

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

А. В. Іващук

СИНТЕЗ ТА ДІАГНОСТИКА НАНОСТРУКТУР ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка»,
спеціалізації «Інформаційні технології проектування в електроніці та
наносистемах»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Рецензент: Тимофєєв В.І., д-р техн. наук, проф.
Відповідальний редактор Борисов О.В., канд. техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 9 від 30.05.2019 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол № 04/2019 від 26.04.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Іващук Анатолій Васильович, канд. техн. наук, доц.

СИНТЕЗ ТА ДІАГНОСТИКА НАНОСТРУКТУР ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Синтез та діагностика наноструктур: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», спеціалізації «Інформаційні технології проектування в електроніці та наносистемах»/ А.В. Іващук; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 420 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – с. 41

Відповідно до навчальної програми дисципліни «Синтез та діагностика наноструктур» передбачено виконання 6 лабораторних робіт: «Селективне травлення поверхні кремнію», «Формування плівки SiO₂ методом термічного окислення кремнію», «Виготовлення тонких плівок наноструктурованого кремнію та дослідження їх функціональних властивостей», «Нанесення металевих плівок на напівпровідникові пластини методом вакуумного термічного випаровування», «Нанесення металевих плівок на напівпровідникові пластини методом магнетронного розпилення» та «Дослідження технологічного процесу створення електронно-діркового переходу в кремнії р-типу провідності». Студенти практично проводять технологічні процеси, які використовуються в мікро- та наноелектроніці, зокрема процеси формування наноструктур хімічними методами, нанесення металевих плівок на напівпровідникові пластини вакуумними методами, термічні та дифузійні процеси.

© А.В. Іващук, 2019
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

КАФЕДРА МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни

«Синтез та діагностика наноструктур»

для підготовки магістрів зі спеціальності

153 Мікро- та наносистемна техніка

Затверджено на засіданні
кафедри мікроелектроніки

Протокол від «17» 04 2019 року № 17

Завідувач кафедри

_____ О.В. Борисов
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ___ » _____ 2019 р.

КИЇВ 2019

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

«Селективне травлення поверхні кремнію»

Мета роботи: отримати на пластині кремнію якісний текстурований шар.

Технічні вимоги і вимоги безпеки

Інструкції з охорони праці №№ 05, 11.

Обладнання та пристрої:

1. Шафа витяжна 2Ш-НЖ.
2. Електроплитка ГОСТ 24104-99.
3. Ваги аналітичні ВЛР -200.
4. Термометр водяний (0-100) °С/1° ГОСТ 21573.
5. Центрифуга лабораторна.
6. Стакан мірний скляний 1 л.
7. Ємність для приготування розчину.
8. Паличка скляна.
9. Тара з термостійкого скла для текстурування.
10. Тара для ізопропилового спирту.
11. Рукавиці гумові хірургічні ГОСТ 3-88.
12. Ємність для зберігання розчину (герметична).
13. Касета з пластинами кремнію КДБ 3-6.
14. Мікроскоп.

Матеріали:

1. Пластини кремнію КДБ 3-6.
2. Вода деіонізована Б ГОСТ 11.29.003 – 80.
3. Калій їдкий ОСЧ ГОСТ 24363-80.
4. Спирт ізопропиловий ОСЧ ГОСТ 9805-84.

Короткі теоретичні відомості

Хімічне травлення (ХТ) напівпровідникових матеріалів є не тільки однією з найважливіших операцій при хімічній обробці підкладок у виробництві приладів мікросистемної техніки (МСТ), монолітних інтегральних схем (МІС) та створенні тривимірних структур і рельєфу, але без нього неможливе проведення досліджень електрофізичних, структурних та інших властивостей напівпровідників.

Хімічне травлення використовується:

- 1) для підготовки поверхні підкладок, очищення від забруднень і оксидів;
- 2) для видалення порушеного шару, що залишається на поверхні пластин після механічної обробки (калібрування, виготовлення зрізів, різання і т.д.) і для дослідження природи пошкоджень поверхні, зумовлених механічними обробками (різка, шліфування, полірування і т.д.); для отримання пластин необхідної товщини з досконалою поверхнею;

3) для визначення орієнтації кристалів і виявлення дефектів кристалічної структури (дислокацій, домішок, *p-n*-переходів, меж зерен і т.д.);

4) для селективного видалення шарів, отримання мезаструктур та канавок на пластинах, а також багатошарових структурах, розкриття вікон із конкретним нахилом стінок в шарах напівпровідників і діелектриків;

5) створення рельєфу в підкладці при формуванні структур об'ємної і поверхневої мікромеханіки і т.д.

Основні визначення

Ізотропне хімічне травлення - процес розчинення напівпровідника з однаковою швидкістю травлення всіх граней монокристала. Швидкість ХТ не залежить від кристалографічного напрямку поверхні травлення. Ізотропне травлення широко застосовується для полірування поверхні підкладок, формування масок і створення топології в діелектричних і металевих шарах.

Анізотропне хімічне травлення - процес розчинення напівпровідника з неоднаковою швидкістю травлення на різних гранях монокристалу. Швидкість протікання хімічної реакції залежить від кристалографічного напрямку поверхні травлення.

Ступінь анізотропії і однорідність травлення залежить від температури травлення, структурних дефектів у кристалі кремнію, власних домішок у кристалі кремнію, домішок (іонів металу), які виникають внаслідок самого процесу травлення.

Домішкова концентрація кремнію сильно впливає на травлення. Так, під час травлення кремнію, легованого бором, якщо концентрація бору перевищує 10^{19} см^{-3} , утворюється боросилікатна плівка на поверхні, яка запобігає травленню.

Анізотропне ХТ використовують для металографічного і оптичного дослідження структурних поверхневих і об'ємних дефектів, в технології мікроелектроніки - для виготовлення різноманітних типів приладів і пристроїв на основі витравлювання канавок певного профілю, вікон, отворів, мембран, масок і т.д. Найбільш широке застосування анізотропне травлення знаходить у технології мікросистем, де за його допомогою на підкладках з різних матеріалів формуються тривимірні структури різноманітних форм, а також у шарах, отриманих різними способами.

В останні десятиліття анізотропне ХТ кремнію масово застосовується в технології формування поверхні сонячних елементів з антивідбиваючими властивостями з метою ефективнішого перетворення світла в електричну енергію.

Селективне хімічне травлення ґрунтується на різній швидкості розчинення напівпровідника в різних кристалографічних напрямках. Воно призводить до утворення ямок (горбків) травлення, виявляє дислокації, неоднорідності розподілу домішок та інші дефекти, тобто мікроструктуру поверхні.

Селективне ХТ дозволяє виявити дефекти кристалічної структури

підкладок (меж зерен, малокутових і двійникових меж, дислокацій, дефектів упаковки і т.д.); виявити площини з малими індексами для оптичної орієнтації кристалів; проводити препарування і поділ багат шарових гетероепітаксійних структур і т.д.

В технології мікросистемної техніки процеси рідинного хімічного травлення знайшли застосування при створенні глибокого рельєфу в підкладках (для цього широко використовуються процеси анізотропного травлення), травленні жертвних шарів для формування вільно підвішених структур. Для цих процесів ставляться більш жорсткі вимоги до селективності травників, бездефектності і хімічної стійкості маскуючих шарів, строгому контролю часу закінчення травлення. З'являються нові варіанти технічної реалізації процесу для отримання рівномірнішого профілю травлення, гладкої поверхні створюваних структур, підвищення анізотропії травлення та своєчасної зупинки процесу.

Поряд з інтегральним хімічним травленням, в якому процес розчинення напівпровідника протікає рівномірно по всій поверхні підкладки, використовується також і локальне травлення. При такому травленні видалення матеріалу відбувається лише зі строго обмежених і заданих ділянок поверхні пластин. Для забезпечення локальності ХТ застосовуються захисні маски, одержані фотолітографією або іншими способами. Травлення - критична стадія літографічного процесу. На цій стадії жорстко випробовуються адгезія, непроникність, рівень дефектності і хімічна інертність матеріалу маски. Маскування шарів з високою стійкістю до травлення гарантує мінімальне спотворення зображення при перенесенні його в підкладку. Для локального ХТ можуть використовуватися як ізотропні, так і анізотропні травники.

Практичні межі застосування процесу рідинного хімічного травлення (РХТ) визначаються його роздільною здатністю $-1,5 \div 2,0$ мкм - і відхиленням розмірів при травленні - $\pm 0,2 \div 0,5$ мкм. Якщо помилки при формуванні малюнка в резисті не є критичними, оскільки резист можна нанести повторно і провести літографію, то при неправильному формуванні рисунка (топології, рельєфу, мезаструктур) у шарах і підкладках травленням виправити помилку складно, а найчастіше - неможливо.

Відомі також і інші види травлення: розмірне, пошарове, декоруюче, підфарбовуюче ХТ напівпровідників і ін. Пошарове ХТ застосовується для рівномірного і послідовного зняття тонких поверхневих шарів напівпровідника після дифузії легуючої домішки, після іонної імплантації, для вивчення поверхневих і об'ємних дефектів кристалічної структури підкладок, епітаксійних шарів і т.д. Для цього, як правило, використовують поліруючі травники з малою швидкістю ХТ ($< 0,1$ мкм/хв) та селективні травники.

Декоруюче, підфарбовуюче ХТ - це різновиди селективного травлення і його також використовують для дослідження щільності та розподілу дислокацій, їх природи і механізму утворення, для виявлення *p-n*-переходів, різних фазових включень і т.п.

Використання хімічного травлення, хіміко-динамічного полірування, а також анізотропного і селективного травлення бути дають можливість вирішувати різноманітні завдання в технології мікроелектроніки і в

дослідницькій практиці.

Хімічне травлення матеріалів ґрунтується на процесах їх розчинення в рідких середовищах. Тому знання кінетичних закономірностей, механізму та характеру процесу розчинення напівпровідника є найважливішою умовою і критерієм вибору відповідних складів розчинів травників і режимів проведення процесу для полірування, анізотропного або селективного хімічного травлення.

Загальні принципи кінетики травлення

Гетерогенні реакції травлення можна представити у вигляді послідовності процесів:

- 1) перенесення реагенту до поверхні підкладки;
- 2) адсорбція реагенту, характеризується ΔH_{ads} ;
- 3) реакція на поверхні, призводить до зміни вільної енергії ΔF ;
- 4) десорбція продуктів, характеризується ΔH_{var} ;
- 5) перенесення продуктів від травленої поверхні.

Найповільніший етап визначає швидкість реакції. У реакціях нижчого порядку:

Швидкість = k - нульовий порядок

Швидкість = kC - перший порядок,

де k - константа швидкості хімічної реакції.

Швидкість залежить від концентрації травника (C) тільки в разі реакції першого порядку. При включенні тієї чи іншої реакції травлення в технологічний процес вибирають, як правило, процес з найменшою кількістю параметрів і переважно лінійними швидкостями травлення. Бажано також мати можливість зміни анізотропії шляхом регулювання фізичних параметрів і високу селективність процесу (тобто відсутність впливу травника на резист або шар, що знаходиться під стравлюваною плівкою). У реакціях нульового порядку слабке збіднення травника несуттєво. Однак при протіканні реакції першого порядку травник може сильно виснажитися при завантаженні десяти або більше пластин. У реакціях першого порядку залежність товщини стравлюваної плівки (або логарифма товщини) від часу лінійна. Тому закінчення реакції легко контролюється і може точно визначатися екстраполяцією.

Перехід від твердої фази до рідкої залежить від дифузії взаємодіючих речовин.

Порядок виконання роботи

1. Приготувати розчин для текстурування.

Увага!

Всі роботи пов'язані з приготуванням розчинів виконувати у витяжній шафі при включеній витяжній вентиляції, у гумових рукавицях.

Дотримуватись вимог інструкції з охорони праці № 05.

1. Відміряти мірною склянкою 70 мл спирту ізопропилового.
2. Влити спирт ізопропиловий у ємність для приготування розчинів.
3. Відміряти мірною склянкою (970 ± 5) мл води деіонізованої.
4. Влити воду деіонізовану в ємність для приготування розчинів.
5. Зважити на вагах аналітичних калій їдкий 30 гр.
6. Всипати калій їдкий у ємність для приготування розчину.
7. Перемішати склянкою паличкою до повного розчинення калію їдкого.
8. Перелити одержаний розчин у ємність для зберігання розчину.

Примітки:

Допускається використовувати розчин протягом 12 місяців, зберігаючи його у герметично закритій тарі.

2. Влити розчин для текстурування в тару для текстурування.
3. Влити спирт ізопропиловий в тару для ізопропилового спирту.
4. Увімкнути електроплитку.
5. Поставити тару з розчином для текстурування на електроплитку.
6. Нагріти розчин для текстурування до температури 60°C .
7. Завантажити касету з пластинами кремнію КДБ 3-6 у тару з ізопропиловим спиртом на 5-10 сек.
8. Перевантажити касету з пластинами кремнію КДБ 3-6 у розігрітий розчин для текстурування.
9. Нагріти розчин для текстурування до температури 75°C .
10. Протримати касету з пластинами кремнію КДБ 3-6 у розчині для текстурування при температурі $75^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ протягом $(8 \pm 0,5)$ хв.
11. Вийняти і промити касету з пластинами кремнію КДБ 3-6 у проточній деіонізованій воді протягом 20 хв.
12. Висушити касету з пластинами кремнію КДБ 3-6 у центрифугі.
13. Увімкнути мікроскоп відповідно до інструкції з експлуатації.
14. Проконтролювати якість текстурованої поверхні і визначити розмір утворених на поверхні кремнію пірамідок.

Контрольні запитання

1. Напівпровідникові матеріали.
2. Кремній в мікроелектроніці, його властивості.
3. Вимоги до пластин Si для НВІС.
4. Вимоги до пластин Si для ФЕП.
5. Кристалографічна структура Si.
6. Індокси Міллера.
7. Легуючі домішки для *n*-Si та *p*-Si.
8. Дефекти і дислокації в Si.
9. Особливості хімічного травлення поверхні Si.
10. Текстурування поверхні Si.
11. Склад травника для текстурування поверхні Si.

Вимоги до звіту

Звіт повинен містити:

1. Мету роботи.
2. Короткі теоретичні відомості.
3. Порядок виконання роботи.
4. Експериментальні результати в табличному та графічному вигляді.
5. Висновки.

Рекомендована література:

1. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. - М.: Техносфера. - 2005. - 334 с.
2. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение. – 2007. – 493 с.
3. Ермаков О. Прикладная оптоэлектроника - М.: Техносфера. - 2005. - 414 с.
4. Розеншер Э. Оптоэлектроника. - М.: Техносфера. – 2005. – 296 с.
5. Воробьев Л.Е., Ивченко Е.Л., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А. Оптические свойства наноструктур, под ред. Ильина В.И., Шика А.Я. – С-П, Наука.-2001.- 299 с.
6. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика наноразмерных систем, под ред. Ильина В.И., Шика А.Я. - С-П, Наука.- 2001.- 312 с.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

«Формування плівки SiO_2 методом термічного окислення кремнію»

Мета роботи: отримати якісний захисний шар на основі двооксиду кремнію.

Обладнання та матеріали: піч дифузійна СДО 125/3-15; мікроскоп МБС-9; мікроінтерферометр МІІ-4; прилад «куля-шліф»; шафа витяжна ЗШ-НЖ; прилад вимірювання поверхневого опору ІУС-3; кремній електронного типу провідності; паста алмазна АМС; ацетон ОСЧ; розчин плавикової кислоти; нітрид бору; касета кварцова; носій кварцовий; підставка кварцова; пінцети, напальчники, бязеві тампони.

Зазвичай окислення проводять у дифузійній печі СДО-125/3 або автоматизованих дифузійних системах АДС-3-100, АДС-6-100, які мають відповідно 3 та 6 камер. Реакційна камера складається з кварцової труби, яка проходить через муфель печі з резистивними нагрівачами. Для виготовлення труби використовують кварц спеціального очищення (двічі переплавлений у вакуумі) для уникнення потрапляння домішок із оснастки в приповерхневий шар пластин. Температура в робочій зоні реактора підтримується в межах від 700 до 1250 °С з точністю до 0,5 °С автоматичними системами регулювання.

Пластини розташовані вертикально в пазах спеціального човника, виготовленого із кварцу або високоякісного кремнію. Відстань (крок) між пластинами 2÷4 мм. Касету поміщають у робочу зону автозавантажувачем. Газову суміш подають із газової магістралі, а пару води - із камери випаровування. Витрату та концентрацію парогазової суміші регулюють сенсорами витрати газів та дозаторами.

Короткі теоретичні відомості

У технології виготовлення ІМС використовують діелектричні плівки оксиду, нітриду та карбіду кремнію, домішково-силікатних стекол (ФСС, БСС та ін.), а також полікристалічного кремнію. Такі плівки виконують функцію маскування, ізолювальних або пасивуючих шарів та можуть бути конструктивними елементами ІМС.

Основне призначення плівок товщиною більше 0,2 мкм – створення маски, потрібної для локальної обробки поверхні напівпровідникових пластин (дифузії, іонного легування, травлення), щоб уникнути дифузії основних легувальних домішок (бору, фосфору, арсену) на частину пластини. Під час тривалої дифузії або основної іонної імплантації такої товщини плівки недостатньо.

Вищі маскувальні властивості мають плівки завтовшки 0,6 мкм. Вони перешкоджають дифузії в пластину не тільки завдяки згаданим домішкам, а ще й

індію, галію, алюмінію та ін. Нітрид кремнію використовують також для створення маски при травленні поверхні кремнію та плівок, а також як захисний шар для захисту ІМС від механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища.

Шари – конструктивні елементи ІМС – використовують як підзатворний діелектрик у МДН транзисторах. Залежно від призначення до діелектричних та полікремнієвих шарів ставлять різні вимоги. Так, маскувальні плівки не мають бути пористими, оскільки вони є бар'єром для дифундуючих легувальних домішок, а також гальмувати іони під час іонного легування. Маскувальні плівки мають забезпечити отримання мінімального клина травлення (вертикальної стінки протравлених вікон) при локальному травленні.

Ізолювальні плівки повинні мати високі діелектричні властивості і не мати пор, щоб уникнути замикання металізованих шарів. Пасивувальні шари мають бути стійкими до вологих та агресивних середовищ і стабільними в часі.

Підзатворний діелектрик повинен мати мінімальний позитивний заряд, високі захисні та діелектричні властивості.

Методи формування діелектричних плівок можуть ґрунтуватись на формуванні плівок за рахунок матеріалу пластини (термічне, іонно-плазмове окислення кремнію тощо) або осадженні матеріалу плівки із зовнішнього середовища (піроліз, плазмово-хімічне осадження і т.д.). Інші методи дозволяють формувати плівки SiO_2 не тільки на кремнії, але й на інших напівпровідникових матеріалах (Ge, GaAs), які не мають власних якісних маскувальних оксидів, а також осаджувати інші матеріали (нітрид кремнію, оксинітриди, домішково-силікатні стекла).

Існує широкий вибір методів і способів технології вирощування тонких плівок оксидів. Як правило крім кінетики окислення також контролюють швидкість травлення, густину, пористість, пружні напруги, значення пробою напруженості електричного поля.

Для досягнення однорідності властивостей та відновлюваності параметрів оксидних плівок їх ріст має відбуватися повільно. Із цією метою використовують різні методи отримання оксидних плівок, які містять окислення в сухому кисні з чи без додавання HCl , комплексне окислення при різних температурах та складу окислювальної атмосфери, окислення в вологому кисні, за умови зниженого тиску, а також підвищеного тиску та низької температури.

Вибір методу окислення визначається потрібною товщиною та властивостями оксиду, що формується.

Двооксид кремнію. Метод осадження SiO_2 залежить від конкретного призначення плівки. Оксиди, використані як ізолятори між провідними шарами, після осадження ущільнюються внаслідок термічної обробки та зазнають плазмово-хімічного травлення для відкриття вікон. У процесі оплавлення фосфоросилікатного скла леговані фосфором плівки двооксиду кремнію нагріваються до температури $1000 \div 1100$ °С. При цьому оксид стає м'яким та починає текти. Завдяки цьому забезпечується згладжування поверхні, що поліпшує суцільність покриття сходинок рельєфу за наступної металізації.

Фосфоросилікатні стекла використовують для пасивації, вони осаджуються при температурі менше 500 °С, після чого в них відкривають вікна для розведення контактів.

При термічному окисненні плівки SiO₂ формуються завдяки хімічній взаємодії частинок окислювача з атомами кремнію. Ріст плівок відбувається в приповерхневому шарі кремнієвої пластини, завдяки чому приблизно 40 % товщини оксидної плівки формується за рахунок матеріалу кремнієвої пластини. Через значну спорідненість кремнію до кисню вже навіть при кімнатній температурі товщина покриття оксидної плівки може бути 50÷100Å. Для отримання її необхідної товщини необхідна термічна стимуляція окислення.

Оксидну плівку на поверхні кремнію переважно вирощують методом відчиненої труби. Старанно очищений азот пропускають через деіонізовану воду. Далі зволожений водяною парою азот потрапляє в трубу, де в високотемпературній зоні печі (1100 ÷1300°С) знаходяться пластини кремнію. Для створення досконалої плівки пластини полірують механічно або хімічно. Іноді пластини кремнію окислюють у чистому кисні або в спеціальному атмосферному повітрі.

Кінетика росту плівки оксиду кремнію за різних вимог характеризується виразом

$$h^m = k \cdot t, \quad (1)$$

де h – товщина плівки, t – час, k - константа, яка пов'язана з тиском та температурою.

Якщо окислення ведеться в чистому кисні або водяній парі, при тисках, які відрізняються від атмосферного не більш ніж на порядок, тоді $m=2$.

При окисненні в водяній парі:

$$h^2 = 2,5 \cdot 10^{15} \cdot P^{1,6} \cdot \exp(-1,7) \quad (2)$$

При окисненні в чистому кисні:

$$h^2 = 8,4 \cdot 10^{10} \cdot P^{0,8} \cdot \exp(-1,7) \quad (3)$$

Якщо тиск P виразити в атмосферах, час t в хвилинах, то товщина плівки буде в ангстремах.

Як видно з формули, коефіцієнти окислювальних агентів при використанні водяної пари на декілька порядків більші, ніж у випадку з чистим киснем, та по-різному залежать від тиску.

Оскільки в процесі окислення у водяній парі отримують великі коефіцієнти дифузії окислювальних агентів, унаслідок досягнення високих температур та тиску дифузія перестає бути обмежувальним фактором швидкості росту оксидної плівки. На практиці широко використовують комбінований спосіб термічного окислення, який базується на одночасному використанні чистого кисню та водяної пари.

Оксид, вирощений в атмосфері чистого осушеного кисню, має досконалішу структуру, тому часто окислення проводять у три стадії: в осушеному кисні, у зволоженому (для збільшення швидкості процесу нарощування достатньо товстої плівки) та знову в осушеному. Однак гранична товщина термічно вирощеної плівки не перевищує 1,5 мкм, товстіші плівки мають тріщини. Практично вирощують плівки SiO₂ завтовшки 0,2÷ 1,2 мкм.

Щоб отримати високу швидкість вирощування оксидної плівки, використовують водяну пару під тиском. Після травлення та промивання кристали з електронно-діркового переходом обробляють протягом 15 хв в азотній кислоті при температурі 100 °С та висушують на повітрі. Потім кристал оксидується при температурі 650 °С та тиску водяної пари близько 50 атм за 2 год. У результаті формується SiO₂ завтовшки 0,3 мкм.

Вирощувати оксидну плівку в середовищі водяної пари можна при температурі 1200 °С при атмосферному тиску за 5 год. Після оксидування водяну пару заміщують інертним газом, який пропускають протягом години за тієї самої температури.

Термічне окислення застосовують також для отримання досконалішої поверхні кремнію. Для цього сформований оксид розчиняють у плавиковій кислоті.

Література: [4, 5].

Порядок виконання роботи

1. Підготувати дифузійну піч.
2. Виміряти температуру робочої зони.
3. Протерти спиртом завантажувальний скафандр, човник, підставку, гачок, пінцет, касету.
4. Завантажити пластини в касету.
5. Завантажити касету в робочу зону печі.
6. Продути трубу азотом, виставити витрату азоту за ротаметром - 60 л/год.
7. Увімкнути програматор із заданим режимом процесу.
8. Покласти пінцетом кремнієві пластини в човник.
9. Встановити касету з пластинами на носій.
10. Перевірити термопарою температуру в робочій зоні.
11. Встановити касету на конвеєрній лінії печі.
12. Продути трубу киснем зі встановленою витратою 60 л/год.
13. Завантажити носій з пластинами в робочу зону при температурі 1000 ± 2 °С.
14. Витримати пластини протягом 2 год.
15. Продути трубу азотом, виставити витрату азоту за ротаметром - 60 л/год.
16. Вивантажити носій із печі на підставку, перекласти пластини в міжопераційну тару.
17. Передати пластини в тарі на наступну операцію.
18. Визначити товщину отриманого шару оксиду за порядком інтерференції та кольором оксиду (табл.1).
19. Оформити отримані результати.

Таблиця 1. Визначення товщини оксиду

Порядок інтерференції	Колір оксиду	Товщина оксиду, мкм
-----------------------	--------------	---------------------

1	2	3
I	Кремовий	0,05
	Коричневий	0,07
	Темно-фіолетовий	0,10
	Голубий	0,12
	Світло-голубий	0,15

Продовження табл.1.

1	2	3
	Металевий	0,17
	Світло-золотистий	0,20
	Золотистий	0,22
	Оранжевий	0,25
II	Червоно-фіолетовий	0,27
	Фіолетово-голубий	0,30
	Голубий	0,31
	Зелено-голубий	0,32
	Світло-зелений	0,34
	Зелений	0,35
	Жовтувато-зелений	0,36
	Зеленувато-жовтий	0,37
	Жовтий	0,39
	Світло-оранжевий	0,41
	Світло-рожевий	0,42
	Фіолетово-червоний	0,44
III	Червоно-фіолетовий	0,46
	Фіолетовий	0,47
	Голубувато-фіолетовий	0,48
	Голубий	0,49
	Голубувато-зелений	0,50
	Зелений	0,52
	Жовтувато-зелений	0,54
	Зеленувато-жовтий	0,56
	Жовтий	0,57
	Світло-оранжевий	0,59
	Світло-рожевий	0,60
IV	Фіолетово-червоний	0,63
	Голубуватий	0,68
	Голубувато-зелений	0,72
V	Жовтувато-червоно-фіолетовий	0,85
	Фіолетовий	0,86
	Голубувато-фіолетовий	0,87
	Голубий	0,89

	Голубувато-зелений	0,92
	Жовтувато-зелений	0,95
	Жовтий	0,97
	Оранжевий	0,99
	Світло-рожевий	1,00
	Фіолетово-червоний	1,02
VI	Червоно-фіолетовий	1,05
	Фіолетовий	1,06
	Голубувато-фіолетовий	1,07
	Зелений	1,10
	Жовто-зелений	1,11
	Зелений	1,12
	Фіолетовий	1,18
VII	Червоно-фіолетовий	1,19
	Фіолетово-червоний	1,21
	Світло-рожевий	1,24
	Оранжевий	1,25
	Жовтуватий	1,28
	Голубувато-зелений	1,32
VIII	Оранжевий	1,40
	Фіолетовий	1,45
	Голубувато-фіолетовий	1,46
	Голубий	1,50
	Жовто-зелений	1,54

Контрольні запитання

1. Для чого застосовуються діелектричні плівки під час процесів формування конструктивних елементів інтегральних мікросхем?
2. Способи формування плівок SiO₂.
3. Хімічні властивості плівок SiO₂.
4. На чому базується комбінований метод термічного окислення?
5. Яким чином регулюється швидкість формування оксидної плівки?
6. Яка роль азоту при формуванні плівки SiO₂?
7. Яка роль водню при формуванні плівки SiO₂?
8. Методи контролю товщини плівки SiO₂.

Вимоги до звіту

Звіт повинен містити:

1. Мету роботи.
2. Короткі теоретичні відомості.
3. Порядок виконання роботи.
4. Експериментальні результати в табличному та графічному вигляді.

5. Висновки.

Рекомендована література

1. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1979. - 367 с.
2. Технология СБИС / Под ред. Зи С. - М: Мир, 1986.- т.1.– 402 с

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

«Виготовлення тонких плівок наноструктурованого кремнію та дослідження їх функціональних властивостей»

Мета роботи: дослідження функціональних властивостей наноструктурованого кремнію для створення нових типів оптоелектронних приладів.

Короткі теоретичні відомості

Наноструктурований кремній (пористий кремній ПК, нанопористий кремній НПК) є унікальним матеріалом завдяки своїм гетеруючим, пасивуючим, антивідбивним і оптичним властивостям. З методів отримання шарів ПК найбільш розповсюдженими є два: анодного електролітичного травлення монокристалічного кремнію в розчинах на основі плавикової кислоти і хімічного травлення. Перший метод дозволяє в широких діапазонах змінювати властивості шарів пористого кремнію. Проте він має кілька істотних недоліків: складність суміщення зі стандартною кремнієвою технологією, неповне використання площі пластини, неможливість масової обробки виробів. Як відомо, мікроструктура визначає більшість фізичних властивостей матеріалу. Зокрема, багато властивостей ПК визначаються квантово-розмірними ефектами. Але різноманіття структур пористого кремнію, що залежить від стану поверхні кремнію, його рівня легування, режимів анодування або хімічного травлення, складу травників, не дозволяє однозначно інтерпретувати результати досліджень.

Існують численні методи отримання *por-Si* з використанням не електролітичного, а чисто хімічного травлення кремнію. Для цього до складу травника поряд з HF додається сильний окислювач. Найчастіше для отримання пористого кремнію використовують склади: $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$; $\text{NaNO}_2 + \text{HF} +$ оцтова кислота + гліцерин з різною концентрацією компонентів. У цих умовах доокислення іонів Si^{2+} до Si^{4+} відбувається вже не іонами водню, а більш сильними окислювачами і, відповідно, без виділення водню.

Розглянемо детальніше процеси, що відбуваються на поверхні кремнію при його електролітичному або хімічному травленні, і, насамперед, - можливість вторинної кристалізації кремнію в результаті диспропорціонування іонів Si^{2+} . Як електролітичне, так і хімічне травлення кремнію багато в чому побідні. Це багатостадійні процеси, що можуть бути представлені великою кількістю послідовних і рівнобіжних реакцій. Основними є дві реакції, які

протікають послідовно. Перша з них безпосередньо пов'язана з переносом заряду через міжфазну межу кремній/розчин і протікає за участю дірок h^+ . В іонній формі ця реакція може бути записана:



Іони, що утворюються при цьому, Si^{2+} малостійкі. Тому надалі вони або окисляються, наприклад, іонами водню:



або беруть участь у реакції диспропорціювання за схемою:



У результаті реакції (2б) утвориться вторинний атомарний кремній у кількості, рівній половині іонів кремнію, що беруть участь у цій реакції, а інша його половина зв'язується присутніми в розчині іонами F^- , утворить міцні комплексні іони $[\text{SiF}_6]^{2-}$ і в такому вигляді переходить у розчин. Насправді обидві вторинні реакції (2a) і (2б) протікають паралельно. Частка кожної з них визначається конкретними умовами експерименту. Серед великого різноманіття напівпровідникових матеріалів лише кремнію властива реакція диспропорціювання його іонів з взаємним обміном електронами і перетворенням у нейтральний атом та іон з підвищеною валентністю.

При цьому на поверхні кремнію утворюються своєрідні початкові дефекти - "зайві" поверхневі атоми кремнію. Концентрація атомів, що повторно кристалізуються протягом однієї секунди на поверхні кремнієвої підкладки, зрівнюється або перевищує поверхневу концентрацію вихідних ґраток. У цих умовах атоми кремнію не можуть рівномірно добудовувати кристалічні ґратки вихідного кремнію. Більш ймовірним стає хаотичний розподіл вторинних атомів кремнію по поверхні підкладки, у тому числі, з утворенням агрегатів, що складаються з декількох атомів вторинного кремнію. Ці новоутворення можуть знову розчинятися відповідно до реакції (1). Однак у результаті квантово-розмірного розширення забороненої зони їхній електричний опір може виявитися на багато більшим, ніж опір вихідного кремнію, що збільшує стійкість кремнієвих агрегатів до розчинення. Таким чином, на поверхні кремнію виникають статистично розподілені острівці з підвищеною стійкістю до розчинення (поверхневі нанокристаліти). Такими процесами забезпечується перша стадія утворення пористого чи нанопористого кремнію - виникнення поверхневих неоднорідностей квантово-розмірного масштабу. Надалі кремній буде розчинятися переважно в проміжках між нанокристалічними агрегатами, тобто почнеться утворення і поглиблення пор (рис. 1).

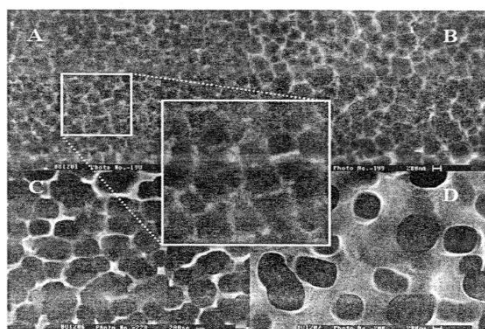


Рис. 1. СЕМ фотографія поверхні кремнію з різним питомим опором: (А) 0,3, (В) 1,0, (С) 4,5, (D) 10 Ом·см після процесу анодування (20 мА/см^2 , 10 хв.)

Одночасно з утворенням пор продовжується наростання вторинного кремнію на всій поверхні *por-Si*, у тому числі на стінках пор. Його високий питомий опір у тонких стінках пор забезпечує підвищену стійкість стінок пор до розчинення і сприяє росту великих пор всередину підкладки. Осадження вторинного кремнію на стінках пор також відбувається у вигляді окремих розрізаних агрегатів, що дозволяє утворюватися дрібним бічним відгалуженням пор. Таким чином, відповідно до наших уявлень, у *por-Si* утворюються дві системи пор: великі "магістральні" пори мікрометрової ширини, що йдуть всередину підкладки на десятки мікрметрів та добре видимі в оптичні мікроскопи, і значно коротші "нанопори", що відгалужуються від великих пор. Непрямим підтвердженням можливості утворення вторинних кремнієвих агрегатів із кристалічною структурою (нанокристалітів) є отримання люмінесцентних у видимій області спектра пористих шарів на підкладках з аморфного кремнію.

Гетеруючі і пасивувальні властивості.

Пористі шари в кремнії, створювані методом хімічного або електрохімічного травлення, є ефективним гетером для атомів важких металів на пластинах монокристалічного матеріалу. Надзвичайно розвинута внутрішня площа поверхні пористого кремнію (порядку сотень m^2/cm^3), а також велика концентрація обірваних зв'язків сприяє нагромадженню на поверхні домішкових атомів і їхньої хемосорбції з енергією активації вивільнення близько 2 eV. Під час відпалу завдяки збільшеній рухливості поверхневих атомів кремнію відбувається їхня міграція в напрямку від вершин до впадин. При цьому порівняно великий потік атомів кремнію у напрямку до пор на кремнієвій поверхні може викликати проникнення частини в об'єм кремнію і міграцію всередину пластини за рахунок градієнту концентрації. Цей процес прискорюється при підвищенні температури і протікає більш інтенсивно, коли рух атомів по поверхні обмежений. Це відбувається, наприклад, коли поверхня покрита будь-якою фізично адсорбованою плівкою, наприклад, плівкою металу. Таким чином, проникнення нерівноважних атомів кремнію в міжвузловому положенні всередину кремнієвої пластини може сприяти ефективному протіканню процесів вивільнення металеві домішки.

Водень може проникати в Si на досить велику глибину при кімнатній і навіть більш низькій температурі, при цьому він ефективно взаємодіє з дефектами кристалічних ґраток. У *p-Si* найефективнішими пастками є дрібні акцепторні домішки, радіус захоплення водню на які настільки великий (~ 4 нм), що вони утворюють нейтральні пари водень - дрібний акцептор.

Електрофізичні й оптичні властивості пористого і нанопористого кремнію.

На основі розходжень у структурі пористого кремнію й у процесах формування в ньому областей, збіднених носіями струму, проведена

класифікація електричних властивостей пористого матеріалу. Показано, що пористий кремній може бути умовно класифікований на кілька груп, кожна з яких має свій набір відмітних властивостей. А різноманіття електричних властивостей пористого кремнію і його контактів з металевим електродом і кремнієвою підкладкою приводять до широкого набору характеристик багатошарових структур з пористими шарами.

В даний час достатньо переконливо доведено, що в процесі формування пор навколо кожної пори можуть виникати збіднені носіями заряду області. Причинами цього зазвичай розглядаються: захоплення носіїв заряду пастками на поверхні пор, відхід домішкових атомів в електроліт або на стінки пор і пасивація домішкових атомів воднем. Збіднення носіями заряду в розглянутих областях може бути значним, аж до переходу в стан з власною провідністю. Збіднені області можуть досить глибоко поширюватися всередину кремнієвої матриці внаслідок високих значень коефіцієнта дифузії водню.

Перенос носіїв заряду в *por-Si* у значній мірі залежить від величини пористості, діаметру пор, розмірів збіднених областей, від ефективності процесів захоплення носіїв заряду на пастки та інше.

При розмірах кристалітів менш 15-20 нм починають виникати квантово-розмірні ефекти, що приводять до квантування енергетичного спектра носіїв заряду, збільшенню ширини забороненої зони до $1,7 \div 3,4$ еВ і до зменшення діелектричної проникності.

Вплив технології отримання на властивості пористого і нанопористого кремнію настільки значний, що приводить до широкої гами модифікацій цього матеріалу.

На межі поділу пористий кремній – монокристалічний кремній виникає гетероперехід. Зміна ширини забороненої зони відбувається завдяки наявності квантово-розмірного ефекту. Цей ефект призводить до збільшення ширини забороненої зони, що підтверджується наявністю фотолюмінесценції пористого кремнію.

Шари пористого кремнію, отримані як методом електрохімічного травлення, так і хімічного травлення, проявляли фотолюмінесцентні властивості, характерні для ПК, – широку смугу у видимій області діапазону з інтенсивністю, достатньою для спостереження ФЛ неозброєним оком. Усі зразки хімічного пористого кремнію мали яскраве світіння з максимумом в області ~ 640 нм, а для електрохімічного пористого кремнію – більш яскраве світіння з максимумом в області ~ 700 нм.

Для плівок НПК, що відрізняються розміром нанокристалів, максимум фотолюмінесценції відповідає довжині хвилі 650 нм (рис. 2). Максимальна інтенсивність фотолюмінесценції, що обумовлена структурними змінами кремнію і квантово-розмірними явищами, отримана для зразків с товщиною нанопористого кремнію $15 \div 20$ нм.

Керованість фотолюмінесцентних властивостей нанопористого кремнію дозволяє створювати фотоелектричні гетероструктури для ефективного перетворення енергії сонячної радіації в усьому спектрі.

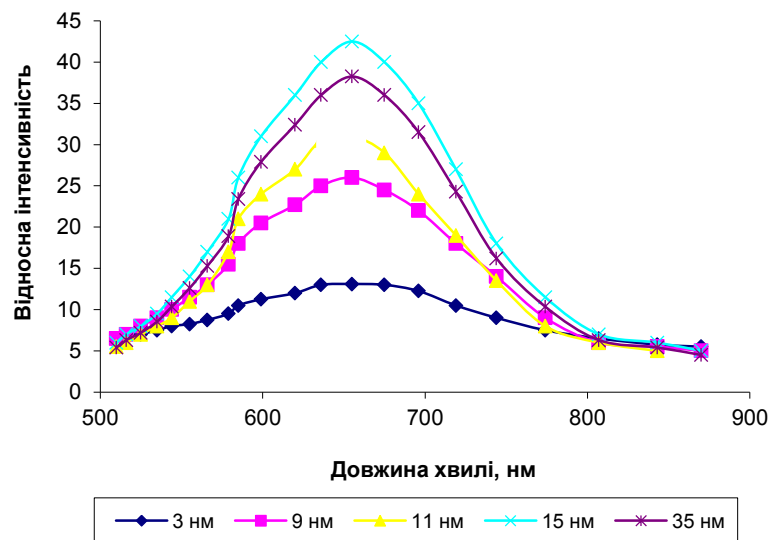


Рис. 2. Спектри фотолюмінесценції плівок нанопористого кремнію, отриманого хімічним методом, з різною розмірністю нанокристалів.

Підвищення тривалості травлення приводить одночасно до збільшення товщини пористого шару і росту інтенсивності ФЛ без зміщення положення максимуму смуги. Можна було б припустити, що причиною росту інтенсивності ФЛ є як збільшення кількості нанокристалів кремнію визначеного розміру (тому що не зміщується смуга ФЛ), так і збільшення центрів рекомбінації, що пов'язані з утворенням окису на поверхні кристалів. Зменшення інтенсивності ФЛ також пов'язано зі зміною хімічного складу пористого шару.

З ростом часу травлення збільшується опір пористого шару. Як показують результати ВІМС досліджень, при довшому травленні спостерігається збільшення кисневмісних сполук, що свідчить про переважне окиснення поверхні пористого шару. Зміни інтенсивності ФЛ у залежності від режимів травлення можуть бути пояснені на основі структурних змін, що виникають у процесі формування nc-Si при зміні часу формування нанокристалічного шару. У результаті хімічного травлення на поверхні мікрорельєфу формується нанорельєф. А при збільшенні часу травлення до 5 хв. відмінностей у структурі поверхні не спостерігається лише зростає товщина нанопористого шару від 3 до 35 нм.

Зміна ступеня розведення розчину, так і часу травлення призводить до формування різної структури нанопористого кремнію, що відображається на його фотоелектричних характеристиках.

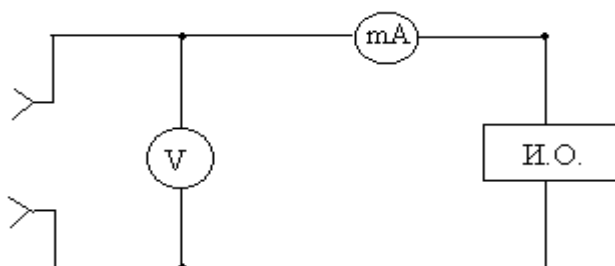
Технологічний маршрут виготовлення структур на основі наноструктурованого кремнію.

1. Хімічна обробка пластин монокристалічного кремнію від органічних забруднень та важких металів (розчини Каро, травники SP 1, SP 2).

2. Вирощування тонких плівок наноструктурованого кремнію на поверхні монокристалічного кремнію методом хімічного травлення з використанням двох типів травників.

3. Виготовлення омічних контактів до плівок наноструктурованого кремнію шляхом нанесення срібної пасти при кімнатній температурі.

Схема вимірювання



Прилади та обладнання

1. Стабілізоване джерело живлення Б5-47.
2. Цифровий вольтамперметр В7-35.
3. Джерело опромінення – вольфрамова лампа (джерело А).
4. Джерело ультрафіолетового випромінювання – лампа «Спектр 5-А4/М»
5. Витяжна шафа ЗШ-НЖ.
6. Лінія хімії «Лада».
7. Установка вакуумного наплення УВН – 74 П.
8. Установка скрайбування «Алмаз».
8. Паяльна станція Digital 2000А.

Порядок виконання роботи

1. Провести технологічні процеси згідно пунктів 1÷3 (склад та режими травлення задаються викладачем).

2. Провести дослідження фотолюмінесцентних властивостей плівок наноструктурованого кремнію при опроміненні ультрафіолетовим опроміненням (довжина хвилі в максимумі 350 нм).

3. Провести дослідження провідності та фотопровідності на виготовлених фоторезисторах.

4. Зібрати схему вимірювання характеристик фоторезистора.

5. Підключити фоторезистор до зажимів схеми.

6. Зняти залежність струму від прикладеної напруги в діапазоні 1÷10 В з кроком 1В в темновому режимі.

7. Повторити п. 4-6 для п'яти значень освітлення (задаються викладачем).

8. Повторити п.4-6 при освітленні ультрафіолетом.

Обробка результатів

1. Побудувати вольт-амперні характеристики фоторезисторів.
2. Побудувати залежність фотоструму (різниця між струмами в світловому та темновому режимах) від рівня освітленості (люкс-амперна характеристика) при напрузі 5 В для зразків з різними технологічними параметрами.
3. Розрахувати коефіцієнт фоточутливості як відношення зміни фотоструму до зміни світлового потоку для всіх зразків.
4. Написати висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Які відомі методи отримання плівок наноструктурованого кремнію?
2. Назвіть функціональні властивості наноструктурованого кремнію.
3. Які хімічні процеси відбуваються під час вирощування наноструктурованого кремнію?
4. Чому інтенсивність фотолюмінесценції шару нанопористого кремнію залежить від режимів травлення?
5. Поясніть причину чутливості шару нанопористого кремнію в ультрафіолетовому діапазоні.
6. У чому полягають гетеруючі властивості НПК?
7. Як змінюється провідність шару НПК від режимів травлення і чому?
8. Чи можуть шари нанопористого кремнію застосовуватися для оптичних ЗП?

Вимоги до звіту

Звіт повинен містити:

1. Мету роботи.
2. Короткі теоретичні відомості.
3. Порядок виконання роботи.
4. Експериментальні результати в табличному та графічному вигляді.
5. Висновки.

Рекомендована література

1. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. - М.: Техносфера. - 2005. - 334 с.
2. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение. – 2007. – 493 с.
3. Ермаков О. Прикладная оптоэлектроника - М.: Техносфера. - 2005. - 414 с.
4. Розеншер Э. Оптоэлектроника. - М.: Техносфера. – 2005. – 296 с.
5. Воробьев Л.Е., Ивченко Е.Л., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А. Оптические свойства наноструктур, под ред. Ильина В.И., Шика А.Я. – С-П, Наука.-2001.- 299с.
6. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика наноразмерных систем, под ред. Ильина В.И., Шика А.Я. - С-П, Наука.-2001.- 312 с

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

«Нанесення металевих плівок на напівпровідникові пластини методом вакуумного термічного випаровування»

Мета роботи: ознайомитися з методом отримання тонких металевих плівок на поверхні напівпровідникових пластин випаровуванням речовини та конденсацією її з парової фази у вакуумі, визначити основні характеристики процесу випаровування та конденсації, а також ознайомитися з методикою визначення електрофізичних характеристик, виміряти товщину нанесеної металевої плівки за допомогою інтерферометра.

Короткі теоретичні відомості

Термовакuumний метод (випаровування та конденсація речовини у високому вакуумі) був і є одним з найпоширенішим способом отримання тонких плівок, які використовуються при виробництві інтегральних схем. Цьому поширенню сприяли:

- низька вартість та простота реалізації процесу;
- універсальність, яка дозволяє в одній вакуумній установці отримувати плівки різних матеріалів;
- стерильність процесу – за наявності високого вакууму отримувати плівки практично без забруднень;
- можливість не тільки осаджувати плівки на пластину, але й отримувати потрібну конфігурацію у разі використання механічних масок;
- висока швидкість випаровування речовини та можливість регулювання її в широких межах за рахунок зміни підведеної до випаровувача потужності;
- можливість проводити процес у високому вакуумі в окислювальному або відновлювальному середовищі розріджених газів;
- висока продуктивність у разі групового завантаження та обробки пластин.

Властивості плівок при рості залежать від структури пластини, стану поверхні, температури, властивостей осаджуваної речовини, ступеня вакууму у камері та інших факторів.

Залежно від конкретних умов осадження тонкі плівки можуть мати такі основні структури: острівкову, зернисту, аморфну, полі та монокристалічну.

Основні визначення

Вакуум – стан замкнутого об'єму, де тиск повітря менше за атмосферний. Умовно, розрізняють три ступені вакууму. Низький – це коли довжина вільного

пробігу молекул залишкового газу у відкачуваному об'ємі менша за більший з геометричних розмірів об'єму, середній – довжина вільного пробігу молекул залишкового газу у відкачуваному об'ємі дорівнює більшому з геометричних розмірів об'єму, а високий вакуум – довжина вільного пробігу молекул залишкового газу у відкачуваному об'ємі більше геометричних розмірів об'єму. Основними одиницями вимірювання тиску у вакуумній камері є – Торрічелі (Торр) та Паскаль (Па). 760 мм ртутного стовпчика (760 Торр) дорівнює тиску природного повітря у 1 атмосферу, а 1 Торр дорівнює $1,33 \cdot 10^2$ Па.

Форвакуумний насос – це насос, який, наприклад, через впускний клапан рухає молекули повітря з вакуумної камери до випускного клапана за рахунок механічного обертання лопатей ротора у замкнутому об'ємі статора насоса. Прикладом такого насоса є побутовий пилосмок. Переважна більшість таких насосів забезпечують низький вакуум.

Високовакуумний насос. У цій роботі використовується пароструминний дифузійний насос, який не може працювати без форвакуумного насоса, під'єданого послідовно з ним. Вакуумна камера повинна бути попередньо відкачана форвакуумним насосом, тому що високовакуумний насос не може працювати в середовищі атмосферного повітря.

Принцип відкачування молекул залишкового газу з вакуумної камери пароструминним насосом полягає у переносі молекул залишкового газу на вході насоса до випускного патрубка за рахунок їх дифузії у потоку парів спеціальної рідини, яка розпиляється у корпусі насоса з кільцевого сопла у напрямку випускного патрубка.

Прикладом високовакуумного насосу – є машина для миття тротуарів, яка розганяє сміття струменем води. Сучасні дифузійні насоси забезпечують вакуум не більше як 10^{-7} Торр (або мм ртутного стовпчика).

Обладнання та матеріали: вакуумна установка УВН73-П2; інтерферометр МІІ-4; вимірювач поверхневого опору плівок ІУС-3; мідь вакуумної плавки в гранулах або нікель анодний; титан іодідний або хром електролітичний; пластини кремнію; спирт етиловий ректифікований, бензин «Калоша», серветка бязева вибілена безворсова, транспортна касета, пінцет, гумові рукавички, халат медичний.

Вакуумна установка УВН73-П2 призначена для нанесення плівок на підкладки у вакуумній камері методом випаровування речовини з тигля (який нагрівається електронним променем), для лабораторних та наукових досліджень.

Вона складається зі стійки, на якій розміщені: вакуумна камера (ВК) з двома рухомими кришками на консолі, кутовий перехід (КП) з пневмоприводом високовакуумного затвору (ВВЗ) та фланця з перетворювачем іонізаційним манометричним (ІМ), блоку керування вакуумною системою (БКВС), форвакуумного (ФН) та високовакуумного дифузійного (ДН) насосів з форвакуумними термопарними манометричними перетворювачами (ТП1,2), системи водяного охолодження елементів обладнання, вакуумних клапанів та стійки живлення і керування (СЖК) технологічним процесом.

На передній кришці ВК розміщені: карусель з елементами кріплення підкладок на 30 позицій та платиновим сенсором температури підкладок (з середини ВК), вакуумний електромеханічний привід обертання каруселі під час проведення циклу осадження плівок на підкладки (ззовні ВК) та оглядове скло для візуального контролю технологічного процесу оператором.

На задній кришці ВК розміщені: зовнішній фланець з трьома електронно-променевими гарматами (ЕПГ) та тримачів тиглів, консолі з галогенними лампами для нагріву каруселі з підкладками, рухома заслінка для тиглів, вакуумні електричні вводи для живлення елементів ЕПГ (із середини ВК) та вакуумний електромеханічний привід для обертання каруселі (ззовні ВК).

В СЖК розміщені: блок керування нагрівом каруселі (БКНК), блок керування заслінкою та обертанням каруселі (БКЗО), пропорційний регулятор температури (РТ) за сигналом сенсора температури каруселі, блок керування та живлення елементів ЕПГ, (БЕПГ) та силові тиристорні пристрої для живлення катодів ЕПГ (40 А), високовольтний випрямляч 5 кВ x 1 А та галогенних ламп 220В x 20А, накалильний та високовольтний трансформатори.

Мнемосхема вакуумної системи установки зображена на рис.1

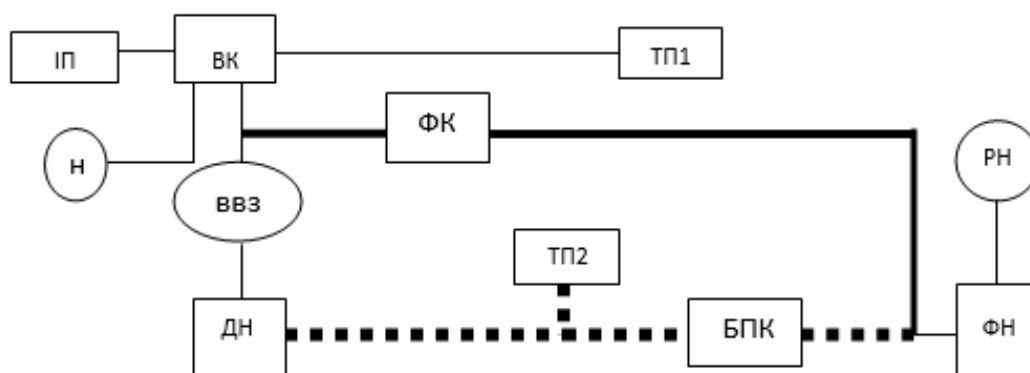


Рис. 1. Мнемосхема вакуумної системи установки

ВК – вакуумна камера; ДН – високовакуумний дифузійний насос; ФН – форвакуумний насос; БПК – байпасний (bypass) вакуумний клапан; ФК – форвакуумний клапан; ВВЗ – високовакуумний затвор; Н – натікач; РН – ручний натікач; ТП1, ТП2 – перетворювач манометричний термопарний ПМТ-2; ІП – перетворювач манометричний іонізаційний ПМИ – 2, лінії між блоками – це вакуумні магістралі з фланцевими з'єднаннями через гумові ущільнювачі. Лінією ■■■■ марковано форвакуумну магістраль відкачки ДН, а лінією — марковано форвакуумну магістраль відкачки ВК .

Для вимірювання ступеня розрідження у ВК під час нанесення плівок використовується вакуумметр ВИТ - 1М, який розташовано на полиці зверху КП установки. Прилад з'єднаний з ІП кабелем.

Інтерферометр МИИ-4 - це оптичний прилад для вимірювання товщини

плівок за рахунок явища інтерференції на межі поділу плівка – підкладка. Перед виконанням лабораторної роботи необхідно додатково ознайомитись з інструкцією про користування цим приладом.

Вимірювач поверхневого опору плівок ИУС-3 - це електронний прилад для вимірювання поверхневого опору плівок або інших струмопровідних зразків зондовим методом на постійному струмі. Перед виконанням лабораторної роботи необхідно додатково ознайомитись з інструкцією про користування цим приладом.

Заходи безпеки.

Будь-які дії, студентів з обладнанням під час виконання лабораторної роботи проводяться виключно під керівництвом та наглядом уповноваженого інженерно – технічного персоналу учбової лабораторії.

Категорично **ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ** студентам виконувати лабораторну роботу самостійно без нагляду досвідченого персоналу. Напруга, яка використовується при роботі установки **небезпечна для життя**. Тому потрібно дотримуватися правил з охорони праці під час роботи з високовольтним електричним обладнанням (напруга до 10000 В). **Забороняється** вмикати установку в мережу 380 В та працювати на установці без заземлення.

Заборонено працювати на установці, при несправних блокуваннях або їх замиканні.

Заборонено працювати на установці, якщо немає протоку води з магістралі через систему охолодження установки.

До роботи з установкою допускаються тільки ті особи, які вивчили порядок підготовки установки до експлуатації, засвоїли методику вимірювання на приладах та пройшли інструктаж з охорони праці з вакуумним високовольтним обладнанням.

1. Порядок підготовки обладнання для виконання лабораторної роботи

1.1 Увімкнути установку. Для цього натиснути кнопку «Сеть», розташовану на стійці вакуумної установки, зліва від лицьовій панелі БКВС. Увімкнути форвакуумний насос установки, натиснувши кнопку на панелі БКВС. Увімкнути БПК, натиснувши кнопку форвакуумної магістралі відкачки ДН, по мнемосхемі на панелі БКВС. Далі, увімкнути нагрівник ДН, натиснувши кнопку по мнемосхемі. Через 45 - 60 хвилин, у залежності від температури навколишнього середовища, ДН буде готовий до роботи.

За час виходу ДН на робочий режим, виконати наступні технологічні операції:

1.2 Зважити тиглі з міддю (нікелем) та хромом (титаном) на аналітичних вагах.

1.3 Встановити тиглі на їх місця у ЕПГ .

1.4 Одягнути гумові рукавички, протерти змоченою у спирті серветкою місця на каруселі, де буде встановлено зразки.

1.5 Закріпити кремнієві пластини на каруселі ВК за допомогою пружин.

1.6 Затінити частину однієї з пластин маскою для отримання переходу плівка – підкладка.

2. Порядок виконання роботи

2.1 Обережно закрити передню кришку ВК. Вакуумувати камеру до $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., користуючись кнопками на лицьовій панелі БКВС. Для цього, відтиснути кнопку

форвакуумної магістралі відкачки ДН, відкач камеру, включивши ФК (натиснути кнопку форвакуумної магістралі відкачки ВК). Коли значення приладу індикації форвакууму у ВК (аналоговий прилад на на лицьовій панелі БКВС, у положенні перемикача шкали діапазону форвакуума «II», з правої сторони) досягне 18 поділок, відтиснути кнопку форвакуумної магістралі відкачки ВК. Увімкнути БПК (натиснувши кнопку форвакуумної магістралі відкачки ДН.)

Потім, відкрити ВВЗ, натиснувши кнопку . При цьому, стрілка приладу індикації форвакууму БКВС почне рухатись у крайнє ліве положення - показник нормальної роботи високовакуумного насоса ДН. Через 3 хв. увімкнути іонізаційний вакуумметр ВИТ-1М, перевівши тумблер «Сеть» у положення «Вкл». Контролювати вакуум у ВК цим приладом відповідно до інструкції з користування.

Після досягнення вакууму у камері вищезгаданого значення, виконати наступне:

2.2 Увімкнути обертання каруселі тумблером «Вращение» на лицьовій панелі БКЗО.

2.3 Увімкнути клапан подачі охолоджуючої води на консолі галогенних ламп та ЕПГ на лицьовій панелі БКВС. При цьому гасне відповідний індикатор червоного кольору на лицьовій панелі БКВС. Увімкнути нагрів каруселі тумблером «НАГРЕВ» на БКНК. Якщо індикатор не гасне, перевірити блокування та протік води через систему охолодження консолей галогенних ламп.

2.4 Нагріти пластини до температури 200°C , керуючись показаннями температури аналогового приладу на передній панелі РТ. Час нагріву для вказаної температури сягає близько 20 хв.

2.5 Пересвідчившись, що рукоятки регуляторів струму катоду та високої напруги ЕПГ знаходяться у крайньому лівому положенні, а на лицьовій панелі блока світить індикатор «ГОТОВ», увімкнути БЕПГ тумблером «РЕЖИМ-ПРОГРЕВ-ОТКЛ» у положення «РЕЖИМ». Обережно повертаючи за годинниковою стрілкою рукоятки регуляторів, встановити значення струму катода та величину прискорювальної напруги ЕПГ відповідно до карти режимів ЕПГ. Якщо індикатор «ГОТОВ» не світиться, перевірити блокування та протік води через систему охолодження ЕПГ.

2.6 Після розігріву тигля на робочий режим, відповідно до карти технологічних режимів ЕПГ, відкрити заслінку та нанести хром (титан) на пластини. Час нанесення зазначено в карті технологічного процесу. Після закінчення нанесення плівки хрому (титану) вимкнути БЕПГ тумблером «РЕЖИМ-

ПРОГРЕВ-ОТКЛ» у положення «ОТКЛ», закрити заслінку.

2.7 Перемістити роз'єм (маркований синім кольором) на задній кришці ВК на роз'єм ЕПГ з тиглем № 2 (мідь, нікель) і провести другий цикл нанесення плівок на пластини, відповідно до п. 2.5.

2.8 Після закінчення останнього циклу вимкнути ВИТ – 1М, вимкнути нагрів та обертання каруселі і дочекатись, коли її температура досягне температури 50 °С. Час охолодження для вказаної температури близько 40 хв.

2.9. Напустити в установку повітря, увімкнувши натікач Н.

2.10 Відкрити передню кришку ВК, одягнути рукавички, зняти пружинні кріплення пластин та обережно витягнути їх пінцетом і покласти у транспортну касету.

2.11 Виміряти поверхневий опір плівок на ИУС-3.

Послідовність вимірювання поверхневого опору така:

1. Покласти пластину (яка була в камері без маски) пінцетом на стіл для вимірювання.
2. Установити зондову голівку на поверхню пластини.
3. Виміряти поверхневий опір у 3-5 точках поверхні пластини відповідно до інструкції з експлуатації.

2.12. Виміряти товщину плівки металів.

Послідовність вимірювання товщини плівки така:

1. Покласти пластину (яка була в камері з маскою) пінцетом на стіл інтерферометра МИИ-4 вниз із нанесеною плівкою. Виміряти товщину плівки у відповідності до інструкції з експлуатації інтерферометра.
2. Результати вимірювань занести в журнал.

Обробка результатів

1. Визначити швидкість випаровування за втратою маси тигля.
2. Розрахувати теоретичне значення швидкості випаровування.
3. Розрахувати швидкість конденсації.
4. Обчислити похибку експерименту.

Контрольні запитання

1. Зобразити схему вакуумної системи установки для нанесення плівок металів.
2. Пояснити принцип дії механічних вакуумних насосів
3. Пояснити принцип дії вакуумного дифузійного насоса
4. Перерахувати та описати методи вакуумного нанесення металів.

5. Типи вакуумних систем, що використовуються в мікроелектронних технологіях.
6. Зобразити конструкції випарників.
7. Яким чином можна керувати швидкістю випаровування речовини і швидкістю росту плівки?
8. Як працює термопарний манометр?
9. Як працює іонізаційний манометр?
10. Методи контролю товщини плівок у процесі нанесення та готових зразків.
11. Основні типи структури плівки, вплив технологічних умов на формування певної структури плівки.
12. При яких технологічних умовах формується кристалічна структура плівки?
13. Назвати робочі температури підкладинки та тиглів випаровувача.

Вимоги до звіту

Звіт повинен містити:

1. Мету роботи.
2. Короткі теоретичні відомості.
3. Порядок виконання роботи.
4. Експериментальні результати в табличному та графічному вигляді.
5. Висновки.

Рекомендована література

1. Курносів А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1979. – 367 с.
2. Технология СБИС / Под ред. Зи С. – М: Мир, 1986. – т.1. – 402 с.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

«Нанесення металевих плівок на напівпровідникові пластини методом магнетронного розпилення»

Мета роботи: ознайомитися з методом отримання тонких металевих плівок на поверхні напівпровідникових пластин перенесенням речовини з мішені та її конденсація на підкладці у низькому вакуумі методом магнетронного розпилення, визначити основні характеристики процесу випаровування та конденсації, а також ознайомитися з методикою визначення електрофізичних характеристик, виміряти товщину нанесеної металевої плівки за допомогою інтерферометра.

Короткі теоретичні відомості

Метод магнетронного розпилення (розпилення та конденсація речовини при низькому тиску 10^{-3} - $15 \cdot 10^{-3}$ у атмосфері інертного газу (Ar) при отриманні плівок чистих металів чи сплавів, або у суміші інертного та реактивного (N_2, O_2, CH_3) газів при синтезі плівок оксидів, нітридів чи карбідів) є одним з найпоширенішим способом отримання тонких плівок, які використовуються при виробництві інтегральних схем. Цьому поширенню сприяли:

- низька вартість та простота реалізації процесу;
- універсальність, яка дозволяє в одній вакуумній установці отримувати плівки різних матеріалів;
- стерильність процесу — за наявності контрольованої газової атмосфери отримувати плівки, майже позбавлені забруднень;
- висока швидкість розпилення речовини та можливість регулювання її в широких межах за рахунок зміни підведеної до випаровувача потужності;
- можливість проводити процес у вакуумі в реактивному або інертному середовищі розріджених газів з отриманням в результаті плівки як чистих матеріалів так і їх сполук;
- можливість отримання стехіометричних за складом плівок сплавів за рахунок відсутності явища фракціонування;

- висока продуктивність у разі групового завантаження та обробки пластини.

Властивості плівок залежать від структури підкладки, стану поверхні, температури, властивостей осаджуваної речовини, ступеня вакууму, чистоти і складу робочих газів та їх сумішей у камері та інших факторів.

Залежно від конкретних умов осадження тонкі плівки можуть мати такі структури: острівкову, зернисту, аморфну, полі та монокристалічну.

Основні визначення:

Вакуум – стан замкнутого об'єму, де тиск повітря менший, ніж атмосферний. Умовно, розрізняють три ступеня вакууму. Низький – це коли довжина вільного пробігу молекул залишкового газу у відкачуваному об'ємі є меншою, а ніж більший з геометричних розмірів об'єму, середній – довжина вільного пробігу молекул залишкового газу у відкачуваному об'ємі дорівнює більшому з геометричних розмірів об'єму, а високий вакуум – довжина вільного пробігу молекул залишкового газу у відкачуваному об'ємі більше геометричних розмірів об'єму. Основними одиницями вимірювання тиску у вакуумній камері є – Торрічелі (Торр) та Паскаль (Па). 760 мм ртутного стовпчика (760 Торр) дорівнює тиску природного повітря у 1 атмосферу, а 1 Торр дорівнює $1,33 \cdot 10^2$ Па.

Форвакуумний насос – це насос, який, наприклад, через впускний клапан рухає молекули повітря з вакуумної камери до випускного клапана за рахунок механічного обертання лопатей ротора у замкнутому об'ємі статора насоса. Прикладом такого насоса є побутовий пилосмок. Переважна більшість таких насосів забезпечують низький вакуум.

Турбомолекулярний насос. У цій роботі використовується турбомолекулярний насос, який не може працювати без форвакуумного насоса, підключеного послідовно з ним. Вакуумна камера повинна бути попередньо відкачана форвакуумним насосом, бо високовакуумний насос не може працювати в середовищі атмосферного повітря.

Принцип відкачки молекул залишкового газу з вакуумної камери турбомолекулярним насосом полягає у переносі молекул залишкового газу на вході насоса до випускного патрубка за рахунок їх розрідження турбіною, що має дуже малі щілини між ротором і статором (близько 10 мкм) та має дуже високу швидкість обертання (від 14000 до 30000 обертів на хвилину). Для забезпечення нормальних умов роботи турбіни на її виході має підтримуватись тиск $10^{-1} - 10^{-2}$ мм.рт.ст..

Прикладом турбомолекулярного насосу є – осьовий вентилятор, турбіна пилосмока, які створюють розрідження на вході. Сучасні турбомолекулярні насоси забезпечують вакуум нарівні $10^{-10} - 10^{-11}$ мм.рт.ст.

Обладнання та матеріали: вакуумна установка КАТОД-1М;

інтерферометр МІІІ-4; вимірювач поверхневого опору плівок ІУС-3; мішені: мідна, нікелева, ванадієва; алюмінієва; пластини кремнію; спирт етиловий ректифікований, бензин «Калоша», серветка бязева вибілена безворсова, транспортна касета, пінцет, гумові рукавички, халат медичний.

Вакуумна установка КАТОД-1М призначена для нанесення плівок на підкладки у вакуумній камері методом розпилення речовини з відповідних мішеней під дією прискорених іонів робочих газів, які утворюються за рахунок горіння тліючого газового розряду в схрещених електричному та магнітному полях, для лабораторних та наукових досліджень.

Вона складається зі станини, на якій розміщені: горизонтальна вакуумна камера (ВК) з кришкою що піднімається пневмоприводом, кутовий перехід (КП) з пневмоприводом високовакуумного затвору (ВВЗ) та фланця з перетворювачем іонізаційним манометричним (ІП), блоку пневмоклапанів керування вакуумною системою (БКВС), форвакуумного (ФН) та високовакуумного турбомолекулярного (ТМН) насосів з форвакуумними термопарними манометричними перетворювачами (ТП1,2), системи водяного охолодження елементів обладнання, вакуумних клапанів та 4-х шаф живлення та керування вакуумною системою і параметрами технологічного процесу.

На дні ВК розміщені: карусель з елементами кріплення підкладок для 6 позицій. 5 магнетронних розпилюючих пристроїв (у подальшому магнетронів) та блоку ІЧ нагрівачів з платиновим сенсором температури підкладок (з середини ВК), вакуумний електромеханічний привід обертання каруселі під час проведення циклу осадження плівок на підкладки (ззовні ВК) та 5-ти оглядових ілюмінаторів, що розташовані на бокових стінках вакуумної камери навпроти відпорного магнетрона.

Мнемосхема вакуумної системи установки зображена на рис.1

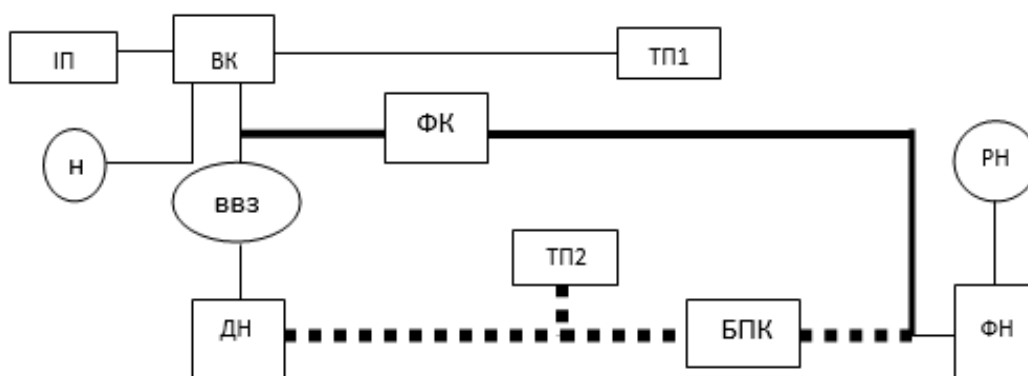


Рис.1. Мнемосхема вакуумної системи установки

ВК – вакуумна камера; ТМН –високовакуумний турбомолекулярний насос; ФН - форвакуумний насос; БПК – байпасний (bypass) вакуумний клапан; ФК – форвакуумний клапан; ВВЗ – високовакуумний затвор; Н – натікач робочих газів; РН – ручний натікач ФН; ТП1, ТП2 – перетворювач манометричний термопарний ПМТ-2; ІП – перетворювач манометричний

іонізаційний ПМИ – 2, лінії між блоками – це вакуумні магістралі з фланцевими з'єднаннями через резинові ущільнювачі. Лінією марковано форвакуумну магістраль відкачки ТМН, а лінією марковано форвакуумну магістраль відкачки ВК

Для вимірювання ступеня розрідження у ВК під час нанесення плівок використовується блок БИУВ, який розташований в верхній частині шафи керування технологічним процесом.

Студентам **СУВОРО ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ** самостійно вмикати цей прилад.

Інтерферометр МИИ-4 - це оптичний прилад для вимірювання товщини плівок за рахунок явища інтерференції на межі поділу плівка – підкладка. Перед виконанням лабораторної роботи необхідно додатково ознайомитись з інструкцією про користування цим приладом.

Вимірювач поверхневого опору плівок ИУС-3 - це електронний прилад для вимірювання поверхневого опору плівок або інших струмопровідних зразків зондовим методом на постійному струмі. Перед виконанням лабораторної роботи необхідно додатково ознайомитись з інструкцією про користування цим приладом.

Заходи безпеки.

Категорично **ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ** студентам виконувати лабораторну роботу самостійно без нагляду досвідченого персоналу. Напруга, яка використовується при роботі установки - **небезпечна для життя**. Тому потрібно дотримуватися правил з охорони праці під час роботи з високовольтним електричним обладнанням (напруга до 10000 В).

Забороняється вмикати установку в мережу 380 В та працювати на установці без заземлення.

Заборонено працювати на установці, якщо блокування несправні або є закороченими.

Заборонено працювати на установці, якщо немає протоку води з магістралі через систему охолодження установки.

До роботи з установкою допускаються особи, які вивчили порядок підготовки установки до експлуатації, засвоїли методику вимірювання на приладах та пройшли інструктаж з охорони праці з вакуумним високовольтним обладнанням.

1. Порядок підготовки обладнання для виконання лабораторної роботи

1.1. Увімкнути установку:

- відкрити вентиль холодної води і подати воду в систему охолодження ТМН камери, блоку нагріву та МРС;
- увімкнути автомат «СЕТЬ», що знаходиться на шафі живлення;
- натиснути кнопку «ПУСК» поряд з автоматом;
- натиснути кнопку «ПУСК», розташовану на блоці БУВТ шафи

живлення;

- увімкнути ФВН, натиснувши кнопку «ФВН» на блоці БУВТ та натиснути кнопку K11 на цьому ж блоці;

- увімкнути ТМН: на блоці УВ96-06 шафи живлення увімкнути маслонасос ТМН, увімкнувши тумблер «ВКЛ МН» а після засвічення світлодіода «МН» натиснути кнопку «ПУСК», цього ж блоку.

При виході турбіни на робочий режим засвітиться світлодіод «НОРМ РЕЖ». Установка готова до роботи.

За час виходу ТВН на робочий режим, виконати наступні технологічні операції:

1.2. Натиснути кнопки «НАПУСК» та «КРИШКА» розгерметизувати і відкрити камеру. Зняти тримачі підкладок.

1.3. Очистити пилосмоком поверхні мішеней.

1.4. Одягти гумові рукавички та протерти змоченою у спирті серветкою місця на тримачах підкладок.

1.5. Закріпити кремнієві пластини на тримачах підкладок.

1.6. Затінити частину однієї з пластин маскою для отримання сходинки плівка – підкладка.

1.7. Установити тримачі підкладок.

2. Порядок виконання роботи

2.1 Обережно закрити верхню кришку ВК натиснувши повторно кнопки «НАТЕК» та «КРИШКА» блоку БУВТ, Забезпечити вакуум у камері на рівні до $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., відтиснувши кнопку «K11» та натиснувши кнопку «K1» блоку БУВТ користуючись кнопками на лицьовій панелі БКВС. Для цього, натиснути повторно кнопку. Коли значення приладу індикації форвакууму у ВК (блок БИНВ шафи вимірювання аналоговий прилад на лицьовій панелі блоку БИНВ) досягне 18 поділок, відтиснути кнопку «K1» і натиснути кнопку «K2» блоку БУВТ шафи керування.

Відкрити ВВЗ, натиснувши кнопку «ЗАТВОР» блоку БУВТ шафи керування. При цьому стрілка приладу індикації форвакууму БКВС почне рухатись у крайнє праве положення, нормальної роботи турбомолекулярного насоса ТВН. Через 3 хв. увімкнути блок БИУВ, перевівши тумблер «Вкл» у положення «Вкл». Контролювати вакуум у ВК цим приладом відповідно до інструкції з користування.

Після досягнення вакууму у камері вищезгаданого значення, виконати наступне:

2.2 Встановити швидкість обертання каруселі:

- увімкнути тумблером «Сеть» блок БКС;

- задатчиком «ЗАДАТЧИК V» встановити необхідну швидкість обертання каруселі (960) та натиснути кнопку «ЗАПИСЬ»;

- увімкнути привід обертання каруселі натиснувши кнопку «ЗДП» на блоці БУВТ;- перевести шторку в положення 2 (магнетрон з А1 мішенню закритий) натиснувши і відпустивши кнопку «ЗАСЛ» на блоці БУВТ. Положення заслінки індикується відповідним світлодіодом.

2.3 Увімкнути подачу холодної води на блок нагріву підкладок та МРС, натиснувши кнопку «ХОЛ» блоку БУВТ. На блоці БЗКТ шафи контролю технологічних параметрів за датчиками «ТЕМПЕРАТУРА» та «СКОРОСТЬ НАГРЕВА С/мин» установити температуру підкладок та швидкість нагріву, в нашому випадку $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$, увімкнути автомат «НАГРЕВ» на шафі керування. Подати живлення на блок нагріву, натиснувши кнопку «ПУСК» на блоці БУН. Засвітиться табло «НАГРЕВ», при досягненні заданої температури засвітиться табло «ГОТОВ» на блоці БУН, а індикатор на блоці БЗКТ відобразатиме дійсну температуру підкладок. При досягненні стабілізації температури підкладок вимкнути нагрів підкладок натиснувши кнопку «СТОП» на блоці БУН,

2.4 Подати робочий газ в камеру, для чого відкрити вентиль балону з робочим газом, натиснути кнопку «ТЕХНОЛ» і повільно обертаючи проти годинникової стрілки ручку натікача установити робочий тиск у камері $30 \cdot 10^{-1}$ Па. Робочий тиск контролювати індикатором блоку БИУВ.

2.5 Увімкнути автомати «СЕТЬ» на шафі живлення магнетронів. Натиснути кнопки «ПУСК» та «УПРАВЛЕНИЕ РУЧ» на блоці УВ43-03 КАНАЛ, резисторами «ТОК НАГРУЗК», «ГРУБО», «ТОЧНО» установити струм розряду 4А.

2.6 Провести розпилення мішені на шторку протягом 5 хв.

2.7 Провести нанесення плівки на підкладки, для чого перевести, натискуючи кнопку «ЗАСЛ» блоку БУВТ, заслінку в положення «НАГР», Положення заслінки відображається відповідним світлодіодом лінійки світлодіодів «ПОЛОЖЕНИЕ ЗАСЛ» блоку БУВТ. Час нанесення 20-40 хв задається викладачем.

2.8 Перевести заслінку в відповідне положення, натискуючи кнопку «ЗАСЛ» блоку БУВТ.

2.9 Вимкнути живлення магнетрона, для чого резисторами «ТОК НАГРУЗКИ», «ГРУБО», «ТОЧНО» вивести струм розряду в 0, та натиснути кнопки «УПРАВЛЕНИЕ ОТКЛ» та «ОТКЛ» блока УВ43-03. Вимкнути автомати «СЕТЬ» шафи живлення магнетронів. Вимкнути привід обертання каруселі, відтиснувши кнопку «ЗДП» блоку БУВТ.

2.10 Зупинити подачу робочого газу в камеру відтиснувши кнопку «ТЕХНОЛ» блоку БУВТ та закривши натікач на газу обертаючи його ручку за часовою стрілкою до упору. Закрити балон з газом.

2.11 Вимкнути блок БИУВБ, перевівши тумблер «СЕТЬ» у положення «ОТКЛ»

2.12 Закрити ВВЗ, натиснувши кнопку «ЗАТВ» блоку БУВТ

Суворо заборонено закривати ВВЗ не вимкнувши блок БИУВ

2.13 Розгерметизувати ВК, натиснувши кнопку «НАТЕК». Після закінчення нагнітання повітря в камеру, натиснувши кнопку «КРИШКА», відкрити ВК.

2.14 Дістати тримачі підкладок, вийняти підкладки з нанесеними плівками.

2.15. Повторно натиснувши кнопки «НАТЕК» і «КРИШКА» закрити камеру

2.16 Повторно натиснувши кнопку «К!!» та натиснувши кнопку «К1» відкачати ВК на форвакуум.

2.17 Натиснути кнопку «К!!». і вимкнути ТМН, натиснувши кнопку «СТОП» на блоці УВ96-05. Після зупинки ТМН (близько 15-20 хв), повторно натиснути послідовно кнопки «К!!» та «ФВН»

2.18 Вимнути установку, натиснувши кнопки «СТОП» блоку БУВТ та на панелі керування шафи живлення, вимкнути автомати «СЕТЬ» на панелі керування шафи живлення.

2.19 Закрити подачу води на установку.

2.20 Виміряти поверхневий опір плівок на ИУС-3.

Послідовність вимірювання поверхневого опору така:

1. Покласти пластину (яка була в камері без маски) пінцетом на стіл для вимірювання.
2. Установити зондову голівку на поверхню пластини.
3. Виміряти поверхневий опір у 3-5 точках поверхні пластини відповідно до інструкції з експлуатації.

2.21 Виміряти товщину плівки металів.

Послідовність вимірювання товщини плівки така:

1. Покласти пластину (яка була в камері з маскою) пінцетом на стіл інтерферометра МИИ-4 вниз нанесеною плівкою. Виміряти товщину плівки у відповідності до інструкції з експлуатації інтерферометра.
2. Результати вимірювань занести в журнал.

Обробка результатів

1. Розрахувати теоретичне значення швидкості випаровування.
2. Розрахувати швидкість осадження
3. Обчислити похибку експерименту.

Контрольні запитання

1. Приведіть схему вакуумної системи установки для нанесення плівок металів.
2. Пояснити принцип дії механічних вакуумних насосів.
3. Пояснити принцип дії турбомолекулярного насоса.
4. Перерахувати та описати методи іонно-плазмового розпилення нанесення металів і діелектриків.
5. Перерахувати магнетрони та типи магнетронних розпилювальних систем, що використовуються в мікроелектронних технологіях.
6. Зобразити конструкції МРС.

7. Яким чином можна керувати швидкістю розпилення речовини і швидкістю росту плівки?
8. Як працює термопарний манометр?
9. Як працює іонізаційний манометр?
10. Методи контролю товщини плівок у процесі нанесення та готових зразків.
11. Основні типи структури плівки, вплив технологічних умов на формування певної структури плівки.
12. При яких технологічних умовах формується кристалічна структура плівки?

Вимоги до звіту

Звіт повинен містити:

1. Мету роботи.
2. Короткі теоретичні відомості.
3. Порядок виконання роботи.
4. Експериментальні результати в табличному та графічному вигляді.
5. Висновки.

Рекомендована література

3. Курносков А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1979. – 367 с.
4. Технология СБИС / Под ред. Зи С. – М: Мир, 1986.– т.1.– 402 с.
5. А.И.Кузмичев,/Магнетронные распылительные системы

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

«Дослідження технологічного процесу створення електронно-діркового переходу в кремнії *p*-типу провідності»

Мета роботи: ознайомлення з процесом дифузії фосфору та дослідження технологічного процесу створення $n+ -p$ – переходу

Технічні вимоги і вимоги безпеки

Інструкції з охорони праці №№ 11, 14.

Короткі теоретичні відомості

У технології виготовлення інтегральних мікросхем (ІМ) процеси дифузії займають дуже важливе місце. Процеси дифузії використовують для створення базових та емітерних областей та резисторів у біполярній технології виготовлення напівпровідникових пристроїв, для створення областей витоку та стоку в метал-діелектрик-напівпровідник технологіях та для легування полікремнію.

Легуючі атоми в широкому діапазоні концентрацій можуть бути введені в кремнієві підкладинки шляхом:

- дифузії із хімічного джерела в пароподібній формі при високих температурах;
- дифузії із легованих окислів;
- дифузії із іонно-імплантованих шарів та відпалу.

Кінцева мета дослідження процесу дифузії – можливість розрахунковим шляхом визначити електричні характеристики напівпровідникового пристрою на основі технологічних параметрів процесу.

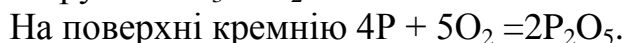
Фосфор використовується не тільки для формування емітерних та базових областей біполярних транзисторів, але й для гетерування

швидкодифундуючих домішок, таких як мідь та золото. Ці домішки висаджуються на дефектах кристалічної структури, приводять до збільшення струмів витоку зворотно зміщених $p-n$ - переходів. Тому фосфор неможливо замінити в технології ІМ. Однак, $p-n$ -транзистори з емітерами, отриманими дифузією миш'яку, мають більш високий коефіцієнт підсилення при низьких рівнях струму та кращу відтвореність ширини базової області порівняно з транзисторами, емітери яких були отримані дифузією фосфору. Тому в технології ІМ використання фосфору в якості активного легуючого елемента в мілких $p-n$ - переходах з малими лінійними розмірами в низькотемпературних процесах обмежено використанням його для легування базових областей $p-n-p$ – транзисторів та для формування гетерів. Для створення областей витоку та стоку n – каналних МДН –транзисторів переважно використовують миш'як.

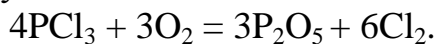
Характерний дифузійний профіль легування фосфором можна розділити на 3 області: область високої концентрації, що переходить в область названу “область перегину дифузійного профілю” та область низької концентрації.

Джерела дифузії фосфору: газоподібні дифузанти, котрі подають із балону та перед входом у реактор змішують з азотом та киснем. В зоні реакції формується оксид легуючого елемента, а на поверхні кремнієвих пластин виділяється елементарна домішка.

Наприклад, процес дифузії фосфору супроводжується реакціями:



Пари рідких дифузантив із дозатора розбавляють газом – носієм, а також формуються оксиди відповідних елементів, наприклад:



Тверді планарні джерела призначені для дифузії фосфору в кремнієві пластини. Ці джерела - термостійкі диски зі спеченим з обох сторін дифузантом на основі матеріалу, який містить фосфор. П'ятиокис фосфору виділяється твердим джерелом, дифундує до поверхні кремнію та вступає у взаємодію з нею з формуванням фосфорсилікатного скла. З цієї поверхні відбувається дифузія домішки у глибину пластини.

У порівнянні з методами із рідких та газоподібних джерел, використання твердих джерел має ряд переваг: підвищення в 3-5 рази однорідності та відновлюваності дози легування, покращення електричних параметрів елементів, зниження токсичності процесів та покращення екологічності показників, підвищення ефективності виробництва в 1,5 ÷ 2 рази, зручність застосування.

Параметри напівпровідникового приладу визначаються значенням поверхневої концентрації домішки, глибини $p-n$ - переходу та профілю розподілу домішки.

Глибина $p-n$ - переходу оцінюється методом шар-щліфа. Поверхнева концентрація вимірюється чотирьохзондовим методом на установці ІУС-3. Профіль розподілу домішки визначається методом диференційної провідності з підшаровим травленням, методом вольт-фарадних характеристик, методом опору розтікання та іншими .

Обладнання та матеріали

1. Піч дифузійна СДО-125/3-15.
2. Мікроскоп МБС-9.
3. Мікроінтерферометр МИИ-4.
4. Установка шар-шліф.
5. Шафа витяжна ЗШ-НЖ.
6. Установка вимірювання поверхневого опору ИУС-3.
7. Установка вимірювання фото-ЕДС.
8. Кремній діркового типу провідності марки 76 1 А КДБ 4,5/0,1 або 76 1 А КДБ 10/0,1.
9. Паста алмазна АМС.
10. Тверде джерело фосфору ТПДФ-1.
11. Розчин плавикової кислоти.
12. Касета кварцова.
13. Підставка кварцова.
14. Пінцети, напальчники гумові, бязеві тампони.

Порядок виконання роботи

1. Взяти пінцетом пластини кремнію із міжопераційної тари та розмістити на столику вимірювальної установки ИУС-3.
2. Опустити зондову голівку установки на дзеркальну поверхню пластини та зробити вимір опору поверхні ρ_s у п'яти точках. Визначити середнє значення ρ_s .
3. Повторити п.п. 2 для решти пластин.
4. Встановити по черзі пластини кремнію, спарені тильними сторонами, та пластини ТПДФ-1 в пази кварцової касети. Дзеркальні сторони пластини повернені до пластин ТПДФ-1.
5. Встановити касету з пластинами на носій та за допомогою кварцового крючка помістити пластину в робочу зону дифузійної печі, температура 1000 °С.
6. Витримати в робочій зоні: 1 партія – 15 хвилин, 2 – партія 30 хвилин. Дві партії одночасно поміщуються в температурну зону печі та виймаються через 15 хвилин.
7. Вийняти поступово впродовж 10 хвилин касету з робочої зони, охолодити на кінці труби (10 хвилин).
8. Встановити касету на підставку.
9. Перенести пінцетом пластини в міжопераційну тару.
10. Зробити вимір ρ_s на робочій поверхні пластини.
11. На одній пластині виготовити шар-шліф.
12. Виміряти на пластинах значення фото- ЕДС.

Вимоги до звіту

Звіт повинен містити:

1. Мету роботи.

2. Короткі теоретичні відомості.
3. Порядок проведення процесу дифузії фосфору в кремнію *p*-типу провідності, який проводився під час виконання лабораторної роботи. Режими процесу та результати вимірів.

Контрольні запитання

1. Особливості дифузії фосфору в кремній.
2. Механізми дифузії.
3. Профіль розподілу домішки, методи його вимірювання.
4. Джерела легуючих домішок.
5. Дефекти та контроль параметрів дифузійних шарів.
6. Послідовність технологічних переходів.
7. Залежність коефіцієнту дифузії фосфору в кремнії від температури.

Рекомендована література

1. Курносів А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1979. - 367 с.
2. Технология СБИС / Под ред. Зи С. - М: Мир, 1986.- т.1.– 402 с.

Автор висловлює подяку провідним інженерам Душейку М.Г. та Ясієвичу Ю.В., доценту Обуховій Т.Ю. за допомогу в підготовці матеріалів, а також асистенту Кутовій О.Ю. за редагування тексту.