

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ФОТОЛІТОГРАФІЇ ЯК БАЗОВОЇ
ІНТЕГРАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

Студент гр. ЕІ-71

А.О. Проноза

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

І.П. Бурик

Конотоп 2021

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ІМС.	5
1.1 Фотолітографія. Методи та основні принципи.....	5
1.1.1 Контактний метод фотолітографії	7
1.1.2 Безконтактний метод фотолітографії з мікропроміжком	9
1.1.3 Проекційний метод фотолітографії	10
1.2 Різновиди фоторезистів	11
1.3 Методи підвищення якості формування зображення.....	13
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	17
2.1 Дослідження можливостей Silvaco TCAD.....	17
2.1.1. Програмний модуль ATLAS, ATHENA.....	18
2.1.2 Програмний модуль OPTOLITH.....	19
2.2. Приклад моделювання фотошаблону	21
2.3. Моделювання «прихованого» зображення в шарі фоторезиста.....	25
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	28
3.1 Проектування 20 нм n-канального MOSFET транзистора.....	28
3.2 Моделювання непланарної оптичної літографії	30
ВИСНОВКИ	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	34
ДОДАТОК А. СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ	37

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є вивчення особливостей процесу фотолітографії як базової інтегральної технології.

Мета роботи полягає у вивченні методики комп'ютерного моделювання фотолітографічних процесів та їх застосування при виготовленні елементів електроніки.

Робота складається із вступу, трьох розділів основної частини та висновків. У першому розділі наведено основні різновиди способів літографії їх поняття типи фоторезистів, а також методи для підвищення якості формування зображення під час проектування елементів інтегральних мікросхем. У другому розділі розглядається основний функціонал програмного середовища TCAD Silvaco, що використовується для моделювання процесу літографії, а також додаткові пакети які розширюють функціонал даного продукту. У третьому розділі були успішно спроектовані структурні моделі n-канального MOSFET транзистора з використанням 60 нм процесу літографії з довжиною затвора 20 нм, а також моделювання непланарної оптичної літографії.

Робота викладена на 37 сторінках, у тому числі включає 17 рисунків, список цитованої літератури із 32 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ФОТОЛІТОГРАФІЯ, ФОТОРЕЗИСТ, ШАБЛОН, МОДЕЛЮВАННЯ, SILVACO TCAD, ATLAS, ATHENA, OPTOLIT

ВСТУП

Бурхливий розвиток мікроелектроніки, що спостерігається в останні роки, став можливим завдяки вдосконаленню техніки. Важливим кроком для створення мікроелектроніки був перехід від електронних вакуумних ламп до приладів, виготовлених з матеріалів, що мають напівпровідникові властивості, а саме це транзистори, діоди або їх сукупність, тобто мікросхеми. Дешевим та доступним методом їх виготовлення є спосіб літографії [1].

Літографія - спосіб формування рельєфу (малюнка) в шарі металу, діелектрика або напівпровідника. Процес літографії засновується з використанням спеціальних матеріалів - резистів, чутливість яких до зовнішнього опромінення і здатність їх при цьому переходити в нерозчинний стійкий до дії травлення стан або, навпаки робить їх ідеальними матеріалами для використання при виготовленні інтегральних мікросхем.

У технології виготовлення інтегральних мікросхем дуже важливе місце належить маскам, що забезпечують локальний характер напилення, легування, травлення, а в деяких випадках і епітаксії. Будь-яка маска є сукупністю отворів (вікон) в шарі суцільного матеріалу. Формуванням масок в планарній технології займається літографія.

Широке застосування літографії обумовлено такими перевагами, як висока відтворюваність результатів і гнучкість технології, що дозволяє легко переходити від однієї топології структур до іншої зміною шаблонів, також високою роздільною здатністю резистів та універсальністю процесів, що забезпечує їх застосування для найбільш найрізноманітних цілей (травлення, легування, осадження), що в свою чергу приводить до високої продуктивності, обумовленою груповими методами обробки [2].

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ІМС

1.1. Фотолітографія. Методи та основні принципи.

Фотолітографія є одним з основних процесів в загальному циклі виготовлення широкого класу напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем. Цей процес стоїть в одному ряду з такими процесами, як дифузія і іонне легування, епітаксія та окислення, вакуумно-термічне випаровування і хімічна обробка.

Під фотолітографією розуміють процес утворення на поверхні підкладки за допомогою світлочутливих матеріалів локальних захисних ділянок плівки (мікро зображення), рельєф яких повторює малюнок топології приладу або схеми, і подальшого перенесення цього зображення на підкладку.

Фотолітографія є основним технологічним процесом при виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем. Вона використовується перед кожною технологічною операцією, головна відмінність тільки в зміні шаблону з малюнком [2].

Сутність процесу фотолітографії полягає в наступному. На поверхню спеціально обробленої пластини (підкладки) наносять тонкий шар світлочутливого матеріалу - фоторезисту. Після висихання фоторезисту на вихідній підкладці утворюється міцна плівка. Опромінення фоторезисту через фотошаблон актинічним світлом призводить до зміни її властивостей. Прояв і полімеризація плівки фоторезисту дозволяють отримати в ній рельєф потрібного малюнка, тобто відкриті (вільні від плівки фоторезисту) та закриті (наявність плівки фоторезисту) ділянки плівки. Шаблон, що утворився в плівці фоторезисту переноситься на підкладку.

Під актинічним світлом розуміють світлове випромінювання, що впливає на фоторезист як в свою чергу викликає протікання фотохімічних реакцій і зміну розчинності опромінених ділянок фоторезисту.

Утворені в плівці фоторезисту «вікна» дозволяють проводити ряд найважливіших технологічних операцій: локальне травлення підкладки з метою видалення шару напівпровідникового матеріалу і створення мезаструктур, видалення захисних діелектричних шарів SiO_2 і Si_3N_4 з метою розкриття «вікон» під дифузію, а також витравлювання металевих шарів з метою створення омичних контактів і струмопровідних доріжок складної геометричної форми.

Перевагами процесу фотолітографії є універсальність, масовість, технологічність, можливість автоматизації. За допомогою фотолітографії на одній підкладці можна отримати велике число елементів майбутніх приладів і мікросхем, що дозволяє проводити групову обробку підкладок заздалегідь обраному технологічному маршруту [3].

Процес фотолітографії відомий давно. Він широко використовується в поліграфічному виробництві. Однак в технології виготовлення напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем він отримав своє особливе, більш глибокий розвиток. За допомогою фотолітографії в напівпровідниковій технології стався якісний перехід від виробництва друкованих плат з розміром елементів в кілька міліметрів до надвеликих інтегральних мікросхем з розмірами окремих елементів менше 1 мкм.

Фотолітографія розвивається в двох напрямках: постійне вдосконалення високоточного обладнання та технологічних процесів з метою стабільного відтворення форми і розмірів малюнка і розробка нових прийомів, що дозволяють розширити граничні можливості процесу створення малюнка на підкладці.

Фотолітографія є складним комплексним технологічним процесом, що включає в себе механічні, оптичні, фізичні, фізико-хімічні та хімічні процеси. До них відносяться: вибір вихідного світлочутливого матеріалу (фоторезиста), його очищення і обробка; підготовка підкладок (хіміко-динамічне очищення); формування світлочутливих плівок на поверхні підкладки; операція термообробки, експонування, прояву, хімічного травлення.

Розрізняють контактний, безконтактний та проєкційний методи фотолітографії [4].

1.1.1. Контактний метод фотолітографії

При контактному способі фотошаблон і пластина з нанесеним фоторезистом стискаються, схематичне зображення показано на рисунку 1.1.

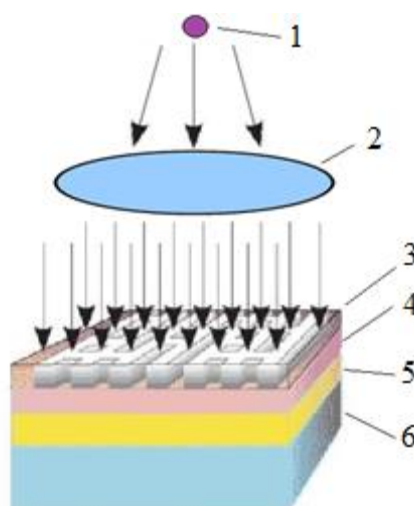


Рис 1.1. Схематичне зображення контактної фотолітографії [5]: 1 – ультрафіолетове випромінювання; 2 – система оптичних лінз; 3 – шаблон; 4 – шар фоторезисту; 5 – шар SiO_2 ; 6 – шар SiO

Пластина встановлюється на вакуумному тримачі, який піднімає її до тих пір, поки пластина і шаблон не зіткнуться один з одним. Щоб провести суміщення топологічного малюнка фотошаблону з попереднім, топологічним малюнком, шаблон і пластину розміщують на 25 мкм один від одного, а пару об'єктивів мікроскопа з сильним збільшенням поміщають позаду від шаблону для одночасного проявлення малюнків шаблону і пластини з двох точок. Об'єктиви мікроскопу встановлені з розведеним полем зору, так що праве око бачить точку на правій стороні шаблону та пластини, а ліве – точку зліва.

Шаблон і пластину позиціонують переміщенням і обертанням вакуумного столика до суміщення топологічних малюнків шаблону і пластини. В цьому положенні пластина позиціонується з шаблоном і проводиться ще одна перевірка на точність суміщення. При експонуванні мікроскоп автоматично відводиться, і промінь

ультрафіолетового (УФ) опромінення висвітлює весь шаблон протягом певного часу експонування. Цей час становить приблизно 15 – 20 с. Інтенсивність експонування на поверхню пластини, помножена на час експонування, дає енергію експонування або дозу опромінення, одержуваного фоторезисту. Внаслідок тісного контакту між фоторезистом і шаблоном при контактному друці значення похибки (~ 0.1 мкм) вище, ніж при використанні інших методів літографії.

Даний метод має недоліки які полягають в наступному. Поверхня підкладки яка виготовлена з кремнію не є абсолютно рівною, тому між нею і фотошаблоном завжди існують мікро щілини, товщина яких може змінюватися в залежності від розмірів пластини. Наявність зазору призводить до того, що розміри і форма елементів спотворюються через розбіжність світлового пучка. Оскільки щільний контакт між пластиною і фотошаблоном неможливий, повітряні зазори призводять до появи дифракційних ефектів і збільшення розмірів зображення. Цьому ж сприяють дифракція світла на краях елементів, розсіювання світла в товщі фоторезисту і багаторазове відбиття від контактуючих поверхонь, що приводить до того, що світло заходить в область геометричної тіні. Також до спотворення малюнка шару призводять механічні та температурні деформації пластини, що викликають зміщення малюнків різних топологічних шарів.

Одною з головних проблеми, що виникають при контактному методі, пов'язані також зі зменшенням ресурсу фотошаблону під час його використання. Контакт фотошаблону з фоторезистом призводить до виникнення пошкоджень на його поверхні, і до накопичення дефектів і частинок фоторезисту, що прилипають до фотошаблону при досить частому використанні. Пил або різноманітні порошинки на поверхні пластини можуть привести до пошкодження шаблону в момент його контакту з пластиною. Пошкоджена ділянка шаблону потім буде проявлена як дефектний топологічний малюнок на всіх інших пластинах, при експонуванні яких використаний цей шаблон. Тому при виготовленні інтегральних мікросхем необхідна чистота процесу і довкілля, в іншому випадку лише деякі елементи схем не матимуть дефектів [5].

1.1.2. Безконтактний метод фотолітографії з мікропроміжком

Фотолітографія з мікропроміжком, що схематично зображена на рисунку 1.2. (фотошаблон і пластина з нанесеним фоторезистом знаходяться один від одного на відстані 10 – 30 мкм) використовує так зване множинне джерело випромінювання, коли УФ – промені падають похило під однаковими кутами до оптичної осі системи експонування. Нахил променів усуває або зводить до мінімуму дифракційні явища поза прозорими ділянками шаблону, що в свою чергу покращує рівномірність опромінення. В результаті досягається висока роздільна здатність, наприклад, при товщині плівки фоторезиста 1,8 мкм можна отримати лінійний розмір 2 мкм при зазорі 10 мкм і менше 3,5 мкм при зазорі 30 мкм.

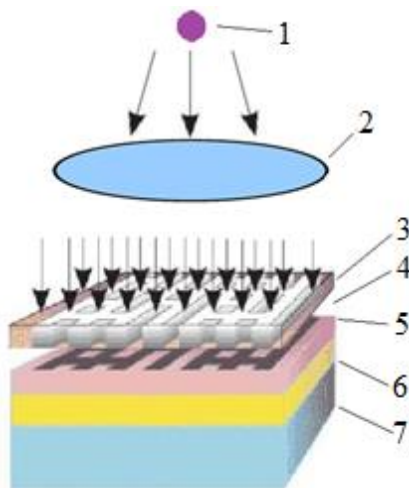


Рис. 1.2. Схематичне зображення безконтактного методу фотолітографії з мікропроміжком [5]: 1 – ультрафіолетове випромінювання ; 2 – система оптичних лінз; 3 – шаблон; 4 – мікропроміжок ; 5 – фоторезист; 6 – шар SiO₂ ; 7 – шар SiO

Однією з головних переваг безконтактного методу є зменшення часу експонування до 2-3 с та збільшення терміну служби фотошаблонів. Проте, в цій технології є і слабкі місця. Збільшення відстані від фотошаблону до підкладки збільшує дифракційні ефекти, що позначається на роздільній здатності даного методу [6].

1.1.3. Проекційний метод фотолітографії

Одним з найбільш перспективних методів, що забезпечують високу роздільну здатність є проекційна фотолітографія, його схематичне зображення представлено на рисунку 1.3. Переваги даного методу полягають насамперед у відсутності механічного контакту шаблону з шаром фоторезиста на підкладці, тобто пошкодження фотошаблону не відбувається, і термін його служби значно збільшується.

Системи проекційної фотолітографії діляться на сканери та степпери. Сканируюча система заснована на експонуванні пластини послідовністю проходів. Суміщення фотошаблону з напівпровідниковою пластиною проводиться один раз і зберігається протягом усього процесу експонування.

У степперах суміщення проводиться кожен раз з вимірюванням координати x , y , а також кут повороту, після чого шукається оптимальний фокус. Для роботи степпера можливо використовувати шаблони з масштабами: 1:1, 4:1; 5:1, 10:1.

Степпери є більш точними, шаблони до таких установок є більш дешевими у виробництві. Вони менш продуктивні, ніж скануючі системи, але мають більшу роздільну здатність.

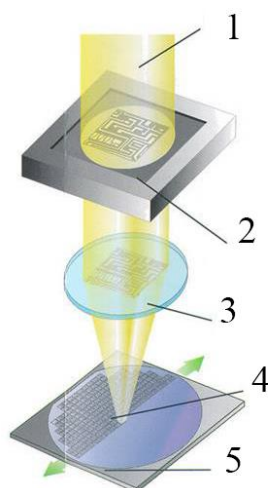


Рис. 1.3. Схематичне зображення проекційного методу фотолітографії [6]: 1 – джерело ; 2 – шаблон; 3 – оптична система ; 4 – фоторезист; 5 – підкладка з кремнію

Установки які засновані на методі проєкційної фотолітографії мають такі варіанти роботи:

- одночасна передача зображення всього фотошаблону на напівпровідникову пластину, покриту фоторезистом;
- послідовне поелементне експонування зображення одного або різних типів модулів зі зменшенням або без нього;
- послідовне креслення зображення на фотошаблоні сфокусованим світловим променем, наприклад, лазерним, керованим від ЕОМ [7].

1.2. Різновиди фоторезистів

Як відомо в основі фотолітографії лежить фотохімічна реакція під дією світла на речовину (фоторезист), в результаті чого відбувається зміна його властивостей.

Фоторезисти представляють собою складні полімерно-мономірні структури, що володіють з одного боку світлочутливими властивостями, а з іншого захисними (або резистивним), тобто витримують нагрівання, дії кислот та лугів.

Залежно від механізму протікання реакцій в фоторезисті при їх опроміненні світлом і особливостей зміни їх властивостей, фоторезисти ділять на позитивні, що зображені на рисунку 1.4 та негативні, як це зображено на рисунку 1.5.

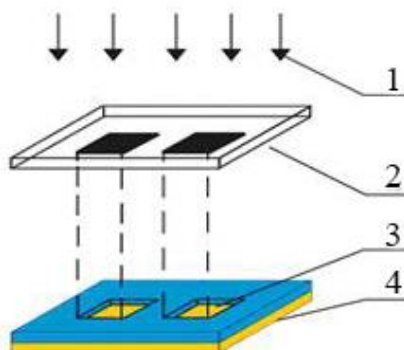


Рис. 1.4. Позитивний фоторезист [7]: 1 – випромінювання; 2 – фотошаблон; 3 – фоторезист; 4 – підкладка

Позитивні фоторезисти під час опромінення утворюють розчинні ділянки, тобто малюнок повторює в точності шаблон.

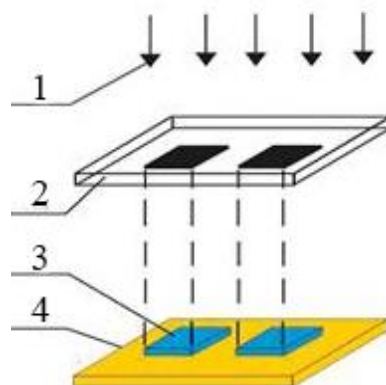


Рис. 1.5. Негативний фоторезист [7]: 1 – випромінювання; 2 – фотошаблон; 3 – фоторезист; 4 – підкладка

Негативні фоторезисти під час опромінення створюють нерозчинні візерунки малюнка на поверхні пластини і після прояву залишаються на її поверхні. Даний малюнок, що утворився на поверхні пластини є оберненим зображенням оригінального шаблону.

Найчастіше негативний фоторезист створюється на основі складного ефіру полівінілового спирту та коричної кислоти – полівінілціннамат (ПВЦ). Готовий фоторезист ПВЦ виглядає як порошок білого або жовтуватого кольору, що розчиняється в органічних розчинах толуолу з хлорбензол, ацетату метіленгліколя з метаксілолом.

Як позитивний фоторезист використовують склад, що містить нафтохінодіазид і сульфоефіри з різними полімерами. Розчинниками служать спирти, кетони, ароматичні вуглеводні, діоксан, ксилол [8].

1.3. Методи підвищення якості формування зображення

Підвищення роздільної здатності оптичної фотолітографії з одночасним збільшенням діаметра робочого поля є однією з найважливіших завдань сучасної технології. В оптичному діапазоні довжин хвиль навіть при використанні найдосконаліших об'єктивів роздільна здатність методу не більше 0,50 мкм, що в багатьох випадках вже не задовольняє вимоги при виробництві ВІС.

Методи формування зображення в різних реєструючих матеріалах розвиваються головним чином в трьох напрямках:

- проєкційна фотолітографія;
- рентгенолітографія;
- електронолітографія.

Рентгенівська літографія – технологія для створення електронних мікросхем яка використовує опромінення резисту за допомогою рентгенівських променів, довжиною хвилі 0,4 – 5 нм.

Маска виготовляється зі стійкого до технологічних впливів матеріалу, а саме полімерного резисту. Необхідний малюнок формується за допомогою шаблону. Рентгенівське випромінювання направляють на поверхню шаблону, яке потім просторово модулює його. Резист поглинає випромінювання, що потрапило на нього, і в ньому формується приховане зображення рентгено-шаблону, що під дією випромінювання в резисті утворює високоенергетичні (з енергією – 1 кеВ) фото- і оже-електрони, які викликають зшивання молекул резисту або їх деструкцію. Залежно від того, який із процесів переважає, при прояві на підкладці залишаються або опромінені, або неопромінені ділянки, тобто виходить негативне чи позитивне зображення малюнка шаблону. Схематичне зображення процесу рентгенолітографії зображено на рисунку 1.6.

Завдяки малій довжині хвилі рентгенівського випромінювання даний метод володіє високою роздільною здатністю, що визначається дифракційним, напівтіньовим та фотоелектронним розмиття кордонів прихованого зображення.

Також при рентгенівській літографії малі радіаційні пошкодження при формуванні структур та висока продуктивність завдяки можливості одночасної обробки великих площ зразка.

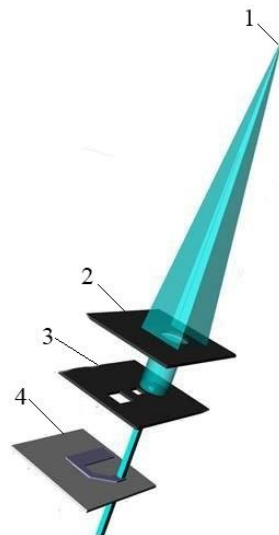


Рис. 1.6. Схематичне зображення процесу рентгенолітографії [8]: 1 – джерело рентгенівського випромінювання; 2 – діафрагма ; 3 – рентгено-шаблон з набором діафрагм ; 4 – підкладка

Рентгенівська літографія пред'являє високі вимоги до рентгено-шаблонів. Мембрана шаблону при досить високій механічній міцності і стабільності повинна пропускати не менше 50% випромінювання (що можливо при товщині ~ 1 мкм).

Найбільшого поширення набули мембрани з кремнію і його сполук – карбиду, нітриду і оксид нітриду. Використовуються також мембрани з нітриду бору, берилію, полімерні, а також комбіновані (нітрид бору - полімер і т.п.).

Резистивні плівки для рентгенівської літографії формують на підкладці з розчину полімеру методом центрифугування. Після сушіння, в процесі якої видаляється розчинник, плівку опромінюють і обробляють в рідинному проявнику. Основні характеристики фоторезисту – чутливість, контрастність, роздільна здатність і стійкість до наступних технологічних процесів, зокрема до плазмохімічного травлення.

Можливі й "сухі" методи нанесення резистів (плазмова полімеризація, термічне напилення) і прояви зображення в них (плазмохімічне і УФ-травлення, сублимація в вакуумі). Розглядається можливість застосування і неорганічних матеріалів, халькогенідного скла і т. п.

В установках рентгенівської літографії 1-го покоління в якості джерел випромінювання служать рентгенівські трубки з нерухомим або обертовим водоохолоджуванним анодом потужністю в кілька кВт. Матеріали анодів (λ) - Сі (1,33 нм), Al (0,834), Мо (0,54 нм), Pd (0,434 нм). Експонування здійснюється у вакуумній камері або в атмосфері гелію.

Недолік таких джерел – низька продуктивність, обумовлена малим коефіцієнтом перетворення енергії електронного пучка в м'яке рентгенівське випромінювання.

Більш продуктивні установки 2-го покоління, в яких точковими джерелами випромінювання є плазма, що порушується лазерним випромінюванням, або потужний струменевий розряд в газі [8].

Другим методом підвищення є електронна літографія є способом формування заданого рельєфу або топології за допомогою електронного променя, а не за допомогою рентгенівського випромінювання чи світла.

Застосування електронно-променевої літографії дозволяє:

- отримувати елементи малюнка з розмірами менш або рівними 0,01 мкм (для фотолітографії і не менше 0,5 мкм);
- з високою точністю контролювати дозу електронного пучка, що падає на резист і підкладку;
- легко відхиляти і модулювати електронний пучок з високою точністю електричними і магнітними полями;
- формувати в ряді випадків топологію схеми безпосередньо на пластині;
- автоматизувати технологію створення топологічного малюнка;
- профілювати електронний пучок.

Науково досліджено, що недоліком електронно-променевої літографії є :

- мала продуктивність в порівнянні з оптичною.

– створення субмікронної топології вимагає фокусування електронного пучка в пляму діаметром близько 0,01 мкм. При таких лінійних розмірах елементів топології сканування і переривання електронного пучка можна проводити тільки при використанні обчислювальних машин.

– система управління при цьому працює на частотах в декілька мегагерц. Схематичне зображення процесу електронної літографії зображено на рисунку 1.7.

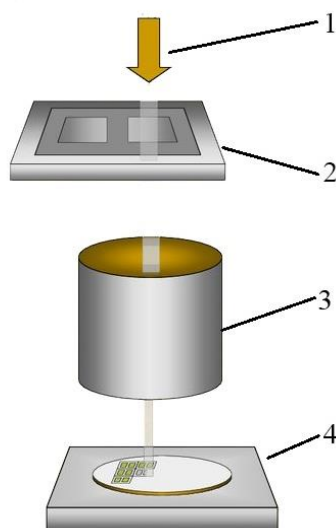


Рис. 1.7. Схематичне зображення процесу електронної літографії [9]: 1 – пучок електронів; 2 – шаблон; 3 – електростатичні лінзи; 4 – підкладка

Автором роботи [9] доведено, що фізичні дефекти при даному методі більш різноманітні і можуть включати :

- заряджання зразка негативним чи позитивним потенціалом;
- помилки розрахунку зворотного розсіювання;
- похибки дози, запотівання (віддалене відбиття назад розсіяних електронів), газоутворення, забруднення, дрейф пучка та частинок;

Оскільки час при проведенні електронно-променевої літографії може легко перевищувати добу, частіше виникають "випадкові" дефекти під час даного процесу [10].

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ТА ТЕХНІКА ЕКСПИРЕМЕНТ

2.1. Дослідження можливостей **Silvaco TCAD**

Для створення перспективних приладів та пристроїв необхідно використовувати сучасні системи проектування, зокрема, системи приладово-технологічного моделювання, такі системи дозволяють чисельно оцінювати вплив різних конструктивних і технологічних рішень на параметри розроблюваних пристроїв, що істотно зменшує витрати на проведення експериментів. На сьогоднішній день одним з найсучасніших програмних пакетів для моделювання мікроелектронних пристроїв є TCAD Silvaco структура роботи якого зображена на рисунку 2.1.

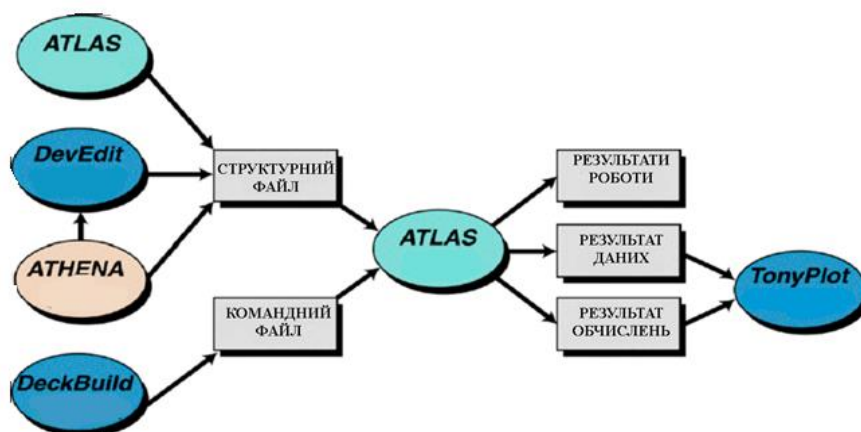


Рис. 2.1. Структура програмного забезпечення **Silvaco TCAD** [11]

TCAD Silvaco забезпечує стійкий зв'язок між виробництвом і проектуванням шляхом прив'язки технологічних процесів та технічних характеристик [9]. При цьому з використанням додаткових модулів система дозволяє досліджувати концепції нових квантово-розмірних приладів, для яких ще не визначені процеси виробництва. Як такі прилади можуть виступати різні модифікації НЕМТ транзисторів на основі GaAs, InP, GaN, AlGaN і SiC квантових гетероструктур з високою рухливістю двовимірного електронного газу в області гетеропереходу [11].

2.1.1. Програмний модуль ATLAS, ATHENA

Моделювання електрофізичних параметрів напівпровідникових приладів в системі TCAD Silvaco здійснює програмний модуль ATLAS.

ATLAS має модульну архітектуру, яка включає в себе безліч інструментальних засобів і розширень, таких як: 2D і 3D моделювання на основі довільних напівпровідників, а також приладів на гетеропереходах.

Моделювання електричних характеристик і приладів з урахуванням термічних ефектів, 2D і 3D моделювання квантових ефектів в напівпровідникових приладах, проведення 3D термічного аналізу і т.п. [11].

Загальна методика моделювання напівпровідникового приладу в пакеті ATLAS складається з декількох кроків:

- задання характеристик гетероструктур. Необхідно вказати параметри шарів, а саме товщину, концентрацію домішки і т.п. Модуль ATLAS функціонує у взаємодії з іншими модулями і програмами пакету Silvaco. Так, наприклад, зчитування моделюється структури можна виробляти з вхідного файлу, створеного раніше в інших модулях Silvaco (ATHENA, DevEdit), або створити структуру безпосередньо в модулі ATLAS з використанням відповідного синтаксису команд;

- генерація розрахункової сітки для розрахунку відповідних систем електрофізичних рівнянь в її вузлах, зокрема, для вирішення систем рівнянь Шредінгера і Пуассона, що враховують наявність квантових ефектів в гетероструктурах;

- розрахунок величини спонтанної і п'єзоелектричної поляризації між шарами. Модуль ATLAS надає три різні моделі поляризації [12]. Зокрема, за допомогою останньої моделі TEN.POLAR можна обчислити не тільки величину спонтанної і п'єзоелектричної поляризації, а також є можливість для розрахунку механічної напруги в гетероструктурах, що виникає через неузгодженості параметрів кристалічної решітки;

- розрахунок концентрації носіїв з урахуванням рішення систем рівнянь Шредінгера і Пуассона і рухливості носіїв заряду. Модуль містить велику кількість

моделей рухливості зарядів, що враховують як температурну залежність, так і залежність рухливості від поперечної складової поля;

- вибір чисельного методу моделювання;
- розрахунок енергетичних діаграм і електрофізичних параметрів;
- аналіз характеристик модельованого приладу. У середовищі модуля ATLAS можливе проведення основних видів аналізу, в тому числі аналіз по постійному струму DC, частотний аналіз AC і аналіз перехідних процесів. Моделювання перехідних процесів може бути здійснено для джерел напруги в формі лінійної, показовою і синусоїдальної функції. також в модулі ATLAS передбачений алгоритм для автоматичного виведення складних вольт-амперних характеристик.

За цим алгоритмом можливо автоматичне перемикання з режиму граничних умов по напрузі в режим граничних умов по струму і навпаки. Вміст вихідних файлів представляється в графічному вигляді.

Для перевірки моделі використовують тестові дані (виміряні вольт-амперні, вольт-фарадні характеристики і т.п.). Збіг результатів моделювання і вимірювань говорить про достовірність отриманих даних. Тестування повинне бути цілеспрямованим і систематизованим, а ускладнення тестових даних має відбуватися поступово [13].

Мета такого дослідження полягає у виявленні та оптимізації конструктивних особливостей гетероструктур, що забезпечують поліпшення їх приладових характеристик (підвищення робочого діапазону частот, збільшення крутизни, пробивної напруги і т.п.).

2.1.2. Програмний модуль OPTOLITH

Модуль програмного забезпечення Silvaco TCAD Optolith моделює чотири ключові етапи обробки фотолітографії, а саме модуль обчислення відповідає за різноманітні особливості маски, модулі експонування імітують поширення світла через фоторезист і обчислюють розподіл фотоактивної складової, модуль випікання після експозиції імітує перерозподіл (дифузію), модуль розробки обчислює

видалення експонованого фоторезисту. Блок-схема роботи модуля Optolith зображена на рисунку 2.2.



Рис. 2.2. Блок-схема роботи модуля OPTOLITH

Останні три етапи однакові для проєкційної літографії, тоді як окремий модуль зображення реалізований для контактного методу. Зображення наближеності викликається шляхом вказівки параметра GAP (відстань між площиною маски та поверхнею опору) в операторі IMAGE.

Літографічне зображення обчислюється за допомогою дифракції Френеля за формулою 2.1.

$$r_n = \sqrt{n \frac{ab}{a+b}} \lambda \quad (2.1)$$

де a - відстань від джерела світла; b - відстань від отвору до точки спостереження; λ - довжина хвилі.

Спрощена версія методу поширення променя використовується для опису поширення світла через проміжок. На відміну від більш складного методу у фоторезисті, в цьому випадку щілина заповнена однорідним матеріалом, тому показник заломлення не залежить від координат в зазорі, а залежить від часу та потужності опромінення фоторезисту.

Модель реалізована для прямокутних і круглих масок, а також для масок, що складаються з одного або декількох кілець. Параметри X.CIRCLE, Z.CIRCLE,

RADIUS, RINGWIDTH і MULTIRING в операторі LAYOUT можуть бути використані для вказівки кругової або кільцевої маски. Також напівтонові маски можуть бути задані параметром TRANSMIT в операторі LAYOUT. Модульована маски діаметром 20 мкм наведено на рисунку 2.3.

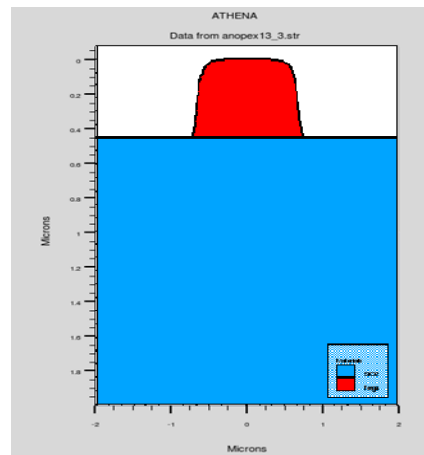


Рис 2.3. Приклад модуляції маски розміром 20 мкм [14]

Параметри експозиції, а також параметри обробки зазвичай надаються виробниками фоторезистів. Однак вони можуть не надаватися для конкретного освітлення. У цьому випадку параметр встановлюється в стандартному режимі. Для такого встановлення або калібрування можна використовувати кілька практичних інструментів, наданих Silvaco. Сюди входять оптимізатор та DBInternal можливості DeckBuild та Virtual Wafer Fab та їх виробничих інструментів.

2.2. Приклад моделювання фотошаблону

Розрахунок починається з розподілу інтенсивності світлового потоку на поверхні пластини і формування зображення. Для цього необхідно задати інформацію про параметри оптичної установки, а також характеристики фотошаблону і підкладки.

При дослідженні контактної фотолітографії значення мають такі параметри, як довжина хвилі випромінювання, конфігурація шаблону, ступінь прозорості його захисного шару, зазор між шаблоном і фоторезистом. При створенні моделі

проекційної літографії необхідно вказати також числову апертуру об'єктива, дефокусування зображення. В основі підходу, використовуваного програмним алгоритмом для розрахунку розподілу світла, лежать наукові праці Хопкінса, який вніс великий внесок у дослідження процесів дифракції в оптичних системах.

Сформований на даному етапі розподіл інтенсивності світла може бути корисним при аналізі спотворення форми елементів, несиметричності, контрасту зображення, та світлочутливості фоторезисту [15].

Світлочутливість – це величина, зворотна кількості поглиненої світлової енергії, необхідної для отримання в даному шарі фоторезиста певного фотохімічного ефекту, який складається у втраті або придбання розчинності опромінених ділянок фоторезиста та розраховується за формулою 2.2

$$S = \frac{1}{(E \cdot t)} = \frac{1}{H} \quad (2.2)$$

де E - інтенсивність опромінення шару фоторезиста товщиною h , в якому стався необхідний фотохімічний ефект; t - час витримки; H - експозиція.

Крім того, інтерес представляє дослідження впливу параметрів проекційної установки, в тому числі числової апертури, довжини хвилі на сформоване зображення. Ще однією оригінальною можливістю, що надається програмним пакетом, є моделювання впливу аберацій проекційного об'єктива на формування фотолітографічного малюнка [16].

Застосування модуля Optolith дозволяє не тільки дослідити вплив окремих видів аберацій астигматизм, сферичних аберацій, диструкцій, кривизна поля зображення, дефокусування, а також їх комбінацій на сформований малюнок схеми, але і створювати «повітряний» зображення віртуальними проекційними об'єктивами з різним набором аберацій [17]. На рисунку 2.4 представлено розподіл інтенсивності світла через фотошаблон на поверхні пластини при двох різних значеннях дефокусування зображення.

Для отримання даних зображень тут і далі в модель були закладені наступні параметри проекційної установки: i-line, NA = 0,6, форма джерела випромінювання

кругла. Значення дефокусування (defocus): 0 і 1. Видно, що при значенні defocus = 1 спостерігається скруглення країв і зміна розмірів елементів, тоді як при меншому значенні цього параметра краю елементів стають чіткішими.

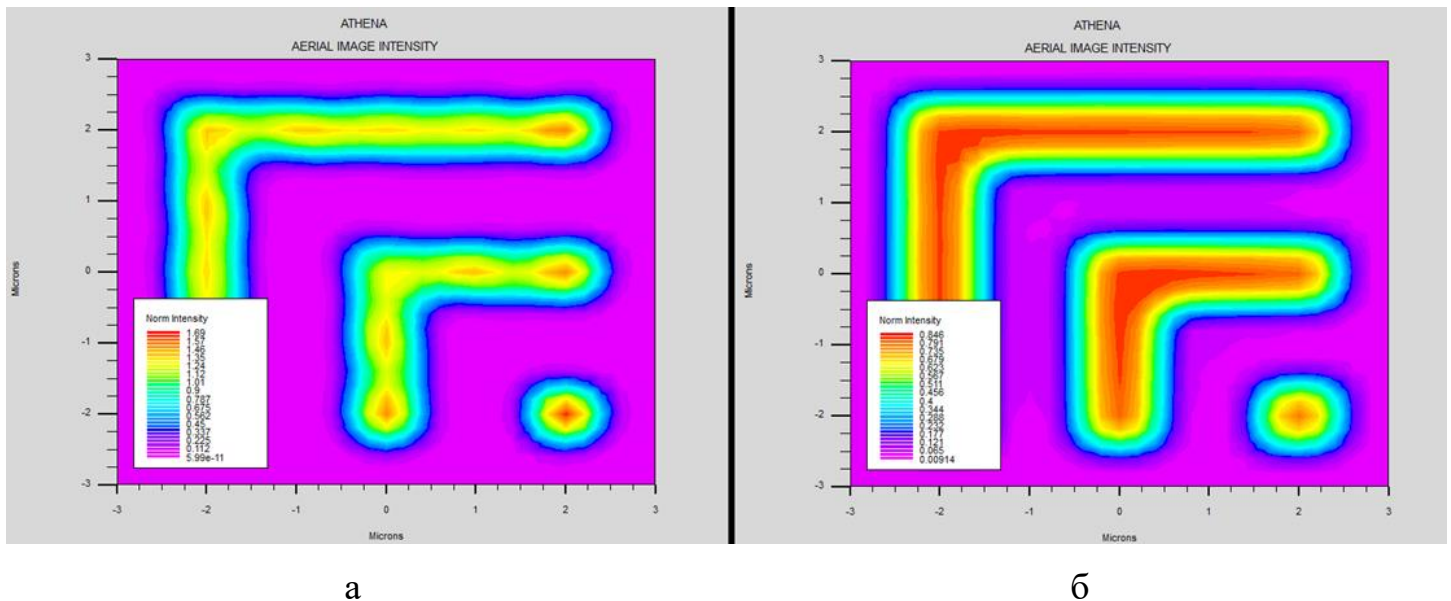


Рис 2.4. Розподіл інтенсивності світла на поверхні пластини при значеннях [17]: а - defocus = 1; б - defocus = 0,1

Головним чинником, що обмежує процес мініатюризації елементів на схемі з використанням фотолітографії, є дифракція, що виникає при проходженні світла через малюнок фотошаблону, елементи якого розташовані на відстані, меншій довжини хвилі експонування випромінювання [18]. При цьому сусідні елементи на схемі можуть стати невиразні. Для зменшення впливу даного ефекту були розроблені спеціальні методи збільшення роздільної здатності оптичної системи, що дозволили зменшити критичний розмір елементів на схемі.

Відпрацювання параметрів і режимів застосування даних методів на практиці є досить трудомістким процесом, що вимагає проведення безлічі емпіричних досліджень. Додатковим інструментом, що дозволяє досліджувати методи отримання зображень високої роздільної дозволу, є сучасні програмні засоби для моделювання

літографії. Зокрема, в Silvaco TCAD доступні такі методи, як застосування шаблонів, корекція оптичного ефекту близькості та інше.

Досить відомим є метод позаосьового освітлення, що передбачає використання джерел випромінювання складної форми. Кут падіння світлового потоку в цьому випадку вибирається таким чином, щоб сусідні лінії освітлювалися променями з протилежними фазами, що призводить до зменшення мінімального розміру і підвищення глибини фокуса проекційної системи.

Даний метод дозволяє збільшити крутизну стінок елементів прихованого зображення і таким чином підвищити роздільну здатність фотолітографії до 40%. Найбільш простим способом підвищення дозволу є корекція оптичного ефекту близькості, яка полягає в модифікації малюнка фотошаблону.

На рисунку 2.5 показаний приклад фотошаблону розробленого в Silvaco TCAD [19].

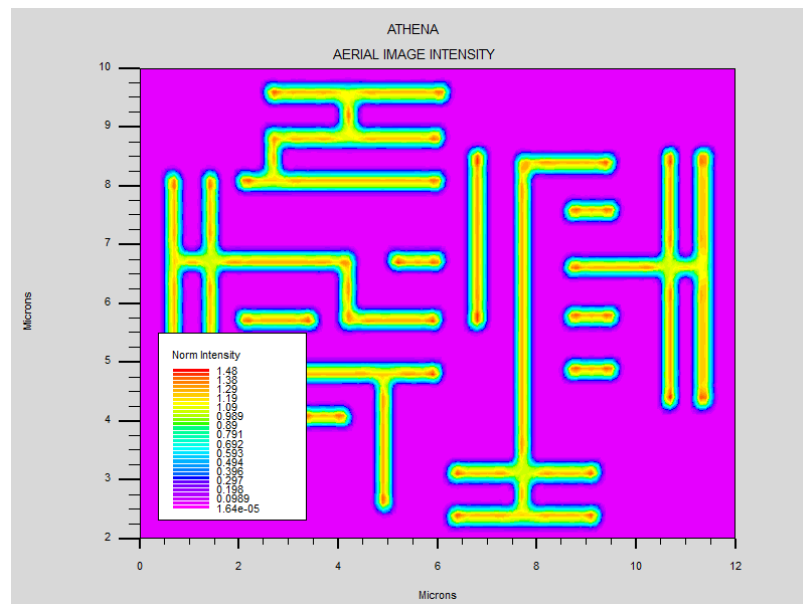


Рис 2.5. Приклад фотошаблону розробленого в Silvaco TCAD [19]

Можливості для створення фотошаблонів і шаблонів з корекцією оптичної близькості, а також пошуку їх оптимальних конфігурацій надає спеціальний графічний редактор MaskViews, що входить до складу програмного пакету.

2.3. Моделювання «прихованого» зображення в шарі фоторезиста

Головним етапом фотолітографії є формування «прихованого» зображення в структурі фоторезиста. При цьому розраховуються фізикохімічні процеси, що відбуваються всередині фоторезиста в результаті впливу на нього актинічного світла. Великий внесок у розвиток даної області моделювання вніс Рік Дилл, який висловив припущення, що концентрація інгібітора в певний момент часу є функцією так званих параметрів, що описують процес поглинання світла в плівці фоторезисту і його оптичну чутливість. Розрахунок розподілу інтенсивності випромінювання і, отже, концентрація фоточутливого компонента в плівці резисту відбувається за допомогою чисельного рішення рівнянь Гельмгольца, що та розраховується за формулою 2.3 для чого необхідні знання товщини і оптичних констант фоторезиста і розташованих під ним шарів [20].

$$(\Delta + k^2)U = f \quad (2.3)$$

де Δ – це оператор Лапласа, k – параметр, а невідома функція U .

Великий вплив на зовнішній вигляд «прихованого» зображення надає ряд оптичних явищ, що виникають в шарі фоторезиста в процесі експонування. До них можна віднести відображення, дифракцію, інтерференцію світлового пучка, розсіювання електромагнітної хвилі в непланарній структурі та інші явища, що призводять до деяких небажаних оптичних ефектів і погіршення якості одержуваного малюнка. Як приклад подібних ефектів можна привести стоячі хвилі, а також нелінійну залежність дози експонування, необхідну для повного прояви фоторезиста, від товщини резисту.

Стоячими хвилями називають коливання інтенсивності випромінювання до глибини шару фоторезисту, мають періодичний характер. Причиною виникнення даного ефекту є інтерференція падаючої і відбитої від кордону розділу фоторезист-пластини світлових хвиль, що призводить до виникнення максимумів і мінімумів інтенсивності світла всередині плівки резисту. Утворений в результаті цього

хвилястий край проявленого профілю фоторезисту значно погіршує контроль розмірів і форми елементів схеми. Нелінійна залежність дози експонування E0 від товщини резисту обумовлена взаємодією світлових хвиль, відбитих від верхньої і нижньої меж плівки фоторезиста.

Дана залежність визначається кількістю відбитого і поглиненого плівкою випромінювання і являє собою коливальну криву, загасаючу в міру збільшення товщини фоторезиста.

Негативним наслідком є великий розкид розмірів елементів в результаті щодо невеликих коливань товщини фоторезиста, що на практиці зустрічається досить часто. Для наочного уявлення даного ефекту також використовуються коливальні криві, що відображають розміри критичного розміру елементів і коефіцієнта відбиття від товщини шару фоторезиста.

Відомими методами боротьби з розглянутими негативними ефектами на практиці є підбір оптимальної товщини фоторезиста, застосування верхніх і нижніх антивідбиваючого покриття, вибір відповідного матеріалу підкладки та ін.

У разі утворення стоячих хвиль також допомагає проведення сушки фоторезиста. Для впровадження описаних методів мінімізації небажаних оптичних ефектів в реальну технологію потрібне проведення численних експериментів для підбору оптимальних параметрів технологічного процесу і відпрацювання режимів, що спрощується із застосуванням засобів приборно-технологічного моделювання.

Silvaco TCAD пропонує можливості для моделювання всіх представлених вище методів боротьби з негативними ефектами, що впливають на формування «прихованого» зображення. На рисунку 2.6 представлено розподіл фотоактивного компонента в шарі фоторезиста після експонування з вираженим ефектом стоячих хвиль до і після проведення постекспозиційної сушки. Видно, що дана операція позитивно вплинула на формований профіль фоторезиста, згладивши нерівні краї зображення в результаті дифузії речовини. Крім розподілу фотоактивного компонента, в програмному пакеті доступно також відображення розподілу інтенсивності світла всередині плівки фоторезиста при експонуванні.

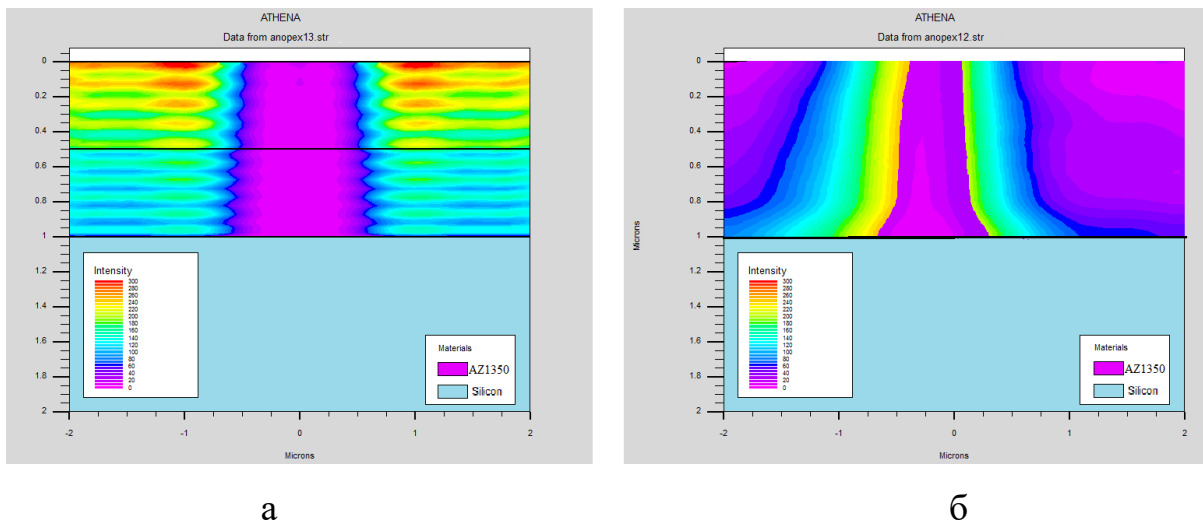


Рис 2.6. Розподіл фотоактивного компонента в шарі фоторезиста [20]: а – до сушки фоторезиста; б – після сушки фоторезиста

Результати моделювання іншого відомого методу боротьби з небажаними оптичними ефектами представлені на рисунку 2.7.

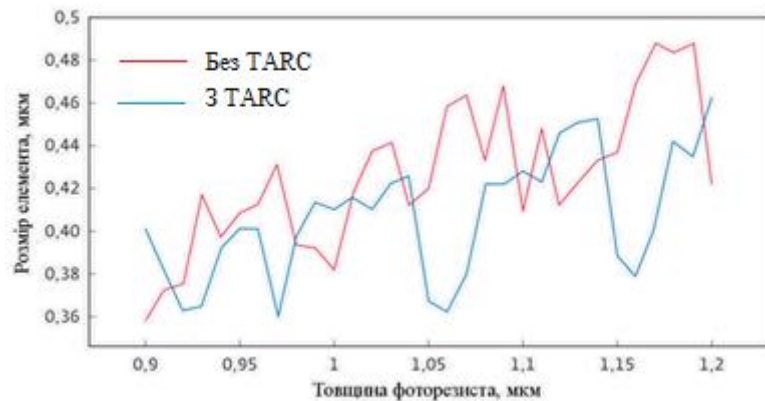


Рис 2.7. Залежність розміру елемента від товщини фоторезиста [20]

В даному випадку в технологічний процес була введена додаткова операція нанесення антивідбиваючого покриття поверх шару фоторезиста (TARC). Ширина вікна в фотошаблоні, закладена в програмному пакеті та становила 4 мкм. Можна помітити, що з застосуванням даного методу амплітуда коливальної кривої залежності розміру елемента від товщини фоторезиста стала значно менше.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Проектування 20 нм п-канального MOSFET транзистора

У даній частині розділу показаний процес створення п-канального MOSFET транзистору, виготовленого за технологією 60 нм літографії.

Основні переваги цього процесу:

- імплантація області каналу не потрапляє до підзатворного діелектрика;
- в кремнії при несталій прискореній дифузії не виникають додаткові дефекти;
- для процесу імплантації потрібні дуже малі енергії;
- з використанням 60 нм літографії можна виготовити транзистори з довжиною затвора 20 нм. На наступному рисунку 3.1 наведено структурну модель п-канального MOSFET транзистору, виготовленого за технологією 60 нм [21].

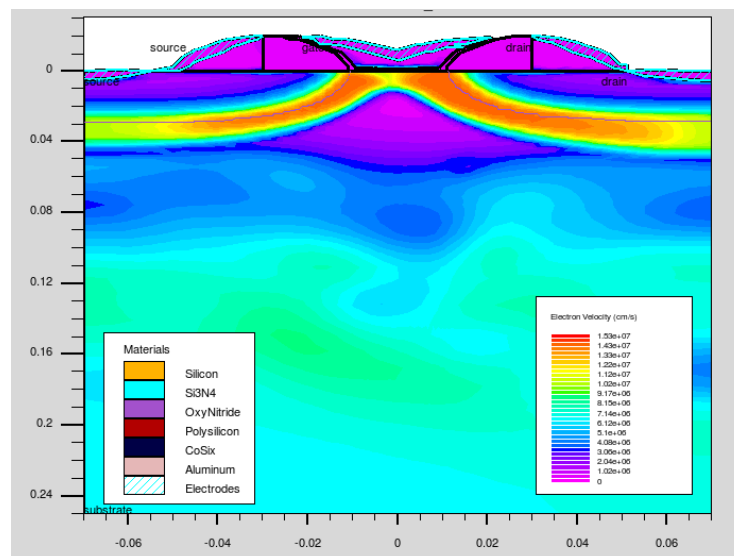


Рис 3.1. Структурна модель п-канального MOSFET транзистору, виготовленого за технологією 60 нм

При імплантації області каналу структура практично не руйнується, така технологія не впливає на область затвора. Области витoku і стоку також створюються

таким чином, що кремнієва пластина не пошкоджується. Виникаючі при дифузії ефекти, які приводять до руйнування структури пластини, в даному процесі виключені: енергія імплантації становить величину 10 кеВ [22].

Вплив нітриду кремнію на сформовану структуру розраховується в редакторі Athena і використовується при моделюванні характеристик транзистора в якості додаткового параметра напруги структури, яке відображається в зміні ширини забороненої зони.

У редакторі Atlas настройки впливу напружень структури на ширину забороненої зони задаються параметром stress [23].

Рухливість регулюється параметрами $egley.n$ і $egley.p$ для електронної та інших складових, відповідно. У розрахований файл структури при проведенні процесу моделювання поміщаються також рухливість електронів і їх швидкість. Змодульований ВАХ транзистора зображена на рисунку 3.2.

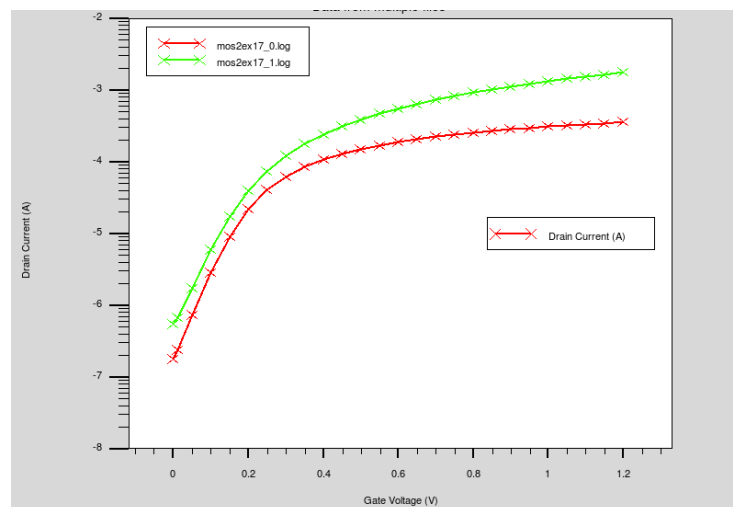


Рис 3.2. ВАХ n-канального MOSFET транзистора, виготовленого за технологією 60 нм

З цих параметрів можна визначити, що велика частина каналу виходить на насичення через дуже малих розмірів транзистора: щільність струму при $V_g = V_d = 1.2$ В становить 2000 мкА/мкм.

3.2. Моделювання непланарної оптичної літографії

У Silvaco TCAD для моделювання фотолітографії використовується модуль оптичної літографії Optolith, який дозволяє проводити непланарну літографію на поверхні складної структури, що зображено на рисунку 3.3 сформованої з використанням програмного модуля SSuprem 4 і блоку Elite.

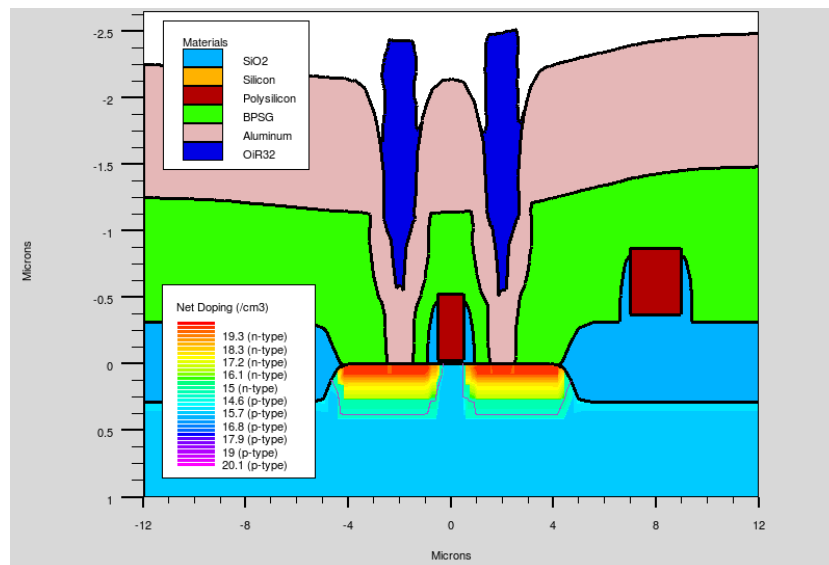


Рис 3.3. Структура транзистора змодельованого методом непланарної оптичної літографії

Виготовлення структури починається з вибору кремнієвої підкладки. При визначенні основних параметрів підкладки задається досить велика сітка моделювання. Параметр `po.imr` говорить про те, що внесення домішок з вихідну структуру не представлено. В результаті підвищується швидкість розрахунку процесу і створюється основа для перерахунку рельєфної структури із запровадженою домішкою. Якщо розрахунок проводиться відразу на рельєфній поверхні то сильно знижує точність результату [25].

Безпосереднє моделювання літографічного процесу починається з нанесення тонкої окисної плівки, яка формує аналог затворного діелектрика. Далі наноситься і частково стравлюється нітрид кремнію – він визначає вертикальний рельєф, за яким

будуть проходити кордони областей травлення. Після формування нітридної маски проводиться захисне окислення і видаляється нітрид.

Наступним етапом йде нанесення і формування полікремнієвого затвора травленням заданої форми [26].

Після того, як проміжна модель приладу була збережена, проводиться імплантація домішки в структуру. В режимі `no.impr` цей етап не проводиться. Далі на стінки витравлених областей наноситься з використанням вертикальної моделі травлення шар оксиду. Наступним етапом проводиться імплантація витоку і стоку (в режимі `no.impr` цей етап не проводиться). Після імплантації витоку і стоку проводиться відпалювання. Цей етап проходить швидше в режимі без впровадження домішок, оскільки при дифузійному розгоні домішок повинні проводитися досить серйозні розрахунки, а в її відсутності вони не актуальні.

Після відпалу методом центрифугування наноситься скло (при нанесенні рельєф поверхні згладжується). Для опису процесу нанесення скла з модуля Elite підключається машина для нанесення матеріалів, в якій як основний керуючий процес параметрів використовуються `SMOOTH.WIN` і `SMOOTH.STEP` (визначають розмір зерна і ступінь шорсткості поверхні при нанесенні) [27].

У наступному блоці технологічних операцій наноситься фоторезист, в якому травленням формуються області заданої геометрії та активується машина травлення структури у вологому кисні, потім зберігається файл структури і видаляється весь фоторезист.

Далі короткостроковим травленням у вологому кисні видаляються шви в структурі і наноситься алюміній (використовується модель напівсферичної краплі з модуля Elite).

На наступному етапі наноситься фоторезист (використовується модель нанесення скла, створена раніше). В результаті поверхня структури стає практично планарною. Тип фоторезиста визначається за допомогою параметра `name.resist` з бібліотеки фоторезистів в файлі моделі (як фоторезист був використаний `OiR32`) [28].

Після нанесення фоторезисту моделювання переходить з модуль `Optolith`. Тут відбувається детальний аналіз структури фотолітографії [29]. На першому етапі

формується зображення приладу. Параметри `illumination`, `illum.filter`, `projection` і `pupil.filter` задають налаштування освітлювальної системи.

Параметр `layout` визначає два типи масок. Параметр `lay.clear` видаляє всі створені раніше дані про топології. Якщо освітлення і топологія задані вірно, підключається модуль формування зображення. Параметр `image` активує модуль і визначає вікно, в якому буде сформовано зображення. Параметр `dx` задає дискретизацію по осі X, а параметр `one.d` показує на те, що зображення буде плоским. Параметр `clear` визначає маску як пусте поле з темними областями, заданими в `layout` [30].

Налаштування `optical` задає величину рефракції для матеріалу BPSG на довжині хвилі 0.365 мкм. Параметр `expose` визначає експонування фоторезисту по побудованому раніше зображенню. Після експонування параметр `bake` забезпечує відпалювання і розраховує дифузію світлочутливих компонентів. При проведенні моделювання використовується модель `mask` до заданого часу процесу TIME, кількістю кроків, на яких будується сітка з певною кількістю підрівнів в кожному кроці, на яких сітка не перераховується [31].

Таким чином, при правильному підході Silvaco TCAD може стати додатковим інструментом для оптимізації параметрів оптичної установки, вибору режимів літографічного процесу, а також пошуку шляхів мініатюризації елементів на схемі, приводячи до зменшення тимчасових і грошових ресурсів.

Робота може бути корисна технологам, які застосовують фотолітографію на практиці. Зокрема, моделі можуть бути використані для підвищення роздільної здатності проекційної літографії, а також боротьби з негативними оптичними ефектами, що виникають в резистивних плівках при експонуванні [32].

ВИСНОВКИ

1. Фотолітографія є основним технологічним процесом при виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем. Сутність процесу фотолітографії полягає в покроковому проведенні процесів, а саме на поверхню підкладки наносять тонкий шар фоторезисту, потім проводять опромінення фоторезисту через фотошаблон актинічним світлом, що призводить до зміни її властивостей. Прояв і полімеризація плівки фоторезисту дозволяють отримати в ній рельєф потрібного малюнка, тобто оголені зони від плівки фоторезисту або закриті. Шаблон, що утворився в плівці фоторезисту переноситься на підкладку та витравляється.

2. Представлений короткий огляд системи автоматизованого проектування SILVACO TCAD та визначені основні можливості програми для моделювання процесу фотолітографії, виділені найбільш цікаві програмні модулі. Вивчено особливості створення моделей фотолітографії в програмному пакеті від компанії Silvaco. Представлені в роботі моделювання різних етапів фотолітографії дозволяють в доступній формі продемонструвати можливості модуля OPTOLITH, ATHENA, ATLAS а також запропонувати напрямки для моделювання.

3. Порівняли ширину вікна в змодельованому фотошаблоні при закладеному в програмному пакеті значенні, що становить 4 мкм та помітили, що з застосуванням методу вводу додаткової операції нанесення антивідбиваючого покриття поверх шару фоторезиста амплітуда коливальної кривої залежності розміру елемента від товщини фоторезиста стала значно менше.

4. Використавши SILVACO TCAD продемонстрували моделювання n-канального MOSFET транзистора з використанням технології 60 нм літографії та з довжиною затвора 20 нм. За допомогою змодельованого графіку визначили, що велика частина каналу виходить в насичення через дуже малі розміри транзистора та щільність струму I при $V_g = V_d = 1.2$ В становить 2000 мкА/ мкм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fundamentals and Applications of Nanophotonics/ Joseph W. H. // Woodhead Publishing, UT, USA, 3 December 2016. – P. 13–18.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники / Степаненко И.П. – Москва: «Лаборатория базовых знаний», 2000. – 488 с.
3. Пресс Ф. П. Фотолитография в производстве полупроводниковых приборов/ Пресс Ф. П. – Москва: Энергия, 1968. – 167с.
4. Пресс Ф. П. Введение в фотолитографию / Пресс Ф. П., Лаврищева В. П. – Москва: Энергия, 1977, – 280с.
5. <https://www.sciencedirect.com> – ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books : дата доступу: 27.04.2021 р.
6. <https://www.zeiss.com> – ZEISS International : дата доступу: 27.04.2021 р.
7. Inverse lithography technology (ILT) mask manufacturability for full-chip device/ Kim B., Suh S. S., Cho H., Xiao G., Son D. H.// Proc. SPIE. – 2009. – P. 11–17.
8. <https://www.indeed.com> – Science Systems and Applications, Inc. : дата доступу: 27.04.2021 р.
9. Балашов А.Г. Нанoeлектронные устройства и их модели/ Балашов А.Г., Крупкина Т.Ю., Лосев В.В., Старосельский В.И. – Москва: МИЭТ, 2010. – 98 с.
10. Торхов Н.А. Физическое моделирование GaN/AlGaN НЕМТ наногетероструктур / Торхов Н.А., Бабак Л.И., Божков В.Г., Разжувалов А.Н., Сальников А.С. – Москва : ТУСУР, 2012. –151с.
11. <http://www.silvaco.com> – TCAD Silvaco : дата доступу: 27.04.2021 р.
12. <http://www.silvaco.com> – Normally-off AlGaIn/GaN HFET with p-type GaN Gate and AlGaIn Buffer : дата доступу: 27.04.2021 р.
13. Technology CAD of Nanowire FinFETs / Maiti T.K., Maiti C.K. // Nanowires, Book edited by: Paola Prete. – Croatia: INTECH. – 2010. – P. 395-414.
14. Silvaco, DeckBuild User’s Manual Device Simulation Software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018. – 241 р.

15. Silvaco, ATLAS user's manual device simulation software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018. – 1776 p.
16. Silvaco, ATHENA User's Manual Device Simulation Software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018. – 444 p.
17. TCAD-based methodology for reliability assessment of nanoscaled MOSFETs / Hussin R. et al. // 2015 11th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME).- Glasgow: IEEE. – 2015. – P. 270-273.
18. Кравченко В.Д. САПР компании Synopsys. Основные средства и возможности / Кравченко В.Д., Радченко Д.Ю. – Москва: Электроника НТБ, 2003. – 33с.
19. Тихомиров П.В. Система SENTAURUS TCAD компании Synopsys: новое поколение приборно-технологических САПР / Тихомиров П.В., Пфели П.В., Зорзи М. Д. – Урал: Электроника НТБ, 2006. – 89с.
20. Optics and beyond. Nature Photon/ Segev M., Soljac M.// Nature Photon. – 2012. – P. 209–210.
21. Interferometric lithography for nanoscale feature patterning: a comparative analysis between laser interference, evanescent wave interference, and surface plasmon interferenc/ Sreekanth K. V., Chua J. K.// Appl Opt. – 2010. – P. 40–67.
22. Double-sided hybrid microoptical elements combining functions of multistage optical systems lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication / ZeitnerP U. D., Dannberg P.R.// SPIE. – 2001. – P 44–50.
23. Ultra-low shrinkage hybrid photosensitive material for two-photon polymerization microfabrication/ Vamvakaki M., Farsari M., Fotakis C.// ACS Nano. – 2008. – P. 24–28.
24. Захаревич А. А. Обзор методов повышения разрешающей способности процесса фотолитографии при создании топологии микроструктур субмикронного производства ИМС / Захаревич А. А., Достанко А. П. – Новосибирск: СибАК, 2011.– 84 с.
25. 1/f noise in drain and gate current of MOSFETs with high-k gate stacks/ Magnone, P., Crupi F., Giusi G.,// IEEE Trans. Device Mater. Reliab. – 2009. – P.180–189.

26. Status and critical challenges for 157 nm lithography/ Ronse K., De Bisschop P., Goethals A. M.// Sewell. *Microelectron.* – 2004. – P. 73–74.
27. ASML EUV Program: Status and Prospects International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography/ Benschop J.// SEMATECH. Austin. 18 October – 2009. – P. 1–5.
28. Robust and efficient inverse mask synthesis with basis function representation/ Wu X., Liu S., Lv W., Lam Y.// *OptSoc.* – 2014. – P. 12–31.
29. Ready for multi-beam exposure at 5 kV on MAPPER tool: lithographic and process integration performances of advanced resists/stack/ Servin I., Thiam N.A., Pimenta-Barros P.// *OptSoc. Proceedings.* – 2015. – P. 25–33.
30. Novel germanium surface modification for sub-10 nm patterning with electron beam lithography and HSQ resist/ Gangnaik A.S., Georgiev Y.M., Collins G. J.// *Nanotechnol Microelectron. Mater Process.* – 2016. – P. 91–99.
31. Directed self-assembly lithography using coordinated line epitaxy (COOL) process./ Seino Y., Kasahara Y., Miyagi K. // *Proc.* – 2015. – P. 23–49.
32. Simple and versatile methods to integrate Directed Self-Assembly with optical lithography using a polarity-switched photoresist/ Cheng J.Y. // *ACS Nano.* – 2010. – P. 15–14.

СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ КРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ФОТОЛІТОГРАФІЇ ЯК БАЗОВОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Студент гр. EI-71

Проноза А.О.

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

І.П. Бурик

Конотоп 2021

ВСТУП

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є вивчення особливостей процесу фотолітографії як базової інтегральної технології.

Мета роботи полягає у вивчення методики комп'ютерного моделювання фотолітографічних процесів та їх застосування при виготовленні елементів електроніки.

У цій роботі представлений огляд різних способів літографії, типи фоторезистів, а також основний функціонал програмного середовища TCAD Silvaco, що використовується для моделювання процесу літографії та додаткові пакети які розширюють функціонал даного продукту за допомогою якого були успішно спроектовані структурні моделі n-канального MOSFET транзистора з використанням 60 нм процесу літографії з довжиною затвора 20 нм

Фотолітографія та основні методи

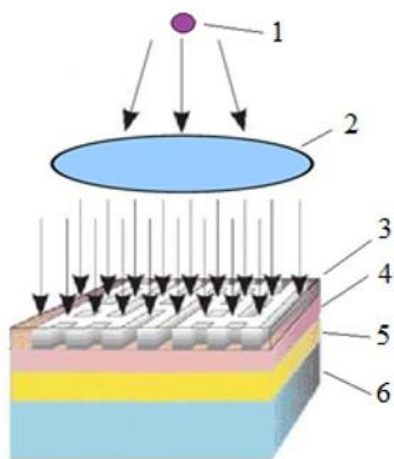


Рис 1.1. Схематичне зображення контактного методу фотолітографії: 1 – ультрафіолетове випромінювання; 2 – система оптичних лінз; 3 – шаблон; 4 – шар фоторезисту; 5 – шар SiO_2 ; 6 – шар SiO

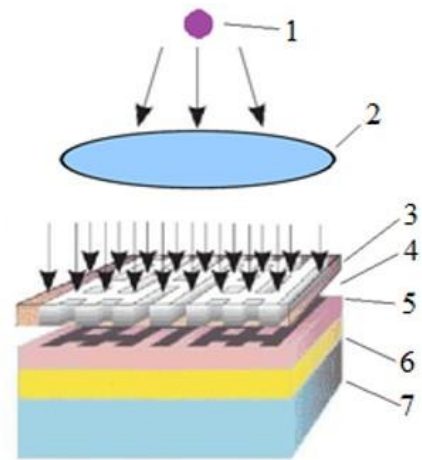


Рис. 1.2. Схематичне зображення безконтактного методу фотолітографії з мікропроміжком: 1 – ультрафіолетове випромінювання; 2 – система оптичних лінз; 3 – шаблон; 4 – мікропроміжок; 5 – фоторезист; 6 – шар SiO_2 ; 7 – шар SiO

Фотолітографія та основні методи

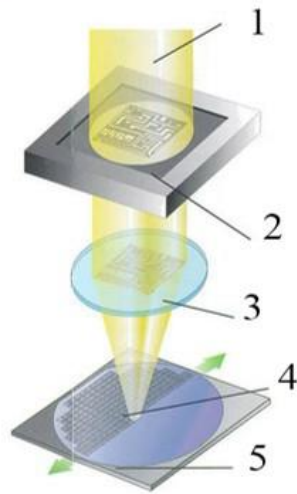


Рис. 1.3. Схематичне зображення проекційного методу фотолітографії: 1 – джерело ; 2 – шаблон; 3 – оптична система ; 4 – фоторезист; 5 – підкладка з кремнію

Різновиди фоторезистів

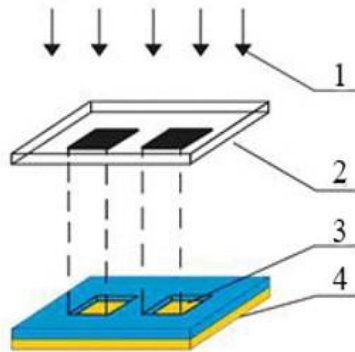


Рис. 1.4. Позитивний фоторезист :

- 1 – випромінювання;
- 2 – фотошаблон; 3 – фоторезист;
- 4 – підкладка

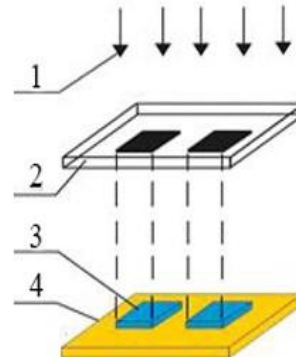


Рис. 1.5. Негативний фоторезист :

- 1 – випромінювання; 2 – фотошаблон; 3 – фоторезист;
- 4 – підкладка

Дослідження можливостей Silvaco TCAD

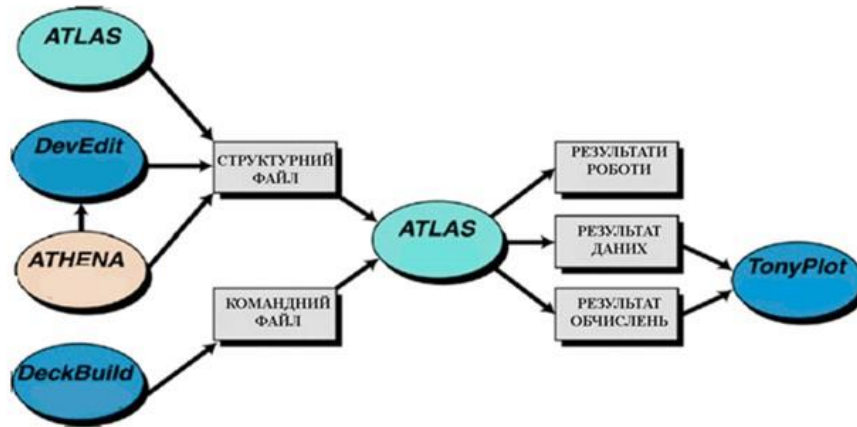
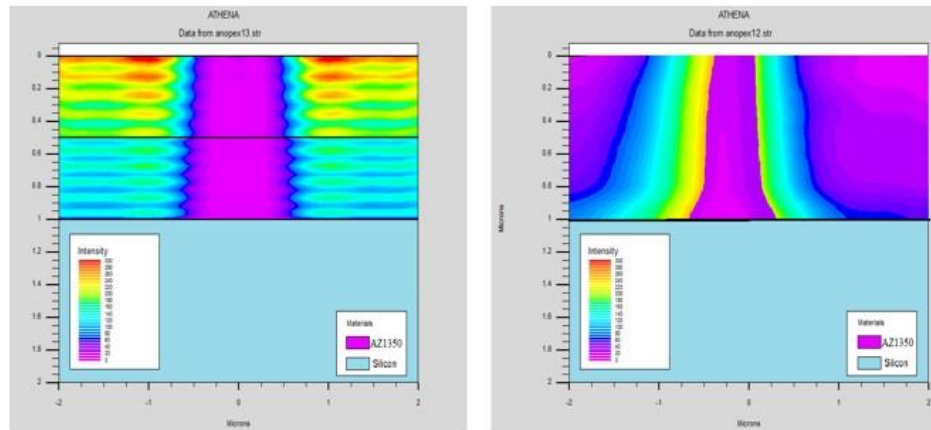


Рис. 2.1. Структура програмного забезпечення Silvaco TCAD

Моделювання «прихованого» зображення в шарі фоторезиста



а

б

Рис 2.3. Розподіл фотоактивного компонента в шарі фоторезиста: а – до сушки фоторезиста; б – після сушки фоторезиста

Моделювання «прихованого» зображення в шарі фоторезиста

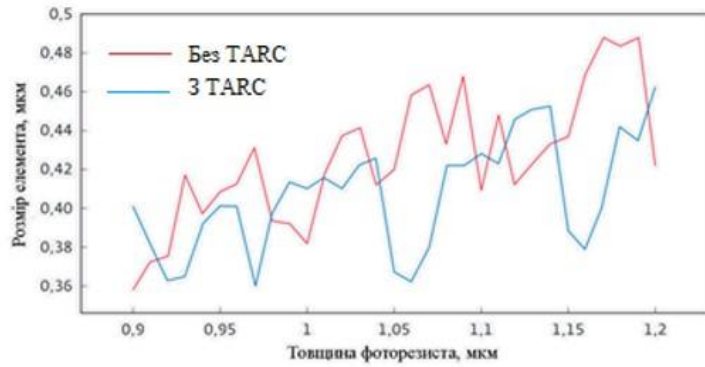


Рис 2.4. Залежність розміру елемента від товщини фоторезиста

Проектування 20 нм п-канального MOSFET транзистора

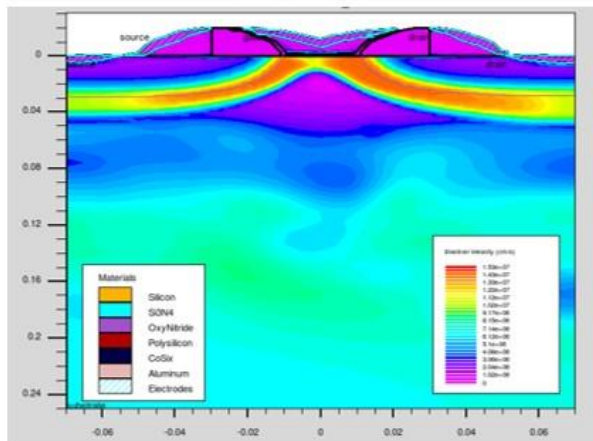


Рис 3.1. Структурна модель п-канального MOSFET транзистору, виготовленого за технологією 60 нм

Проектування 20 нм п-канального MOSFET транзистора

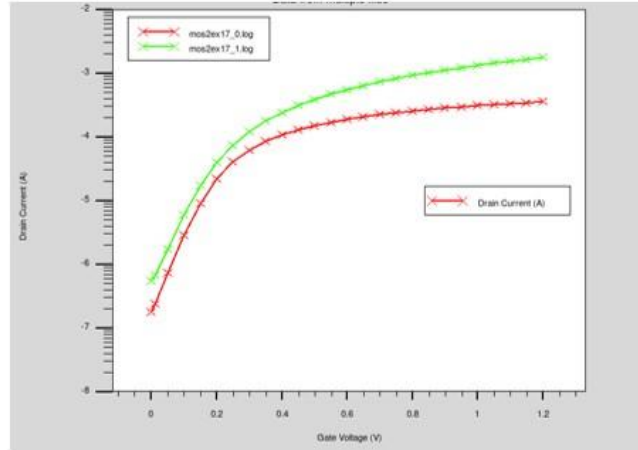


Рис 3.2. ВАХ п-канального MOSFET транзистора, виготовленого за технологією 60 нм

ВИСНОВКИ

1. Фотолітографія є основним технологічним процесом при виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем. Сутність процесу фотолітографії полягає в покроковому проведенні процесів, а саме нанесення тонкого шару фоторезисту, потім опромінення фоторезисту через фотошаблон актинічним світлом, що призводить до зміни її властивостей. Прояв і полімеризація плівки фоторезисту з подальшим переносом її на підкладку.

2. Програмне середовище SILVACO TCAD має необхідні модулі для моделювання процесу фотолітографії. Моделювання електрофізичних параметрів напівпровідникових приладів в системі TCAD Silvaco здійснює програмний модуль ATLAS та ATHENA. Розрахунок основних параметрів фоторезистивного покриття та явищ, що протікають в ньому розраховуються за допомогою модуля OPTOLITH.

3. Порівняли ширину вікна в змодельованому фотошаблоні при закладеному в програмному пакеті значенні, що становить 4 мкм та помітили, що з застосуванням методу вводу додаткової операції нанесення антивідбиваючого покриття поверх шару фоторезиста амплітуда коливальної кривої залежності розміру елемента від товщини фоторезиста стала значно менше.

4. Використавши SILVACO TCAD продемонстрували моделювання n-канального MOSFET транзистора з використанням технології 60 нм літографії та з довжиною затвора 20 нм. За допомогою змодельованого графіку визначили, що велика частина каналу виходить в насичення через дуже малі розміри транзистора, а щільність струму при $V_g = V_d = 1.2$ В становить 2000 мкА/мкм

СПИСОК ОСНОВНИХ ВИКОРИСТАНИХ У РОБОТІ ДЖЕРЕЛ

1. FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS OF NANOPHOTONICS/ JOSEPH W. H. // WOODHEAD PUBLISHING, UT, USA, 3 DECEMBER 2016. – P. 13–18.
2. СТЕПАНЕНКО И.П. ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ / СТЕПАНЕНКО И.П. – МОСКВА: «ЛАБОРАТОРИЯ БАЗОВЫХ ЗНАНИЙ», 2000. – 488 С.
3. ПРЕСС Ф. П. ФОТОЛИТОГРАФИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ/ ПРЕСС Ф. П. – МОСКВА: ЭНЕРГИЯ, 1968. – 167С.
4. ПРЕСС Ф. П. ВВЕДЕНИЕ В ФОТОЛИТОГРАФИЮ / ПРЕСС Ф. П., ЛАВРИЦЕВА В. П. – МОСКВА: ЭНЕРГИЯ, 1977, – 280С.
5. NOVEL GERMANIUM SURFACE MODIFICATION FOR SUB-10 NM PATTERNING WITH ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY AND HSQ RESIST/ GANGNAIK A.S., GEORGIEV Y.M., COLLINS G. J.// NANOTECHNOL MICROELECTRON. MATER PROCESS. – 2016. – P. 91–99.
6. DIRECTED SELF-ASSEMBLY LITHOGRAPHY USING COORDINATED LINE EPITAXY (COOL) PROCESS./ SEINO Y., KASAHARA Y., MIYAGI K. // PROC. – 2015. – P. 23–49.
7. SIMPLE AND VERSATILE METHODS TO INTEGRATE DIRECTED SELF-ASSEMBLY WITH OPTICAL LITHOGRAPHY USING A POLARITY-SWITCHED PHOTORESIST/ CHENG J.Y. // ACS NANO. – 2010. – P. 15 –14.



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ

