

*При освоєнні діапазону суб- і наномікронних елементів інтегральних схем виникає ряд проблем, яких або взагалі не було при розробці технології виготовлення з мінімальними розмірами елементів більше 0,8 мкм, або вони не представлялись значними. Дана стаття розкриває саме перспективу та альтернативу використання субмікронної технології плазмохімічного травлення та впровадження її у виробництво*

*Ключові слова: плазмохімічне травлення, осадження, боро-фосфоро силікатне скло, фоторезист, реактор*

*При освоєнні діапазона суб- і наномікронних елементів інтегральних схем виникає ряд проблем, которых либо вообще не было при разработке технологии изготовления с минимальными размерами элементов больше 0,8 мкм, или они не представлялись значительными. Данная статья раскрывает именно перспективу и альтернативу использования субмикронной технологии плазмохимического травления и внедрения ее в производство*

*Ключевые слова: плазмохимическое травление, осаднение, боро-фосфоро силикатное стекло, фоторезист, реактор*

# ВПРОВАДЖЕННЯ ПЛАЗМОХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ В СУБМІКРОННУ ТЕХНОЛОГІЮ СТРУКТУР ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

**С. П. Новосядлий**  
Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: nsp@mail.pu.if.ua

**Л. В. Мельник**  
Аспірант\*

E-mail: lj-3d@rambler.ru

**С. В. Новосядлий\***

E-mail: nsp@mail.pu.if.ua

\*Кафедра комп'ютерної інженерії і електроніки  
\*\*\*Прикарпатський Національний університет ім. В. Стефаника

вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76025

## 1. Вступ

Сьогодні є вже певні труднощі при використанні для формування топології ІС/ВІС найбільш поширеного способу реактивного іонного травлення (РІТ) за такими причинами:

– висока енергія іонів (сотні еВ), що бомбують поверхню підкладки в процесі РІТ, та викликають вагомі радіаційні ушкодження;

– введення в плазму полімероутворюючих добавок для забезпечення високої анізотропії і селективності травлення є основним джерелом додаткового забруднення поверхні функціональних шарів в процесі їх травлення:

– РІТ – це більш фрезерний процес, що вимагає великих значень енергії іонів, які можуть наводити додаткові заряди на межі напівпровідник-діелектрик.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Перспективне для прецизійного травлення функціональних шарів структур ВІС/НВІС є метод НВЧ – плазмохімічного травлення, що дозволяє отримувати велику густину плазми  $(1-7) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  в порівнянні з  $(2-7) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  для ВЧ – розряду, вже при більш низьких енергіях іонів (10–20 еВ), менше майже на порядок [1].

Більш ефективна дисоціація молекул робочого газу у НВЧ – розряді дозволяє проводити процес травлення при більш низьких тисках (до  $(1-5) \cdot 10^{-2}$  Па), а значить суттєво збільшує довжину вільного пробігу хімічно активних частинок і отримувати достатньо високу анізотропію травлення без використання в ролі компонентів робочого газу полімероутворюючих добавок, що забруднюють процес травлення [2].

Для НВЧ – плазмохімічного травлення застосовується традиційна система НВЧ – розряду в умовах формування електронно-циклотронного резонансу (ЕЦР). В склад установки НВЧ ПХТ входить:

– вакуумна система, що дозволяє підтримувати робочий тиск в діапазоні  $6 \cdot 10^{-2} - 0,2$  Па і яка складається із турбомолекулярного насосу ТМН – 750 (із швидкістю відпалу до 1000 п/с) агрегату відкачки АВР–150 для попереднього відпалювання робочої напруги і турбомолекулярного насосу, високовакуумного кріосорбційного насосу ВАН – 160 (швидкість відкачки за повітрям до 150 п/с) заливного тиску [3]. У форвакуумній магістралі передбачена охолоджуюча азотна паста для виморожування газоподібних домішок [4];

– плазмотрон – конструкція якого представляє собою круглий хвилевід діаметром 150 мм із нерівномірної сталі, всередині якого знаходиться кварцевий реактор діаметром 110 мм. Підвід НВЧ – енергії від генератора до плазмотрона здійснюється вже за допо-

могою прямокутного хвилеводу з подвійним щільним мостом для збудження плазми та електромагнітних хвиль методом  $H_{10}$ , а в круглому – моди  $H_{11}$  [5];

- робоча камера, всередині якої знаходиться охолоджувальний підкладкотримач, ВЧ – склад для подачі напруги зміщення, електричний відвід для діагностики плазми технологічної САПР;

- система газонапускна для трьох різних технологічних газів, які використовуються в ПХТ;

- чотири незалежні секції електромагнітів, що дозволяють формувати плазму електронно-циклотронного резонансу, підвищуюче ступінь дисоціації реактивного газу [6].

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи являється дослідження технології плазмохімічного травлення.

Для дослідження мети були поставлені такі завдання:

- аналіз установки плазмохімічного травлення (рис. 1);
- дослідження технології на кремнії та арсеніді галію;
- визначення оптимальних технологічних режимів ПХТ.

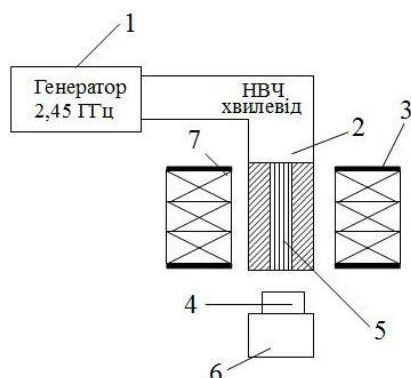


Рис. 1. Схема установки НВЧ ПХТ : 1 – НВЧ – генератор, 2 – хвилевід, 3 – електромагніт, 4 – підкладка, 5 – зона горіння плазми, 6 – підкладкотримач із зміщенням, 7 – реакційна камера

### 4. Аналіз та впровадження оптимальних технологічних режимів плазмохімічного травлення

Травлення монокристалічного кремнію чи арсеніду галію проводиться через маску, що виконана в двох варіантах:

- маска алюмінію товщиною 0,1 мкм;
- двошарова маска і селілірувальний електрорезист 7РП – 60 (товщиною 0,3 мкм) та плазмополірувальна органіка (товщиною 0,6 мкм) типу полііміду.

Для визначення оптимальних технологічних режимів ПХТ варіювались основні робочі параметри процесу – склад та тиск робочого газу, напруга зміщення та підкладкотримач, відстань підкладкотримача до джерела плазми; в ролі вихідних параметрів ПХТ визначали швидкість травлення моно-Si та GaAs і

профіль електронної мікроскопії. Потужність НВЧ – розряду у всіх експериментах складала 300–400 Вт.

На рис. 2, 3 приведені залежності швидкості травлення моно-Si в потоці  $SF_6 / CCl_4$  від складу суміші і напруги постійного зміщення на підкладкотримач. Високі результати (оптимальні) були досягнуті при модельованні процесу при низьких (відносно) швидкості травлення ( $\approx 0,3 \pm 0,4$  нм/с). При використанні в ролі робочого газу суміші фреону-14  $CF_4 / CCl_4$  (0–15%) у всіх експериментах спостерігалось високоанізотропне ( $>0,95$ ) травлення кремнію із дещо нижчими швидкостями (0,25–0,35 нм/с). Швидкість травлення регулюється вибором фреону [7].

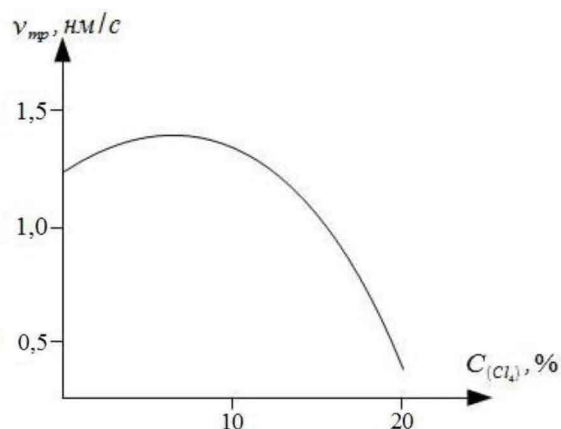


Рис. 2. Залежність швидкості травлення моно-Si плазми  $SF_6 / CCl_4$  від відсотку  $CCl_4$  при  $U_{зм}=0$

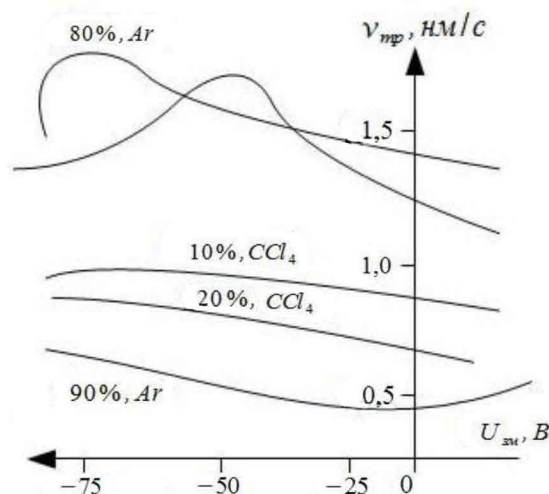


Рис. 3. Залежність швидкості травлення моно-Si плазми  $SF_6 / CCl_4$  від постійного зміщення при  $P_5F_6 + CCl_4 = 0,66$  Па,  $P_3F_6 + CCl_4 = 0,2$  Па

Практичний інтерес представляє використання в ролі робочого газу елегазу  $SF_6 / Ar$ , що не дозволяє утворюватись в процесі травлення полімерного осадку на бокових стінках структур ВІС як на Si так і на GaAs.

Залежності швидкості травлення моно-Si від вмісту гексафториду сірки (елегазу) в суміші  $SF_6 / Ar$ , напруги постійного зміщення на підкладкотримачі і величині робочого тиску подані на рис. 3, 4. Для змен-

шення робочого тиску суміші SF<sub>6</sub>/Ar в умовах постійного парціального тиску SF<sub>6</sub> спостерігаються спочатку зменшення швидкості травлення Si, а потім знову збільшеного до початкового значення (рис. 4).

Очевидно, з графіків моделювання ПХТ видно, що першочергове зменшення швидкості травлення зв'язане із зменшенням густини іонного струму на підкладку і, як наслідок, із зменшенням іонної активації її поверхні відносно малої енергії іонів. Вияснення механізму збільшення швидкості травлення при подальшому зміщенні робочого тиску вимагає приведення більш детальних досліджень фізики процесів за допомогою спеціальних тестових структур технологічної САПР[8].

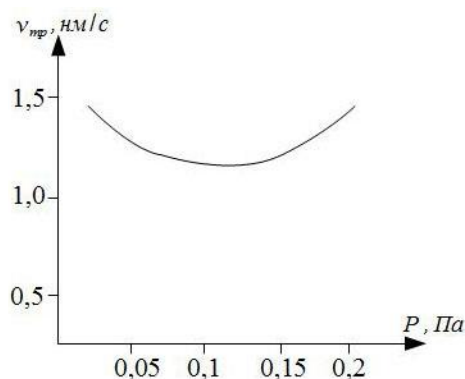


Рис. 4. Залежність швидкості травлення моно-Si плазми SF<sub>6</sub>/Ar від робочого тиску P<sub>SF<sub>6</sub></sub>=0,03 Па, U<sub>зм</sub>=-50 В

Тут також необхідно підкреслити, що анізотропія травлення як моно-Si, так і GaAs в чистому SF<sub>6</sub> при тиску 3·10<sup>-2</sup> Па є набагато гіршою, ніж при травленні суміші SF<sub>6</sub>/Ar (P=0,2 Па) при тому ж парціальному тиску SF<sub>6</sub>. Це дозволяє зробити висновок, що на анізотропію травлення в чистому SF<sub>6</sub> впливають хімічно активні частинки, які розсіяні поверхнею моно-Si. Оптимальні умови процесу анізотропного травлення (рис. 5, а) при високій швидкості травлення кремнію (>1,3 нм/с); об'ємна концентрація SF<sub>6</sub> в Ar – 15 %; робочий тиск – 0,2 Па, напруга постійного зміщення – 50 В, маска – із алюмінію. Різке зміщення анізотропії, що спостерігається в цьому ж режимі при використанні вже двошарової маски (сендвіча), що подано на рис. 5, б, пояснюється, очевидно, ефектом зарядження конденсатора із маски. Тут необхідно відмітити, що селективність травлення Si/SiO<sub>2</sub> в такому режимі висока і складала >12–14 [9].

Навіть при нормальному падінні на поверхню Si, що є характерно для низьких робочих тисків, хімічно активні частинки мають більшу імовірність відбиття на бічну стінку профілю і прореагувати з нею. Іонне бомбування поверхні Si дозволяє різко збільшити імовірність взаємодії хімічно активної частинки (ХАЧ) з дном канавки, в результаті чого потік ХАЧ, розсіяних на бічні стінки, зменшуються, а анізотропія збільшується. Цей процес з успіхом може бути використаний для формування канавок, за допомогою яких можна формувати діелектричну ізоляцію елементів.

На практиці експериментальних робіт спостерігалось різке зменшення анізотропії травлення моно-Si

через алюмінієву маску, якого замість постійної напруги U<sub>зм</sub>=-50 В на підкладкотримач подавалась змінна напруга частотою 330 КГц та амплітудою ±50 або ±100 В (рис. 5, а).

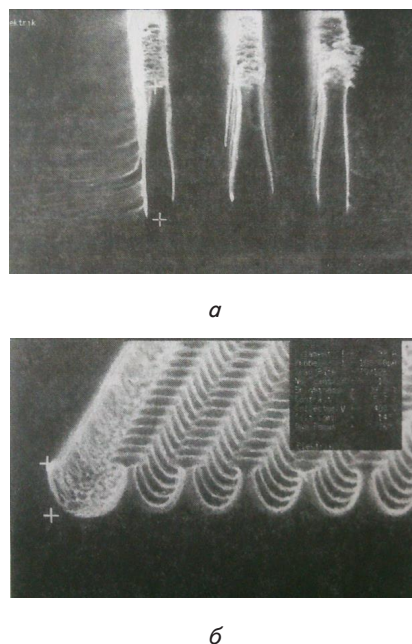


Рис. 5. Профілі НВЧ ПХТ моно-Si : а – через маску Al; б – двошарову маску, в плазмі SF<sub>6</sub>(15 % +Ar) при тиску P<sub>Σ</sub>=0,2 Па і U<sub>зм</sub>=-50 В на установці GIR-520

При використанні на постійного, в ВЧ – зміщення на підкладкотримач частина періоду (позитивна амплітуда) підкладки Si чи GaAs не піддається бомбуванню позитивно зарядженими іонами. Якщо цей період часу є більшим, ніж середній час ХАЧ в абсорбованому стані, то тоді різко зростає розсіювання ХАЧ на бокових стінках і анізотропія плазмохімічного травлення зменшується до величини 0,75–0,85 [10].

## 5. Висновки

1. Проведені експериментальні дослідження ПХТ на установці GIR-520 з використанням електронно-циклотронного резонансу на частоті 2,45 ГГц дозволили розробити високоанізотропний процес НВЧ ПХТ кремнію та GaAs через металеву алюмінієву маску з використанням газової суміші SF<sub>6</sub>+CCl<sub>4</sub>, що не містить полімероутворюючих добавок і які не вносять додаткових зображень на поверхні підкладки.

2. Такий технологічний процес може бути використаний для глибокого травлення моно-Si та GaAs, а також для формування топології елементів в шарах полі-Si і нітридів кремнію, алюмінію, бору (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, AlN, BN).

3. Низькі значення енергії іонів (10–20 eV) дозволяють мінімізувати радіаційні пошкодження в структурах ВІС/НВІС.

4. Якщо поміняти реактивний газ на моносилан, дисилан, то даний НВЧ – реактор перетвориться в реактор осадження функціональних шарів.

## Література

1. Новосядлий, С. П. Суб–наномікрона технологія структур ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий. – Івано–Франківськ: Місто НВ, 2010 – 456 с.
2. Новосядлий, С. П. Фізико–технологічні основи субмікронної технології ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий. – Івано–Франківськ: Сімік, 2003. – С. 52–54.
3. Симонов, В. В. Оборудование ионной имплантации [Текст] / В. В. Симонов, Л. В. Корнилов. – М.: Радио и связь, 1988. – 354 с.
4. Риссел, Х. Ионная имплантация [Текст] / Х. Риссел, И. Руге. – М.: Наука, 1983. – 360 с.
5. Болтакс, Б. И. Глубокие центры в GaAs, связание с собственными структурными дефектами [Текст] / Б. И. Болтакс, М. Н. Колотов, Е. А. Скоретина. – Известия вузов. Физика, 1983. – 10 с.
6. Афанасев, В. А. Оборудование для импульсной термообработки полупроводниковых материалов [Текст] / В. А. Афанасев, М. П. Духвський, Г. А. Красов. – Электроника СВЧ, 1984. – С. 56–58.
7. Окамото, Т. Устройства ионной имплантации [Текст] / Т. Окамото. – Саймицу кикай, 1985. – С. 1322–1325.
8. Черилов, А. В. Исследование электрофизических характеристик ионно–легированных слоев GaAs [Текст] / А. В. Черилов. – Электронная техника, 1984. – С. 8–12.
9. Ди Лоренцо, А. В. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления [Текст] / А. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Канделуола; пер с англ. под ред. Г. В. Петрова. – М.: Радио и связь, 1988 – 489 с.
10. Ватанаба, Н. Проектирование СВИС [Текст] / Н. Ватанаба, К. Асада, К. Кани, Т. Оцуки; пер с англ.; под ред. Л. В. Поспелова. – М.: Мир, 1988 – 304 с.

*Зроблено аналіз розподілу густини струму в електродах електрохірургічних інструментів при зварюванні біологічних м'яких тканин. Для цього розроблено алгоритм розв'язання та розв'язана еліптична задача, що моделює скін-ефект в провідниках компактного перерізу. Проведена верифікація математичної моделі розподілу густини струму в монополярному електроді шляхом порівняння з експериментальними даними при хірургічній операції приварювання сітківки ока до його судинної оболонки*

*Ключові слова: зварювання біологічних м'яких тканин, електрохірургічні інструменти, електроди, високочастотний струм, скін-ефект*

*Сделан анализ распределения плотности тока в электродах электрохирургических инструментов при сварке мягких биологических тканей. Для этого разработан алгоритм решения и решена эллиптическая задача, моделирующая скин-эффект в проводниках компактного сечения. Проведена верификация математической модели распределения плотности тока в монополярном электроде путем сравнения с экспериментальными данными при хирургической операции приваривания сетчатки глаза к его сосудистой оболочке*

*Ключевые слова: сварка мягких биологических тканей, электрохирургические инструменты, электроды, высокочастотный ток, скин-эффект*

УДК 615.47:621.791

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43372

## РОЗПОДІЛ СТРУМУ В ЕЛЕКТРОДАХ ЕЛЕКТРОХІРУРГІЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН

**В. М. Сидорець**

Доктор технічних наук, професор  
провідний науковий співробітник\*

E-mail: sydorvn@gmail.com

**А. Г. Дубко**

Кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник\*

E-mail: andredu@yandex.ru

\*Інститут електрозварювання

ім. Є. О. Патона НАН України

вул. Боженко, 11, м. Київ, Україна, 03680

### 1. Вступ

Високочастотний струм в сучасній електрохірургії застосовують в багатьох галузях загальної хірургії, кардіології, офтальмології, урології, отоларингології, гінекології, онкології і т. д. [1, 2]. З 1994 року в Інсти-

туті електрозварювання ім. Є. О. Патона в співпраці хірургами ведуться роботи по створенню нових технологій та обладнання для високочастотного зварювання живих м'яких тканин [3].

Протікання через провідник змінного струму супроводжується скін-ефектом, який полягає в неоднорідному