

УДК 621.3.049.772

**ФОРМУВАННЯ НАНОРОЗМІРІВ СТРУКТУР  
МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ<sup>2</sup>***Кисіль О.С.*

Мікромініатюризація, високий ступінь інтеграції, зростання кількості і зменшення розмірів окремих елементів електронних пристроїв вимагає вдосконалення технології виробництва. Найважливішими операціями при виготовленні інтегральних схем є процеси формування мікро- і нанорозмірних шарів та гетерокомпозицій. Для створення нанорозмірних тонкоплівкових пристроїв використовуються лише йонно-плазмові методи обробки, в тому числі і травлення.

Оскільки розрахунки параметрів процесу травлення досить громіздкі, то доцільно на основі узагальнених законів йонної обробки розробити оригінальну комп'ютерну програму, яка дасть можливість швидко та достовірно визначати оптимальні параметри процесу травлення для широковживаних матеріалів мікроелектроніки та їх композицій.

**Теоретичні викладки**

Фізичне розпилення матеріалів кількісно характеризують коефіцієнтом розпилення, який визначають як середню кількість атомів, видалених з поверхні матеріалу однією падаючою частинкою (атомарні і молекулярні йони, нейтральні атоми, нейтрони, електрони та фотони з високою енергією). Згідно з визначенням коефіцієнт розпилення, атом/йон,

$$S = \frac{N_a}{N_{\text{й}}} = k \frac{m_{\text{й}} m_a}{\lambda_{\text{й}} (m_{\text{й}} + m_a)} E_{\text{й}}, \text{ де } N_a \text{ — кількість вибитих (розпилених) ато-$$

мів матеріалу;  $N_{\text{й}}$  — кількість йонів, бомбардуючих матеріал;  $k$  — коефіцієнт, який характеризує фізичний стан мішені і визначають експериментально;  $\lambda_{\text{й}}$  — довжина вільного пробігу йону;  $m_{\text{й}}$ ,  $m_a$  — маси бомбардуючого йону та атому мішені;  $E_{\text{й}}$  — енергія йонів (від  $1,6 \cdot 10^{-17}$  до  $4,8 \cdot 10^{-16}$  Дж).

Йонне травлення матеріалу починається тоді, коли енергія йонів  $E_{\text{й}}$  перевищує значення порогової енергії розпилення  $E_{\text{пор}}$ . Значення  $E_{\text{пор}}$  слабо залежать від мас частинок, що взаємодіють, і лежать в діапазоні  $1,6 \cdot 10^{-18}$  —  $4,8 \cdot 10^{-18}$  Дж. При  $E_{\text{й}} < E_{\text{пор}}$  йони не проводять розпилення матеріалу, і при взаємодії з атомно-чистою поверхнею відбувається їх віддзеркалення, адсорбція з подальшою десорбцією і нейтралізація, що здійснюють електронами, емітованими з матеріалу під дією електричного поля йонів. При йонному бомбардуванні поверхневі шари монокристалів спочатку перетворюються в полікристалічні, а згодом і в аморфні.

Згідно з теорією фізичного розпилення аморфних і полікристалічних

<sup>2</sup> Робота виконана під науковим керівництвом к.т.н., доц. Прищепи М.М.

матеріалів, при йонному бомбардуванні по нормалі до поверхні, в області енергій  $E_{\text{суб}} \ll E_{\text{й}} < E_{\text{й}}^*$ , де  $E_{\text{й}}^* = \frac{515a^2 Z_{\text{й}} Z_{\text{а}} (m_{\text{й}} + m_{\text{а}})}{m_{\text{а}}}$  (енергія – в Дж), коефі-

цієнт розпилення матеріалів  $S$  прямо пропорційно залежить від енергії  $S(E_{\text{й}}) \approx \frac{3\beta m_{\text{й}} m_{\text{а}} E_{\text{й}}}{\pi^2 (m_{\text{й}} + m_{\text{а}})^2 \cdot 2E_{\text{суб}}}$  де  $a$  — характерний радіус екрануючої елект-

ронної хмари за моделлю Томаса-Фермі:  $a = 0,8853a_0 (Z_{\text{й}}^{2/3} + Z_{\text{а}}^{2/3})^{-1/2}$  ( $a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$  м — радіус атома водню по Бору);  $Z_{\text{й}}$ ,  $Z_{\text{а}}$ ,  $m_{\text{й}}$ ,  $m_{\text{а}}$  — відповідно атомні номери і маси бомбардуючого йону та матеріалу мішені;  $\beta$  — безрозмірний параметр, що залежить від  $m_{\text{а}}/m_{\text{й}}$ ;  $E_{\text{суб}}$  — енергія сублимації атома матеріалу мішені. В області енергій  $E_{\text{й}} > E_{\text{й}}^*$  ріст коефіцієнту розпилення уповільнюється, і його визначають за виразом

$$S(E_{\text{й}}) = \frac{4,2 \cdot 10^{18} \beta [\Sigma_{\text{я}}(E_{\text{й}})]}{2E_{\text{суб}}}$$

Величина  $\Sigma_{\text{я}}(E_{\text{й}})$  - переріз ядерного гальмування йонів:

$$\Sigma_{\text{я}}(E_{\text{й}}) = \frac{Z_{\text{й}} Z_{\text{а}} q^2 a m_{\text{й}}}{(m_{\text{й}} + m_{\text{а}})} \sigma_{\text{я}}(E_{\text{й}}^{\text{пр}}), \quad E_{\text{й}}^{\text{пр}} = \frac{4\pi\epsilon_0 m_{\text{а}} a E_{\text{й}}}{(m_{\text{й}} + m_{\text{а}}) Z_{\text{й}} Z_{\text{а}} q^2},$$

де  $E_{\text{й}}^{\text{пр}}$  — приведена енергія йонів;  $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – енергія електрона;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — діелектрична проникність вакууму;  $\sigma_{\text{я}}(E_{\text{й}}^{\text{пр}})$  — приведений переріз ядерного гальмування йонів з середньою масою, значення якого залежно від  $E_{\text{й}}^{\text{пр}}$ .

Крім енергії йонів коефіцієнт розпилення матеріалів залежить від таких характеристик як:  $m_{\text{й}}$  — маса бомбардуючих йонів. Коефіцієнт розпилення збільшується з ростом  $m_{\text{й}}$  і атомного номеру йона  $Z_{\text{й}}$  в області енергій використовуваних для йонного травлення;  $Z_{\text{а}}$  — атомний номер матеріалу, що розпилюють (коефіцієнт розпилення зростає по мірі заповнення електронних  $d$ -оболонки);  $\alpha$  — кут падіння йонів на поверхню матеріалу. Зі зростанням  $\alpha$  від 0 (відлік ведеться від нормалі до поверхні) до 60—70° спостерігають збільшення коефіцієнту розпилення матеріалів. В першому наближенні залежність коефіцієнту розпилення від  $\alpha$  у цій області можна оцінити як  $S(\alpha) = \frac{S(0)}{\cos(\alpha)}$  де  $S(0)$  — коефіцієнт розпилення при нормальному

падінні йонів.  $S(0)$  прямо пропорційний енергії, що розсіюється в поверхневому шарі матеріалу, в межах якого пружні зіткнення з атомами призводять до розпилення. При куті падіння  $\alpha$  довжина пробігу йонів, а отже, і кількість зіткнень в цьому шарі будуть в  $1/\cos(\alpha)$  раз більше.

Для кількісної характеристики процесу йонного травлення матеріалів зручно користуватись поняттям швидкості травлення  $v_{\text{тр}}$ , яку визначають

по товщині поверхневого шару матеріалу, що видаляють за одиницю часу. Згідно з [1] швидкість йонного травлення матеріалу, м/с, при падінні йонів по нормалі до поверхні, визначають як  $v_{\text{тр}} = \frac{j_{\text{й}} S A_{\text{м}}}{N_{\text{А}} \rho \cdot q}$ ,

де  $j_{\text{й}}$  — густина йонного струму, А/м<sup>2</sup>;  $S$  — коефіцієнт розпилення матеріалу, атом/йон;  $A_{\text{м}}$  — атомна маса матеріалу, який розпилюють, кг/моль;  $N_{\text{А}}$  — число Авогадро, атом/моль;  $\rho$  — густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>. Якщо,  $\alpha$  — кут падіння йонів на поверхню зразків, то  $v_{\text{тр}}(\alpha) = \frac{S(\alpha) A_{\text{м}}}{N_{\text{А}} \rho \cdot q} j_{\text{й}}$ .

В мікроелектроніці важливу роль відіграє селективність травлення. Це дає змогу визначити які композиції матеріалів будуть ефективнішими. Селективність травлення одного матеріалу відносно другого  $g(1/2)$  визначають співвідношенням  $g(1/2) = \frac{v_{\text{тр}1}}{v_{\text{тр}2}}$  де  $v_{\text{тр}1}$  і  $v_{\text{тр}2}$  — швидкості травлення

першого і другого матеріалів за однакових умов.

Топографія отриманого профілю при йонному травленні робочого матеріалу (підложки) через захисну маску обумовлюється залежністю швидкості травлення від кута падіння йонів  $v_{\text{тр}}(\alpha)$ , переосадженням матеріалу, який розпилюють, і віддзеркаленням йонів при великих кутах падіння. Вважають, що йонне травлення точно відтворює на підложці будь-який малюнок захисної маски. Проте це справедливо лише до певного моменту травлення (рис.1).

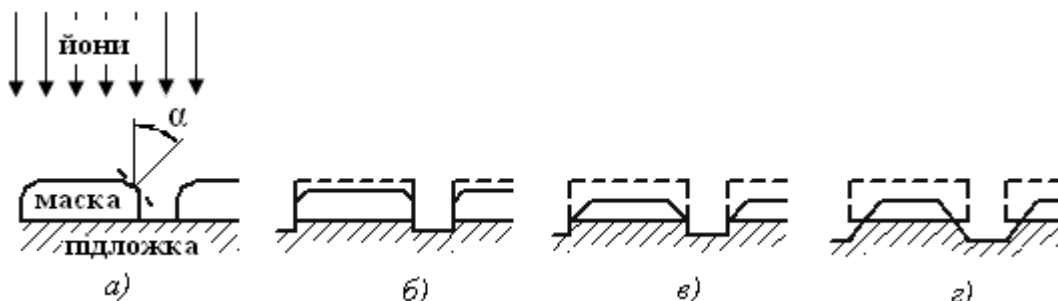


Рис.1. Стадії йонного травлення підложки через захисну маску без урахування ефектів віддзеркалення йонів і переосадження:

- а) – профіль маски і підложки до початку травлення; б) – початок утворення граней на масці; в) – грані маски досягли поверхневої площини підложки; г) – зміна форми і розмірів профілю, який витравлюють в підложці.

Навіть при вертикальних бічних стінках профілю маски її верхні кути мають деяке заокруглення через умови експонування і проявлення (рис.1,а). Тому йони бомбардують такі ділянки під кутом  $\alpha > 0$ , що приводить до збільшеної швидкості травлення і утворення граней на бічних стінках маски (рис.1,б). Ці грані утворюють з напрямом йонного пучка кут  $\alpha_{\text{макс}}$ , що відповідає максимальній швидкості йонного травлення матеріалу маски. Утворені грані травляться швидше, ніж поверхні перпендикулярні

до напрямку йонного пучка, що призводить до розвинення їх на всю бічну поверхню маски і до перетину з площиною підложки (рис.1, в). Подальше травлення цих граней веде до оголення маскованих ділянок підложки і зміни бічних розмірів та форми отриманого профілю (рис.1, з).

Віддзеркалення йонів від бічних стінок маски або створеного раніше рельєфу при куті падіння  $\alpha > \alpha_{\text{макс}}$  посилює травлення поверхні підложки біля основи маски або межі рельєфу, а отже, змінюється профіль травлення.

### Результати реалізації

Майже завжди, завдання підвищення швидкості травлення вирішують за допомогою зміни робочих режимів джерела йонів. Визначальними параметрами є щільність йонного струму на поверхні матеріалу мішені ( $j_{\text{й}}$ ) та енергія йонів ( $E_{\text{й}}$ ). Моделювання процесу травлення за допомогою розробленої програми дає можливість швидко визначити необхідний (оптимальний) режим травлення. На рис.2 представлені результати зміни швидкості травлення силіцієвої мішені за допомогою йонізованого газу аргону. З графіку видно, що швидкість травлення лінійно зростає при підвищенні рівня щільності йонного струму на поверхні мішені, при цьому збільшення швидкості травлення більш стрімке у випадку вищої енергії йонів. Також підвищення швидкості йонного травлення досягається завдяки зміни кута падіння йонів на поверхню зразків ( $\alpha$ ). Промодельовані характеристики цієї залежності, для різних рівнів енергії йонів, відображені на рис.3.

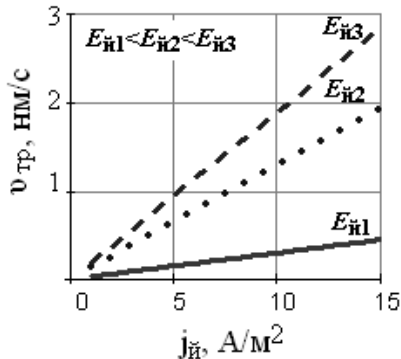


Рис.2.

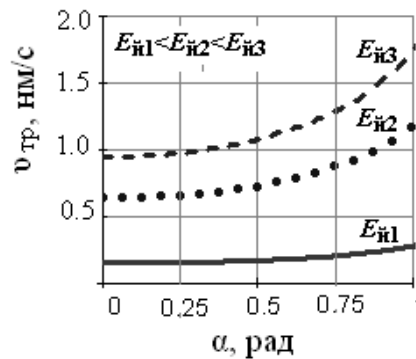


Рис.3.

Важливо враховувати, що розрахунок доцільно проводити для значень  $\alpha$ , які не перевищують  $50-60^\circ$  ( $0,87-1,05$  рад), оскільки подальше збільшення кута веде до посилення травлення поверхні підложки біля основи маски, а отже, і до зміни профілю маски. Виникаючий в результаті «перетрав» підложки, біля основи маски, може призвести до пошкодження нижче розташованих шарів. За допомогою програми було проведено моделювання процесу йонного травлення для деяких широкоживаних матеріалів мікроелектроніки, в результаті чого, було отримано номінальні значення коефіцієнтів розпилення матеріалів та швидкостей травлення. Результати

приведені в таблиці. В порівнянні з експериментальними даними наведеними в [2], похибка проведених розрахунків становить не більше 8%.

Таблиця

| Матеріал | $S$ , атом/йон | $v_{тр}$ , нм/с |
|----------|----------------|-----------------|
| Si       | 1.271          | 1.191           |
| Cu       | 2.312          | 1.28            |
| Ag       | 3.402          | 2.719           |
| Au       | 3.301          | 2.616           |
| Al       | 1.714          | 1.323           |
| Ti       | 1.567          | 1.293           |
| Ta       | 1.411          | 1.195           |

### Висновки

З допомогою програми можна визначати швидкість травлення та селективність, їх залежність від кута падіння йонів та ін. Також є можливість перевірки процесу травлення матеріалу з будь-яким видом йонізованого газу (плазми). При

цьому вхідними даними є лише дані таблиці Менделєєва Д.І., початкова енергія йонів, значення щільності йонного струму на поверхні матеріалу мішені та деякі довідникові значення, що характеризують матеріал мішені і плазми.

### Література

1. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. – М.: Энергоатомиздат. – 1987.-264 с.
2. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Ионное травление микроструктур. – М.: Сов. радио. – 1979. – 104 с.
3. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. М.:Мир.1985. 496с.

*Кисиль О.С. Формування нанорозмірів структур мікроелектроніки. Проведено фізичний аналіз йонного травлення поверхні широкоживаних матеріалів мікроелектроніки; наведені результати моделювання розробленою програмою.*

**Ключові слова:** йонне травлення, швидкість травлення.

*Кисиль О.С. Формирование наноразмеров структур микроэлектроники. Проведен физический анализ ионного травления поверхности часто используемых материалов микроэлектроники, а также результаты моделирования разработанной программой.*

**Ключевые слова:** ионное травление, скорость травления.

*Kysil O.S. Formation of nano-sizes in microelectronics. The physical analysis of ion etching of surfaces which are often used in microelectronics is carried out; the article contains results of modeling using developed program.*

**Keywords:** ion etching, etching speed.