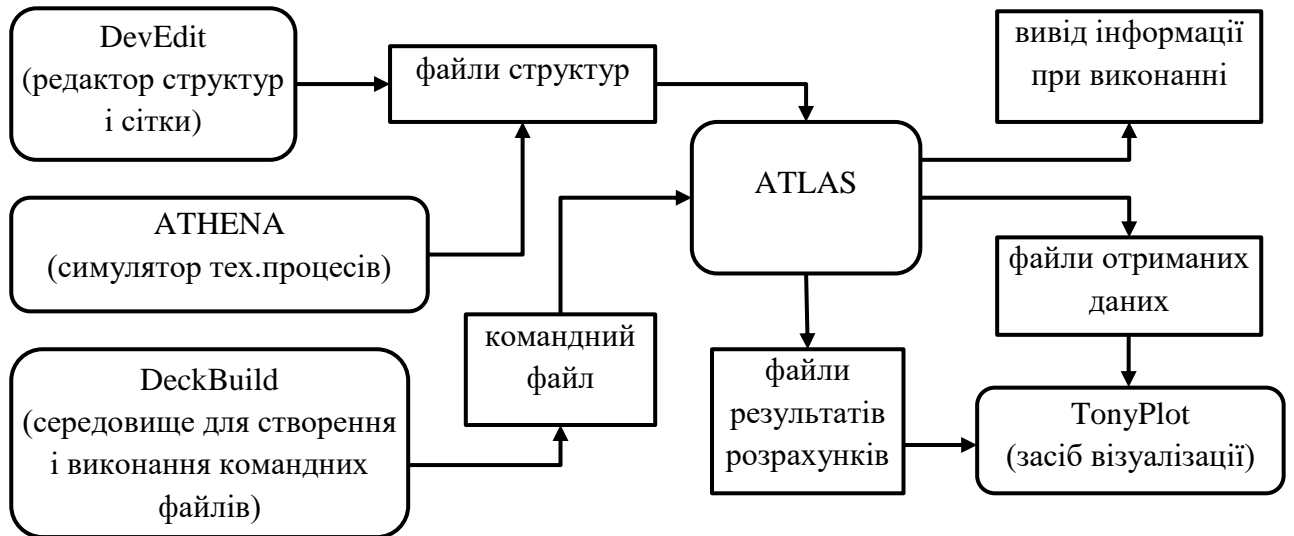


Рис. 2.1. Блок-схема засобів Silvaco TCAD [15]

2.2 Налаштування моделювання процесу окиснення

Діелектричні властивості нітриду кремнію краще, ніж у оксиду, тому при виготовленні структури його товщина береться більш ніж в 2 рази менше.

Наведемо основні команди моделювання процесу окиснення [18,19]:

oxide

dry02 | wet02 [orient = <n>]

[lin.l.0 = <n>] [lin.le = <n>] [lin.h.0 = <n>] [lin.he = <n>]

[l.break = <n>] [l.pdep = <n>]

[par.l.0 = <n>] [par.le = <n>] [par.h.0 = <n>] [par.he = <n>]

[p.break = <n>] [p.pdep = <n>]

[ori.dep] [ori.fac = <n>]

[hcl.pc = <n>][hclt = <n>][hclp = <n>][hcl.par = <n>] [hcl.lin = <n>]

[thinox.0 = <n>][thinox.e = <n>][thinox.l = <n>][thinox.p = <n>]

[baf.dep] [baf.ebk = <n>] [baf.pe = <n>] [baf.ppe = <n>]

[baf.ne = <n>] [baf.nne = <n>] [baf.k0 = <n>] [baf.ke = <n>]

[stress.dep][Vc = <n>][Vr = <n>][Vd = <n>][Vt = <n>] [dlim = <n>]

[material] [/ material]

[diff.0 = <n>] [diff.e = <n>] [seg.0 = <n>] [seg.e = <n>]

[trn.0 = <n>] [trn.e = <n>]

[henry.coeff = <n>][theta = <N>][alpha = <n>] [min.oxidant = <n>]

Параметри управління сіткою:

[Initial = <n>] [split.angle = <n>]

Параметри аналітичних моделей окиснення:

[spread = <n>] [mask.edge = <n>] [nit.thick = <n>] [erf.q = <n>]

[erf.delta = <n>] [erf.lbb = <n>] [erf.h = <n>]

dry02, wet02 - тип окиснення (у вологому або сухому кисні),

orient - орієнтація підкладки (за замовчуванням (100)),

lin.l.0, lin.le, lin.h.0, lin.he, l.break, l.pdep – параметри визначають лінійні коефіцієнти за моделлю Аррениуса,

par.l.0, par.le, par.h.0, par.he, p.break, p.pdep - параболічні коефіцієнти,

ori.dep - параметр визначає, чи буде прораховуватимуться орієнтація пластини в кожній точці поверхні для розрахунку лінійних коефіцієнтів,

ori.fac - відношення лінійних коефіцієнтів на області із заданою орієнтацією пластини до загальної орієнтації.

hcl.pc- числовий параметр -% HCl в потоці газу (за замовчуванням 0),

stress.dep, vc, vr, vd, vt, dlim - параметри визначають залежність виникнення напружень по кристалу від окислення.

2.3. Окиснення полікремнію

Розглянемо моделювання технології окиснення полікремнію і кремнію [18,19]. Так само в структурі наводиться стравлювання полікремнію з формуванням «пташиного дзьоба». Код починається з формування структури, що складається з кремнієвої підкладки, на якій сформовано нічим не закрите

поглиблення, оксиду і полікремнію. Перед окисненням полікремнію за допомогою параметрів інструменту oxide задаються параметри технологічного процесу. Далі структура окислюється за моделлю окиснення полікремнію.

Параметри дифузії беруться з програмного комплексу SSuprem 4 таким чином, щоб структура зберегалась в файл через задані проміжки часу. Параметр dump.pre задає ім'я файлу структури ox01mxxx.xxx.str, в якому xxx.xxx - час етапу дифузії починаючи з першого. Таким чином формується блок зображень проміжних етапів процесу.

go athena

Приклад окиснення полікремнію

line y loc = 0 spac = 0.05

line y loc = 0.6 spac = 0.2

line y loc = 1

line x loc = -1 spac = 0.2

line x loc = -0.2 spac = 0.05

line x loc = 0.2 spac = 0.05

line x loc = 1 spac = 0.2

init orient = 100

Анізотропні травлення області кремнію всередині заданих координат

etch silicon left p1.x = -0.218 p1.y = 0.3 p2.x = 0 p2.y = 0

Формування оксидної майданчики і полікремнієвих затвора

deposit oxide thick = 0.02 div = 1

deposit poly thick = 0.5 div = 5

etch poly left p1.x = -0.1 p1.y = 0.51 p2.x = 0.1 p2.y = -0.55

etch oxide left p1.x = 0

Зміна параметрів окиснення полікремнію в порівнянні з кремнієм

Коефіцієнти, використувані при травленні кремнію

#oxide poly wet par.l.0 = 283.333 par.le = 1.17

#oxide poly wet par.h.0 = 7.00 par.he = 0.78 p.break = 950.

```
#oxide poly wet lin.l.0 = 3.45e4 lin.le = 1.60
```

```
#oxide poly wet lin.h.0 = 2.95e6 lin.he = 2.05 l.break = 900.
```

```
# Коефіцієнти після адаптації для полікремнію
```

```
oxide poly wet par.l.0 = 600 par.le = 1.17
```

```
oxide poly wet par.h.0 = 14. par.he = 0.78 p.break = 950. oxide poly wet
```

```
lin.l.0 = 7e4 lin.le = 1.60
```

```
oxide poly wet lin.h.0 = 6e6 lin.he = 2.05 l.break = 900.
```

```
# Окиснення області
```

```
# Проміжні результати моделювання зберігаються через кожен крок часу
```

```
diffuse time = 30          temp = 1000  wet      dump = 1  dump.prefix = ox01m
```

```
tonyplot -st ox01m * .str
```

```
# Структура зберігається в файл
```

```
structure outfile = ox01.str
```

```
quit
```

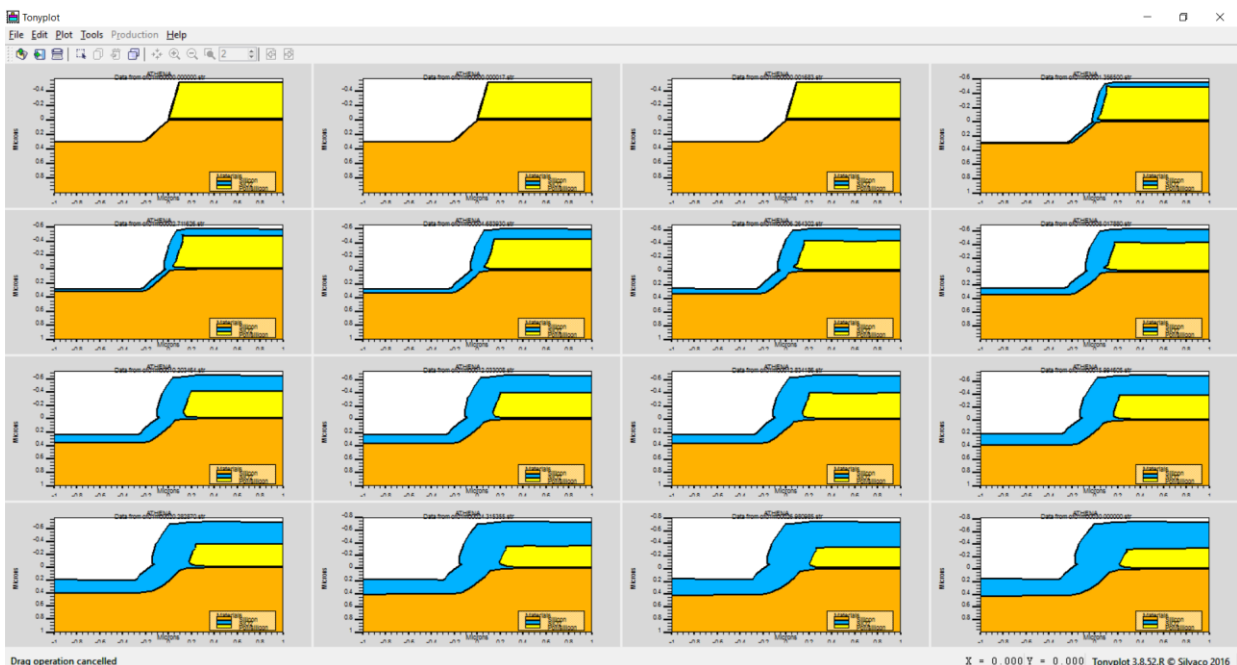


Рис.2.2. Послідовність етапів окиснення полікремнію [18,19]

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Залежність окиснення від параметрів середовища

У кодї прикладу [18,19] демонструється використання програмного модуля SSuprem 4 для моделювання впливу середовища процесу на модель в'язкопружного окиснення. Моделі в'язкопружного окиснення залежно від зовнішнього впливу вимагають більш тривалого часу для розрахунку, ніж використовується за замовчуванням модель спрощеного окиснення (compress), тому використовуються тільки у випадках, коли окиснення проходить при температурах понад 965 ° C (температура протікання з внутрішнім тертям / ламинарного потоку) або коли важливий профіль вирощуваного оксиду. Процеси окиснення, що розглядаються в даній задачі, проводяться при зовнішньому впливі і без нього. В результаті будуються два графіка структур, розраховані за двома різними моделями окиснення.

Для підключення моделі впливу ламінарності середовища використовуються параметри [18,19]:

method viscous (модель в'язкої течії)

oxide stress.dep = t (команда активує залежність окиснення від середовища)

go athena

Залежність окиснення від параметрів середовища

Поперечний переріз LOCOS технології (МОН ІС з товстим захисним шаром оксиду кремнію) в залежності від параметрів середовища

line x loc = -1 spac = 0.2

line x loc = 0 spac = 0.05

line x loc = 1 spac = 0.2

```
line y loc = 0
line y loc = 1
init orient = 100
    # Формування шарів оксиду і нітриду кремнію
deposit oxide thick = 0.02 div = 1
deposit nitride thick = 0.15 div = 1
etch nitride left p1.x = 0
    # Визначення деяких параметрів матеріалів і поділи окиснення
    # Відключення моделювання параметрів середовища (= false)
    # visc.0 - предекспоненціальний множник ламінарного потоку
oxide stress.dep = f
material nitride visc.0 = 1.8e15
method viscous
    # Формування окисного шару протягом 90 хвилин при температурі 100 °C
    у вологому кисні
diffuse time = 90 temp = 1000 wet
structure outfile = ox2_1.str
    # Проведення такого ж моделювання процесу окиснення з підключенням
впливу умов середовища
line x loc = -1 spac = 0.2
line x loc = 0 spac = 0.05
line x loc = 1 spac = 0.2
line y loc = 0
line y loc = 1
init orient = 100
    # Формування шарів оксиду і нітриду кремнію
deposit oxide thick = 0.02 div = 1
deposit nitride thick = 0.15 div = 1
etch nitride left p1.x = 0
```

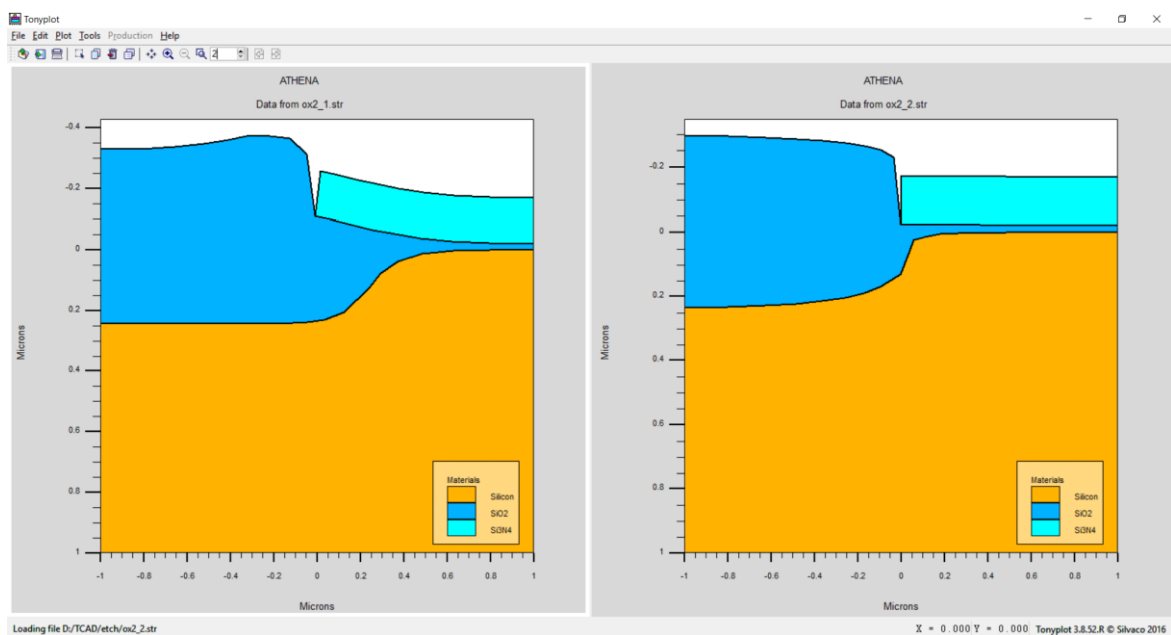


```

# Визначення деяких параметрів матеріалів і мо поділи окиснення
# Підключення моделювання параметрів середовища (= true)
oxide stress.dep = t
material nitride visc.0 = 1.8e15
method viscous

# Формування окисного шару протягом 90 хвилин при температурі 1000°C
у вологому кисні
diffuse time = 90 temp = 1000 wet
structure outfile = ox2_2.str
tonyplot -st ox2_1.str ox2_2.str -set ox2.set
quit

```



а

б

Рис.3.1. Профілі окиснення для 90 хвилин процесу при температурах 1000°C у вологому кисні за відсутності (а) та з урахуванням властивостей середовища (б)

3.2. Поєднання стиків в локальному окисненні канавки

Формування «пташиного дзьоба» для поєднання стиків в локальному окисненні канавки (SILO / Sealed Interface Local Oxidation). Маска з нітриду кремнію наноситься на кремнієву підкладку, покриту оксидом, потім в ній витравлюється область заданої конфігурації. Поглиблення в кремнії виготовляється з використанням декількох послідовних етапів травлення.

Можливості програмного комплексу SSuprem 4 зберігати проміжні стани процесу дозволяють продемонстрували поступове формування «пташиного дзьоба». Налаштування частоти «знімків» процесу проводиться при задаванні параметрів дифузії командами `dump` і `dump.prefix`.

```
go athena
```

```
# Етапи зростання окисного профілю
```

```
line y loc = 0 spac = 0.05 ,
```

```
line y loc = 0.6 spac = 0.2
```

```
line y loc = 1
```

```
line x loc = -1 spac = 0.2
```

```
line x loc = -0.2 spac = 0.05
```

```
line x loc = 0 spac = 0.05
```

```
line x loc = 1 spac = 0.2
```

```
init orient = 100
```

```
# Анізотропне травлення кремнію
```

```
etch silicon left p1.x = -0.218 p1.y = 0.3 p2.x = 0 p2.y = 0
```

```
# Формування шарів оксиду і нітриду і травлення області в них
```

```
deposit oxide thick = 0.02 div = 1
```

```
deposit nitride thick = 0.1 div = 1
```

```
etch nitride left p1.x = 0
```

```
etch oxide left p1.x = 0
```

Захисне окиснення структури зі збереженням проміжних етапів через кожну хвилину

diffuse time = 90 temp = 1000 weto2 dump = 1 dump.prefix = ox3m

tonyplot -st ox3m * .str structure outfile = ox3_0.str

quit

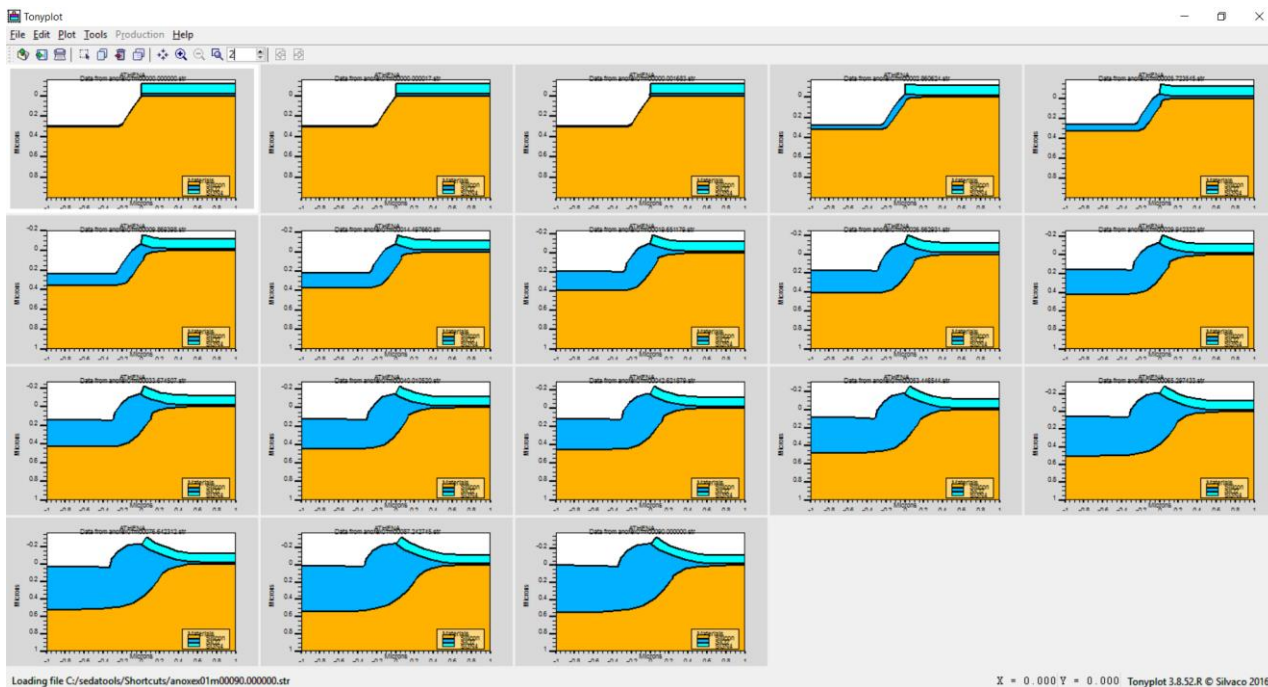


Рис.3.2. Профілі окиснення при поєднання стиків в локальному окисненні канавки

ВИСНОВКИ

1. Для створення надійних високоякісних ІМС потрібно не тільки розуміти основні механізми окиснення, але і мати можливість формувати високоякісний оксид контрольованим і відтворюваним чином. Крім того, щоб гарантувати надійність ІМС, потрібно знати залежність електричних властивостей оксиду від технологічних параметрів процесу окиснення. В технології формування ІМС оксид кремнію використовується для декількох цілей. Він служить в якості маски при іонній імплантації або дифузії легуючої домішки в кремній, для пасивування поверхні структур, для ізоляції елементів компонентів ІМС один від одного (діелектрична ізоляція на відміну від ізоляції приладів p-n-перехід), виступає в ролі одного з основних компонентів в МОН-структурах і забезпечує електричну ізоляцію в металевих багатошарових системах.

2. Потрібне значення товщини може бути встановлено експериментальним шляхом при певних температурі і часу дифузії як товщина оксиду, необхідна для запобігання інверсії типу провідності підкладки кремнію. Для надійності в виробництві використовують плівки, товщина яких кілька збільшена. Найчастіше плівки оксидів, що використовуються для маскування традиційних домішок і стандартних технологічних процесах формування ІМС, мають товщину 0,5-0,7 мкм.

3. Вивчено методику комп'ютерного моделювання технологічних процесів для виготовлення базових елементів електроніки; за допомогою програмного пакету Silvaco TCAD проведено моделювання технологічного процесу окиснення кремнію, зокрема впливу параметрів середовища на процес окиснення, а також поєднання стиків в локальному окисненні канавки (SILO), отримані результати мають узгодження з експериментальними даними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

література:

1. Бургер Р. Основы технологии кремниевых ИС: Окисление, диффузия, эпитаксии / Р. Бургер., Р. Донован. – М.: Мир, 1969. – 454 с.
2. Вавилов В.С. Дефекты в кремнии и на его поверхности / В.С. Вавилов, В.Ф. Киселёв, Б.Н. Мукашев – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 216 с.
3. 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.
4. Василевич В. П. Химическая обработка в технологии ИМС / В.П. Василевич, А.М. Кисель, А.Б. Медведева, В.И. Плебанович, Ю.А. Родионов. – Полоцк: ПГУ, 2001.– 206 с.
5. Гаврилов С. А. Электрохимические процессы в технологии микро- и нанoeлектроники / С. А. Гаврилов, А. Н. Белов. – М.: Высшее образование, 2009. – 257 с.
6. Горлов М.И. Обеспечение и повышение надёжности полупроводниковых изделий в процессе серийного производства / М.И. Горлов, Л.П. Ануфриев – Минск: Бестпринт, 2003. – 202 с.
7. 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.
8. Райзер Ю.П. Высокочастотный емкостной разряд / Ю.П. Райзер, М. Н. Шнейдер, Н.А. Яценко. - М.: МФТИ. Наука. - 1995. - 320 с.
9. Гурвич Л. В. Энергия разрыва химических связей. / Л. В. Гурвич, Г. В. Каранченцев и др. - М.: Наука, 1974.-351 с.
10. Панфилов Ю.В. Оборудование для нанесения тонких пленок в вакууме / 12-й Международный симпозиум «Тонкие пленки в электронике». – ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2002. – 400с.

11. Проценко І.Ю. Технологія та фізика тонких металевих плівок: навч. посібник / І.Ю. Проценко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2000. – 148 с.
12. Дробот П.Н. Нанoeлектроника : учеб. пособие / П.Н. Дробот. - Томск : ТУСУР, 2016. - 286 с.
13. Ефимов И.Е. Основы микроэлектроники: учебник / И.Е.Ефимов, И.Я.Козырь.– СПб.:Изд-во «Лань», 2008. – 384 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 нанoeлектронике / 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 Examples, дата доступа: 29.05.2021 p.
20. Закалик Л. І. Основи мікроелектроніки: навч. посібник. / Л.І. Закалик, Р.А. Ткачук.– Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 1998. –352 с.
21. 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.
22. 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**