

Р.Б. Атаманюк, С.П. Новосядлий

## Висококонтрастне проявлення та фізико-технологічні аспекти формування субмікронної топології великих інтегральних схем

*Прикарпатський Національний університет імені Василя Стефаника  
дом. тел. 55-10-94 моб. тел. 8-067-342-08-23 E-mail: [roman.atamanyuk@mail.ru](mailto:roman.atamanyuk@mail.ru)*

Висока швидкодія великих інтегральних схем забезпечується не тільки мінімізацією площі топології, але і питомим опором та профілюванням контактних вікон. Для розв'язання цієї задачі в проєкційній літографії використовують як висококонтрастний фоторезист так і висококонтрастне проявлення.

При переході в субмікронний діапазон топологічних розмірів структур ВІС виникає гостра необхідність в зменшенні площі розводки і її питомого опору для збереження високої швидкодії ВІС. Існуюча полікремнієва розводка цим умовам не задовольняє. Тому в даній статті висвітлені дослідження при формуванні силіцидних плівок різними методами, зокрема в реакторах атмосферного та зниженого тиску типу «ізотрон» розкладом моносилану та магнетронним розпиленням титанової мішені в плазмі суміші аргону та моносилану (дисилану). Такі дослідження необхідні не тільки з точки зору отримання мінімального питомого опору та дефектності, але і отримання високонадійних омичних контактів до n+- та р+- областей. Визначені умови імплантаційного оксидування силіциду титану для формування вертикальної міжелементної ізоляції.

**Ключові слова:** хімічне травлення, тверді розчини, кадмій телурид, травник, швидкість розчинення, хіміко-динамічне полірування.

*Стаття поступила до редакції 07.07.2005; прийнята до друку 15.11.2005*

### I. Висококонтрастне проявлення субмікронної топології ВІС

#### 1. Фізико-хімічні властивості позитивного однокомпонентного фоторезиста та фізика процесу його проявлення.

Збільшення ступеня осушування фоторезисту на лінії "Лада 125" і установках інфрачервоної обробки за рахунок збільшення температури осушування в атмосфері азоту (замість повітря) дозволяє збільшити стійкість плівки фоторезисту в проявнику у 5-10 разів. При такому технологічному запасі стійкості до проявлення є можливість зменшити кількість світлочутливого продукту в позитивних резистах типу ФП-383М, ФП-051МК. Це відповідно збільшує світлочутливість порогової дози експонування як мінімум в 1,3-1,5 разів, що є дуже важливим для забезпечення якості і продуктивності установок проєкційного друку типу EM584A.

При дослідженні позитивного фоторезисту ФП-051МК було встановлено, що велика кількість світлочутливого продукту в фоторезисті погіршує його термостійкість та підвищує його критичність до нестабільності температури його осушування [1].

Практично всі існуючі позитивні фоторезисти розроблені без використання контрастного

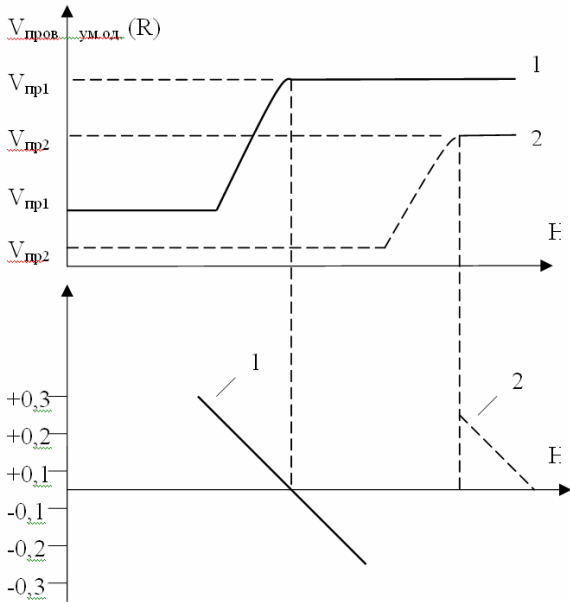
проявлення, що дуже сильно знижує роздільну здатність і світлочутливість в наслідок підвищеної концентрації інгібітора розчинення неопроміненого фоторезиста (смоли НХД – нафтохінондіазида) в сухому залишку. Крім того підвищений вміст НХД у резисті призводить до зниження його термостійкості. У всіх фоторезистах для покращення плівкоутворення уведено розчинники з високою температурою кипіння (142-160°C).

При низькій температурі осушування (меншій за 110°C) вони не можуть бути в повній мірі вилучені із об'єму плівки фоторезиста і спричиняють гідрофобність як по об'єму плівки, так і на міжфазній межі фоторезист-функціональний шар Si пластин із структурами. На границі розділу іде дифузія проявника, що призводить до додаткового розкиду розмірів на операціях хімічного та плазмохімічного травлення. Наявність залишків розчинника в плівці фоторезиста призводить до його недостатньої полімеризації при задубленні. Це відповідно зумовлює його підвищену термопластичність, низьку плазмотійкість, понижено роздільну здатність.

В основу одержання такого фоторезиста покладені вимоги, які забезпечують високий коефіцієнт контрастності проявлення внаслідок повного видалення розчинника із плівки фоторезиста при його осушуванні, і використання спеціального

високотемпературного проявника з низькою концентрацією проявного реагента (в 2-2,5 рази меншою). Це забезпечує мінімально можливу швидкість руйнування в проявнику неопроміненого фоторезиста при його високій швидкості проявлення 0,05-0,1 мкм/с. Такий проявник забезпечує самозупинення процесу проявлення на межі опроміненого і не опроміненого фоторезиста, що, в свою чергу, забезпечує незмінність розміру елемента топології при його перепроявленні. Проявник з низькою концентрацією лугу (КОН) вже слабо дифундує по границі розділу фоторезист – функціональний шар і тим самим забезпечується висока відтворюваність розмірів топологічного елемента.

Крім того, фоторезист після його експонування в ультрафіолетових променях на довжині хвилі  $\lambda = 300-400$  нм повинен також проявлятися у плазмовому проявнику.



**Рис. 1.** Залежність швидкості проявлення (а) і відхилення розмірів (б) для позитивного фоторезиста типу ФП-383Н при низько – і високо контрастному проявленні. а) залежність швидкості проявлення від дози експонування для мало контрастного (1) і високо контрастного (2) проявників. б) залежність відхилення розміру від дози експонування для мало контрастного (1) і високо контрастного (2) проявників.

На рис. 1 зображені типові залежності швидкості проявлення і відхилення розміру темного елемента фотокопії від часу експонування для неконтрастного (0,5% концентрації в деіонізованій воді) і висококонтрастного проявника (криві 1 і 2). Із даного рисунка видно, що розкид розмірів для неконтрастного проявника дуже сильно залежить від дози експонування. Мінімальне відхилення розміру елемента забезпечується практично при дозі

експонування меншій за порогову, а це веде до появи непроявлених елементів. Відтворення субмікронних розмірів вимагає повного експонування, при чому пере експонування не повинно змінювати клинопроявлення (розмірів відхилення). Висококонтрастне проявлення зменшує клин проявлення у 2-2,5 рази.

Саме при переході до субмікронної літографії ВІС для зменшення відходу розмірів особлива увага зосереджується на підвищенні контрастності фоторезистів. При експонуванні ультрафіолетовими променями з довжиною хвилі  $\lambda = 250-500$  нм засвічені області позитивних резистів проявляються із швидкістю  $V_{пр} = R$  на порядок більшою, ніж швидкість незасвічених областей  $R_0$  [3]. Тому профіль резиста формується як дозою експонування  $H$ , так і швидкістю його проявлення  $R$  інакше співвідношенням  $\frac{R}{R_0}$ .

Енергія поглинання його резистом визначає швидкість його розчинення в залежності від глибини проникнення ультрафіолетових променів:

$$\frac{dR}{dZ} = \frac{dR}{dH} \cdot \frac{dH}{dZ} \quad (1)$$

де  $\frac{dR}{dH}$  – це множник, який визначає розчинність

фоторезиста при його проявленні, а  $\frac{dH}{dZ}$  – визначає швидкість поглинання ультрафіолетових променів на товщині резиста.

Швидкість розчинення фоторезиста в залежності від його фізико-хімічних параметрів і числової апертури установок проекційного друку визначається співвідношенням:

$$\frac{dR}{dZ} = \frac{N_A}{\gamma(\beta + \alpha)H_0} \left[ (1 - \kappa) \frac{\Delta x (N_A)^2}{\lambda} \right]^2 \quad (2)$$

де  $H$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  – товщина, поглинання і контрастність плівки резиста;  $N_A$  – числова апертура,  $\Delta x$  – відхилення (клин) топологічного розміру;  $\kappa, \beta$  – сталі величини, а саме  $\kappa$  – фактор фоторозчинності шару резиста в проявнику при оптимальній експозиції  $H_{опт}$ , а  $\beta$  – градієнт зміни сенситограми (освітлення над темними елементами);  $H_0$  – доза експонування, що забезпечує повне проявлення резиста.

Із виразу (2) видно, що мінімальне відхилення (клин) топологічного розміру  $\Delta x$  досягається при максимальній контрастності фоторезиста  $\gamma$ , а також використанням далекого ультрафіолетового опромінення і його порогової дози  $H_0$ .

Теоретично було встановлено [4], що ширина основи проявленого елемента  $\Delta x$  і відповідно роздільна здатність резиста пов'язані між собою через його коефіцієнт контрастності  $\gamma$ . Останній визначається із сенситометричної характеристики, яка будується в лінійних координатах швидкості проявлення  $V(R)$  – доза експозиції  $H$ . Насправді залежність  $V(H)$  має експоненційний вигляд і перетворюється в лінійну залежність лише в

напівлогарифмічних координатах.

В [5] визначений зв'язок нахилу стінки проявленого елемента в резисті з його коефіцієнтом контрастності  $\gamma$ , який визначений із залежності відносної зміни товщини шару  $h$  як логарифма дози експонування  $H$ . Вимірний таким чином безрозмірний коефіцієнт  $\gamma$  залежить від товщини  $h_1$  і зменшується при його збільшенні. Тому доцільно виразити коефіцієнт  $\gamma$  через такий коефіцієнт для непоглинаючого шару  $\gamma_0$ , його товщину  $h$  та коефіцієнт поглинання  $\alpha$ , вважаючи останній сталою величиною.

## 2. Висококонтрастне проявлення позитивного фоторезиста.

Завданням даної роботи є побудова профілю елемента, що формується в резисті для будь-якої його товщини  $h$  з використанням сенситограм. Розв'язок такої задачі можливий при сумісному аналізі розподілу освітленості в площині зображення між центрами світлого і темного полів і залежності зміни товщини шару резиста після його проявлення від дози експонування.

При цьому коефіцієнт контрастності  $\gamma$ , що характеризує нахил сенситограми в певному часі (10-100с) проявлення залишається практично постійним і можна вважати що  $\gamma = \text{const}$ . Ширина відтворюваного в резисті елемента буде рівна шуканому значенню тільки при оптимальному  $H_{\text{опт}}$  значенні експозиції, яке відповідає експозиції на краю елемента.

Розподіл інтенсивності  $I(x)$  не може бути визначений експериментально із-за фізичних обмежень мінімальної площі детектора випромінювання установки експонування типу EM-584A чи EM5026A. Він може бути розрахований на основі дифракційної теорії оптичної модуляції. Залежність  $I(x)$  для світлого чи темного елементів топології ВІС шириною менше за 0,8 мкм подана на рис. 3. Такий розрахунок був виконаний для умов реального

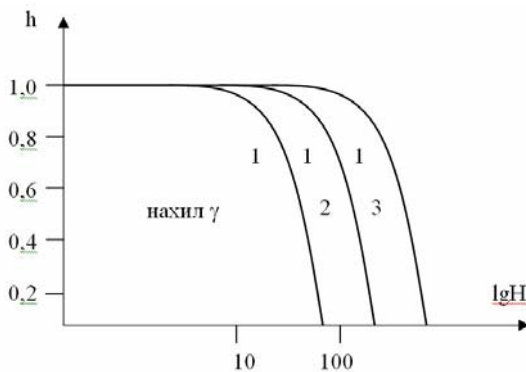


Рис. 2. Сенситограма позитивного фоторезиста для різних значень часу проявлення  $\tau$ . ( $\tau_1 > \tau_2 > \tau_3$ ).

експонування при  $\lambda = 436$  нм,  $\lambda = 404$  нм;  $N_A = 0,28$  і  $0,36$ ;  $\sigma = 0,7$ ;  $M = 10:1$ ;  $t = 0$  і  $1$  - глибина різкості [6].

Як видно із рисунка 3, в напівлогарифмічних координатах отримані залежності  $\lg I(x)$  вже будуть характеризуватися лінійністю при  $I < I_\Gamma$ , де  $I_\Gamma$  – інтенсивність на геометричній межі світлого і темного полів, які відрізняються між собою нахилом  $\beta$ , тобто градієнтом при зміні освітленості під темними елементами. Значення  $\beta$  залежить для конкретного розміру елемента  $l$  від  $N_A$ ,  $\lambda$ ,  $\sigma$  і  $t$ . Зменшення нахилу  $\beta$  супроводжується зниженням  $I_{\text{max}}$  в центрі світлого поля і збільшенням  $I$  під темним полем на одній і тій же відстані полів (світлого і темного). При даній степені когерентності всі залежності перетинаються з лінією геометричної межі освітленості в точці яка прийнята за одиницю, що відповідає значенню  $\sigma = 0,7$ .

Значення  $\beta$  є константою для конкретної дози експонування. При точному фокусуванні

$$\frac{\beta}{l} = 0,8 \text{ мкм} = 3/4,5 \text{ мкм}^{-1} \text{ для проекційних установок}$$

з  $\lambda = 436$  нм;  $N_A = 0,28$  та  $\lambda = 404$  нм;  $N_A = 0,36$ . В умовах розфокусування, яке має місце практично,

$$\text{коефіцієнт } \beta \text{ зменшується і при } t = \pm \frac{\lambda}{2N_A^2} \text{ глибині}$$

різкості, складає вже 1,5 і 1,77 мкм<sup>-1</sup> відповідно.

Графічна побудова профілю елемента в резисті для конкретних характеристик освітленості ультрафіолетових випромінювачів у вигляді ламп ДРТ-250, чи ДРТ-500 і сенситограми при умові  $H_{\text{опт}}$  дорівнює експозиції на геометричній межі світлого і темного полів відтворюваного елемента топології подана на рисунку 4. Тому ми можемо прийняти наступні співвідношення:

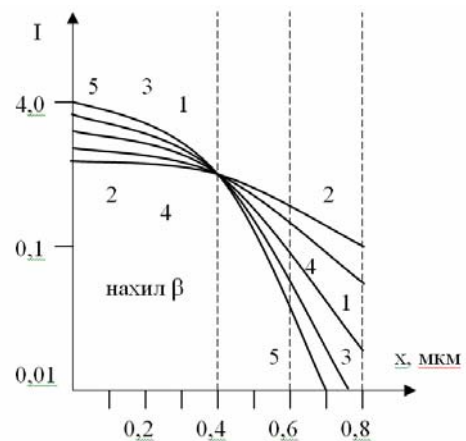
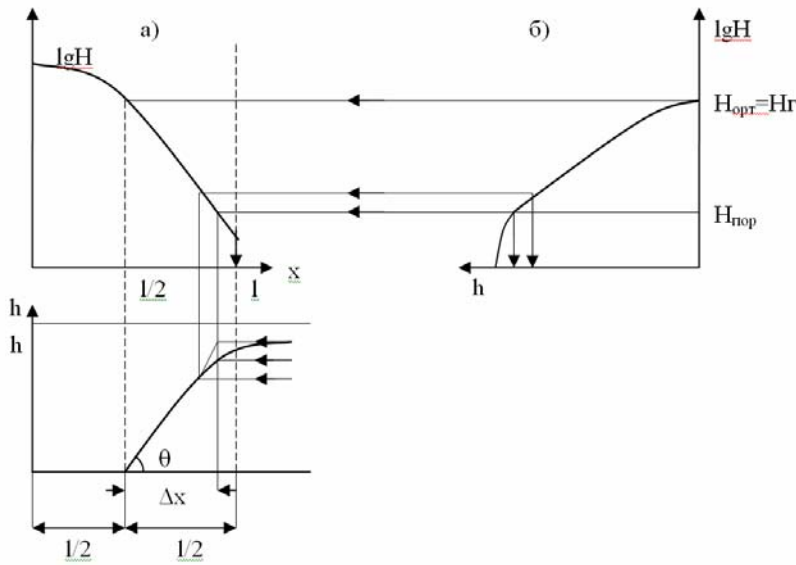


Рис. 3. Розподіл освітленості на поверхні Si-пластину з позитивним резистом для елемента  $l < 0,8$  мкм для довжини ультрафіолетового променя  $\lambda = 436$  нм;  $N_A = 0,28$ ;  $t = 1$  (1);  $t(0)$ (3);  $\lambda = 436$  нм,  $N_A = 0,36$ ,  $t = -1$  (2);  $t(0)$ (4);  $\lambda = 404$  нм;  $N_A = 0,36$ ,  $t = 0$ (5).



**Рис. 4.** Профіль топологічного елемента в резистивній масці із позитивного фоторезиста для конкретної характеристики освітленості (а) та сенситограми резиста (б).

$$H = H_{\text{опт}} = \frac{1}{3} I_{\text{паод}} \tau_{\text{екс}} \quad (3)$$

$$\frac{h_{\text{зал}}}{\Delta x} = \text{tg} \theta = \gamma \cdot \beta \quad (6)$$

Із даного рисунка видно, як формується вихід топологічного розміру  $\Delta x$ , який називають відхиленням або клином проявлення. Знаючи  $\beta$  і значення порогової експозиції із співвідношення  $\lg H_{\text{пор}} - \lg H_{\Gamma} = -\beta \Delta x$ , отримаємо значення клина проявлення  $\Delta x$ :

$$\Delta x = \frac{\lg H_{\text{пор}} - \lg H_{\Gamma}}{\beta} \quad (4)$$

Із сенситограми випливає, що  $\lg H_{\text{пор}} - \lg H_{\Gamma} = \frac{h_{\text{зал}}}{\gamma}$ , де  $\gamma$  – безрозмірна величина, якщо  $h$  взята за 1 і вимірюється в мкм, якщо  $h$  вимірюється в мкм;  $h_{\text{зал}} = h_{\text{вих}} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right)$ , де  $\kappa$ -фактор фоторозчинності шару резиста в провіднику при оптимальній експозиції. Тоді з виразу (4) отримуємо:

$$\Delta x = \frac{h_{\text{вих}} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right)}{\gamma \beta} \quad (5)$$

Із даної формули легко визначити відхилення (клин)  $\Delta x$  для різних значень  $\gamma$  і  $\beta$ , або визначити  $\gamma$  – контраст, при якому практично буде збережена повна товщина резистивної маски після проявлення для конкретного  $\beta$ . Так  $\Delta x = \frac{1 \cdot 0,99}{2 \cdot 1,5} = 0,33$  мкм для резиста товщиною  $h_{\text{вих}} = 1$  мкм, при  $\kappa = 100$  і  $\gamma = 2$  мкм для  $\beta = 1,5$  мкм<sup>-1</sup>

Саме відношення  $\frac{h_{\text{зал}}}{\Delta x}$  характеризує нахил стінки проявленого елемента як це видно із рис. 4 і визначається:

де  $\gamma$  – виражене в мікронах.

Таким чином, форма реального профілю є дещо іншою, бо тут не враховане відбиття від Si – підкладки, та інтерференція на бокових стінках резиста. Але це можна мінімізувати термообробкою резиста після експонування.

Із останнього виразу (6) видно, що добуток  $\gamma \cdot \beta$  фактично через кут  $\theta$  визначає ширину основи клину проявлення, нахил стінки профілю та результуючу товщину резиста після експонування і проявлення. **Висновки.** Мінімальний клин досягається висококонтрастною літографією, яка може зменшити крок металізації до 1,5 мкм і менше. Тобто, за допомогою висококонтрастної літографії можна проводити мінімізацію площі розводки структур ВІС.

В цій роботі високий контраст літографії забезпечується як складом резиста, так і складом проявника. Склад резиста визначається типом смоли, вмістом нафтохінондіазида, типом розчинника, а також технологічними параметрами: температурою та часом осушування після його нанесення і експонування, складом високо контрастного проявника: 3,5 мл 47% розчину КОН, 70 мл 20% KCL, 30 мл ізопропілового спирту та 896,5 мл деіонізованої води. Високий контраст резиста більше 3,0 забезпечується вмістом нафтохілондіазиду (НХД) на рівні 15-25% в дикрезолфенолформальдегідній смолі. Як розчинник використовується діоксан, за допомогою якого досягається необхідна в'язкість 17,2-23,6 ст. На основі даних досліджень був розроблений висококонтрастний фоторезист для проєкційного друку ФП383НІ з високою роздільною здатністю (0,25 нмк).

## II. Фізико-технологічні аспекти формування силіцидної розводки субмікронних структур великих інтегральних схем

Проблема формування високонадійних контактів та міжз'єднань великих інтегральних схем (ВІС) є одним із важливих аспектів субмікронної технології. Зменшення лінійних розмірів топології елементів структур ВІС супроводжується зменшенням як площі поперечного перерізу провідників комутаційних шин, так і збільшення густини струму через них. Це відповідно спричинює певні труднощі у виборі як матеріалів для міжз'єднань, так і технології їх формування [7,8,9].

Основним матеріалом для металізації верхнього рівня розводки у структурах ВІС є алюміній і його сплави, які мають низький питомий опір (більше за 2,7 мкОм/см). Проте можливості використання алюмінію і його сплавів (з Si, Hg, Cu) у ВІС є обмеженими внаслідок значної взаємодії алюмінію з Si у приконтактних областях, високої електроміграції і корозії [2]. У метал-оксид-напівпровідникових (МОН) ВІС для нижнього рівня розводки і затворного електрода використовують легований полікремній, який має майже на 2 порядки більший опір (більше за > 450 МкОм/см). Використання легованого полікремнію обмежується не тільки збільшенням опору, але і ростом зернистості та дефектності таких плівок при термовідпалах, що знижує стабільність затворної системи і контрастність топологічного краю структур.

Вольфрам-молібденові з'єднання мають майже двічі більший опір (більше за 6,5 мкОм/см), але на 3 порядки вищу електроміграційну стійкість, ніж алюміній і його сплави. Це дає можливість формувати контакти розміром менші ніж 1 мкм<sup>2</sup> і кроком меншим за 1,5 мкм. Проте ці тугоплавкі метали є недостатньо стійкими до окислюючих термообробок і хімічних реагентів, які використовує кремнієва технологія.

Зазначених недоліків нема у силіцидів тугоплавких металів [7,10]. Вони мають не тільки низький питомий опір (1,75 мкОм/см), але і забезпечують високу адгезію до SiO<sub>2</sub> та стабільність міжфазної границі Si-SiO<sub>2</sub>, високу теплостійкість (більшу за 500°C), стабільність окисованої їх поверхні та низьку дефектність. На цей час для формування нижнього рівня розводки структур ВІС широко використовуються дисиліциди Ti, Ta, W, Mo, які можуть формуватися різними методами: термічним відпалом, співвипаровуванням інгредієнтів, хімічним осадженням із газової фази та магнетронним розпиленням мішені.

Із усіх дисиліцидів тугоплавких металів дисиліцид титану має найменший опір (13-25 мкОм/см). На даний час найкраще вивчено кінетику утворення TiSi<sub>2</sub>, одержаного термічним відпалом системи плівка титану + моно (полі) Si. Методами Оже-спектроскопії та дифракції

рентгенівського випромінювання і мас-спектроскопії вторинних іонів встановлено, що утворення фази силіциду титану TiSi на полікремнії починається з температур 550-600°C, а при 750-850°C формується вже фаза TiSi<sub>2</sub>, причому дифундуючими вже є атоми кремнію [10,11].

На кінетику утворення дисиліциду титану і його властивості сильно впливають домішки, які локалізуються як в плівці титану, так і в шарах моно (полі) кремнію, особливо кисень. Порогова температура реакції в такій системі вища від 650°C, коли металева плівка на поверхні містить більше 3% кисню O<sub>2</sub>. При зменшенні вмісту цієї домішки менше вказаної величини температура формування дисиліциду титану знижується до 550-580°C на полі – Si і до 590-650°C на моно – Si. В [10] описані дослідження дисиліцидних плівок титану, сформованих в реакторах зниженого тиску типу «Ізотрон», з використанням реакцій отримання аморфного кремнію в пульсуючому режимі для іонного перемішування дисилану або силану і тетрахлориду титану, яка дозволила сформувати дисиліцид титану з питомим опором меншим за 10 мкОМ/см.

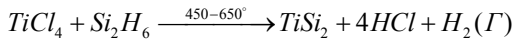
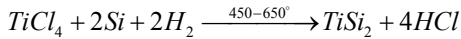
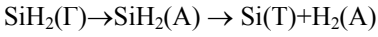
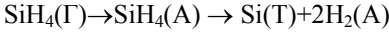
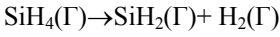
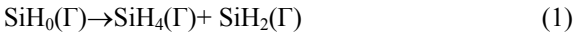
### Газофазне осадження силіцидних плівок в реакторах атмосферного і зниженого тиску.

Отримання силіцидних плівок проводилося в потоці аргону при атмосферному і зниженому тиску. При атмосферному тиску використовувалися реактори 3 типів (рис. 1, а-в): вертикальні реактори установок нанесення епітаксійних шарів з ВЧ – нагрівом графітової піраміди-підкладкотримача із загальним і роздільним вводом реагентів, а також горизонтальний реактор із кварцового скла ущільнений полікремнієм [7], установок типу «Ізотрон» із зустрічними потоками реагентів. В якості підкладок використовувалися Si – пластини діаметром 100 мм, причому в горизонтальних реакторах вони встановлювалися вертикально і паралельно осі реактора в спеціальні кремнієві касети. У вертикальних реакторах графітові підкладкотримачі попередньо карбідизувалися в потоці моносилану (дисилану) до утворення на графітовій поверхні плівки SiC товщиною 0,5-0,8 мкм. Синтез силіцидних плівок при пониженому тиску проводили також в горизонтальному кварцовому реакторі, ущільненому полікремнієм на установках типу «Ізотрон-3» або «Ізотрон-4». Кремнієві пластини діаметром 100 мм встановлювалися вертикально, перпендикулярно до осі реактора і газового потоку. Для процесу використовувалася суміш моносилану (дисилану) з аргоном (5-20%).

В горизонтальних реакторах довжина зони контролюючого нагріву складала 65 см, а точність задання температури складала ± 0,5°C. Похибка контролю температури в реакторах вертикального типу була меншою за модулем ніж 3°C. Товщина плівок фіксувалася мікро-інтерферометром Лінніка МІІІ-Н. Густина дефектів на плівках вимірювалася електрографічним методом при напрузі U = 50 В та

за допомогою оптичної мікроскопії при збільшенні у 500 разів. Механічні напруження визначалися методом прогину Si пластин. Температура в реакторах складала 550-650°C для обох типів. Тиск в реакторах зниженого тиску підтримувався на рівні 30-90 Па.

Механізм росту силіцидних плівок відбувався за наступними гомогенними і гетерогенними реакціями:



де  $\Gamma$  – газ,  $\text{T}$  – тверда фаза,  $\text{A}$  – адсорбований газ,  $\text{Si}(\text{T})$  – в залежності від температури може бути аморфним або полікристалічним. Дисиліцид титану формувалася швидким фотонним відпалом на установках типу «Імпульс-3» або «Орбіта-18» з використанням галогенних ламп. Тривалість такої обробки визначалася з урахуванням умов фазових, структурних і електрофізичних перетворень у сформованих таким чином силіцидних структурах. Реактори горизонтального типу мають перевагу перед вертикальними за продуктивністю завантаження Si-підкладками. Недоліком обох реакторів стає різке зменшення однорідності плівок при переході на діаметри Si-пластин більших за 150 мм. В таких реакторах досягнутий питомий опір  $\text{TiSi}_2$  складає 10-12 мкОм·см. Тому для великих діаметрів Si-пластин проводився пошук нового високопродуктивного методу формування Si-плівок з індивідуальною обробкою кожної пластини. Газофазне осадження дисиліцидних плівок показало можливість їх формування на основі аморфного кремнію вже при температурах менших за 590°C.

Розроблено технологічний процес формування силіцидних плівок магнетронного розпилення титанової мішені чистотою 99,96% в плазмі суміші моносилану в аргоні (5-20%). Залежність швидкості

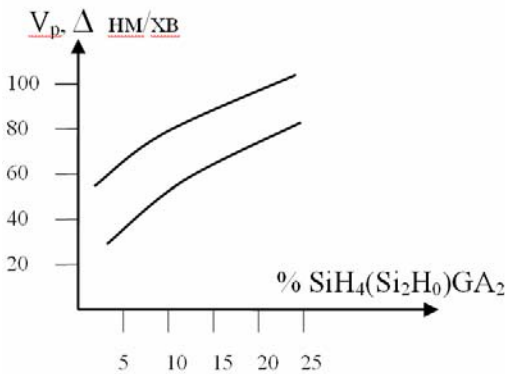


Рис. 5. Залежність швидкості осадження силіцидної плівки від концентрації моносилану (дисилану) в аргоні.

осадження силіцидної плівки від концентрації моносилану та дисилану подана на рис. 5.

Процес магнетронного розпилення виконувався на установці «Ораторія-5». Із наведених графіків видно, що швидкість осадження дисиліцидної плівки  $\text{TiSi}_2$  є максимальною для дисилану (20%), а мінімальна дефектність їх також зменшується із збільшенням концентрації моносилану. Це зв'язано з тим, що збільшення моносилану в аргонній плазмі прискорює процес його дисоціації на  $\text{Si}$  та  $\text{H}_2$ . Останній виконує гетероформуєчу роль по відношенню до кисню і вуглецю. В результаті цього густини дефектів зменшується на 1-2 порядки. При використанні установок магнетронного типу неперервної дії «Ораторія-11» можна забезпечити формування дисиліцидних плівок з високою однорідністю (меншою 1%) по пластині на великих діаметрах (більших за 150 мм).

Імпульсна термообробка таких двокомпонентних систем титан-кремній при температурі  $T = 693-1093^\circ\text{C}$  протягом 0,5-4 секунд забезпечує формування дисиліциду титану  $\text{TiSi}_2$  з рекордно низьким поверхневим опором 0,80-0,9 мкОм/см та питомим опором 8,5-9,5 мкм·см. Як показали дослідження цих плівок Оже-спектроскопією та мас-спектроскопією, такий низький опір досягається майже повним генеруванням кисню і вуглецю із титанової мішені воднем. Магнетронний іонно-плазмовий процес забезпечує також високоефективне перемішування іонів  $\text{Ti}$  та  $\text{Si}$  ще в самій плазмі, чого досягти в газофазних процесах є неможливим.

Відповідно імпульсна термообробка по формуванню фази дисиліциду титану завершується досить швидко вже за перші дві секунди. Утворення фази  $\text{TiSi}_2$  підтвердилося появою на рентгенограмах піків дисиліциду титану та Оже-профілями (рис. 7).

Як видно із поданих Оже-профілів, дифузійне перемішування іонів титану і кремнію завершується за 1 с термообробки вже при температурах 400-450°C. Тому доцільно такі галогенні нагрівники установити на позицію після магнетронного осадження плівки  $\text{TiSi}$  і на виході вже отримуємо

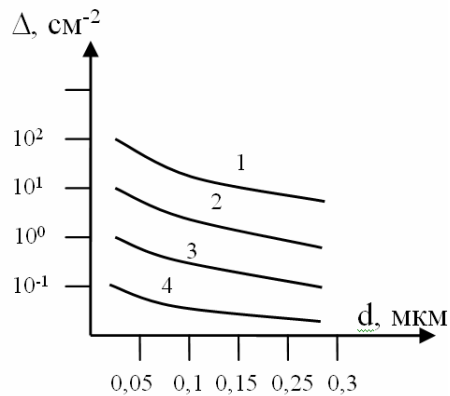


Рис. 6. Залежність дефектності дисиліцидних плівок від їх товщини для різних концентрацій моносилану в аргоні (1 – 5%, 2 – 10%, 3 – 15%, 4 – 20%).

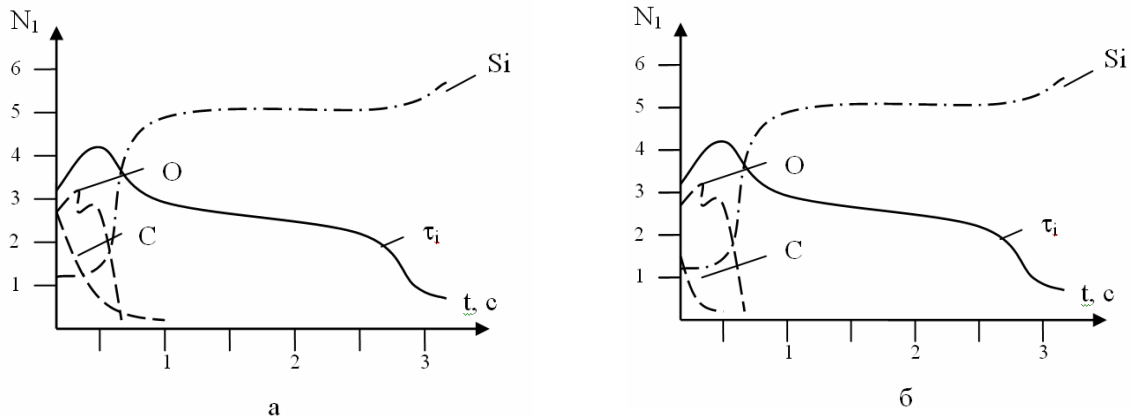


Рис. 7. Оже-профілі розподілу Si, Ti, O, C в структурі TiSi<sub>2</sub> осадженої магнетронним розпиленням титанової мішені в плазмі аргону – моносплав: а) при T = 693°K; б) при T = 793°K.

структури з чітко сформованою фазою TiSi<sub>2</sub>.

**Багатозарядна імплантація домішок і контактний опір силіцидної розводки.**

Впродовж останніх років дослідження і модернізація процесів іонного легування розширили свої межі і на область високих енергій 0,15-1 меВ. Виготовлення структур ВІС високої степені інтеграції вимагає як розроблення нових процесів, так і нових джерел іонного легування, а саме:

- легування малими дозами іонів B<sup>+</sup>, P<sup>+</sup> з енергіями 150-300 кеВ для запобігання явищу змикання короткоканальних МОН-транзисторів, так звана глибока підгонка порогових напруг при реалізації Н-МОН і К-МОН технологій;
- легування малими дозами іонів B<sup>+</sup> з енергією 200-300 кеВ для формування ретроградної мішені і охоронних областей локального оксиду з метою усунення явища «пташиного дзьобу»;
- легування великими дозами іонів B<sup>+</sup> і P<sup>+</sup> через оксид з енергіями 150-300 кеВ для формування сток-витоків областей МОН-транзисторів;
- легування великими дозами для формування захovanого шару, бази, глибокого колектора і

емітера;

– високоенергетичної імплантації кисню для створення ізоконцентраційної домішки при прискореному оксидуванні полі – Si і внутрішнього гетера в Si-пластинах зонної плавки.

Однак існуюче обладнання іонної імплантації може забезпечити максимальну енергію іонів лише до 250 кеВ. Тому використання багатозарядних іонів бору і фосфору забезпечує реалізацію таких процесів на існуючому обладнанні іонної імплантації.

В даній роботі досліджується процес перерозподілу домішок B, P в підкладці при термообробці структур TiSi<sub>2</sub> - n<sup>+</sup> - p<sup>+</sup>-кремній. Для цього домішкові шари кремнію формували різними дозами більшими за 5·10<sup>16</sup>см<sup>-2</sup>, після чого на поверхню підкладки наносився шар титану товщиною 500 ангстрем і проводився двостадійний відпал структур в атмосфері аргону. Для вимірювання контактного опору системи TiSi<sub>2</sub>-Si виготовлялися спеціальні тестові структури Ван-дер-Пау. Після формування дисиліциду підкладки піддавалися високотемпературному відпалу при температурі T = 600-1100°С в атмосфері азоту і

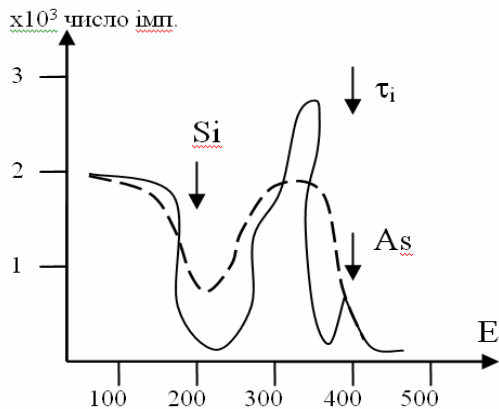


Рис. 8. Спектри оберненого розсіювання 1,5меВ іонів He для структури TiSi<sub>2</sub> - n<sup>+</sup> -Si, легованих As<sup>++</sup> при фотонній термообробці при температурі T = 400°С (1 с) – крива 1, та при фотонній термообробці при T = 650°С (5 с).

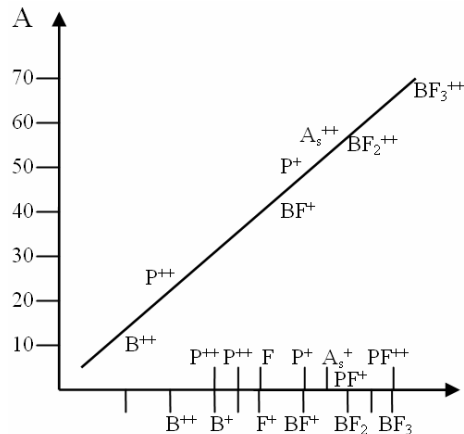


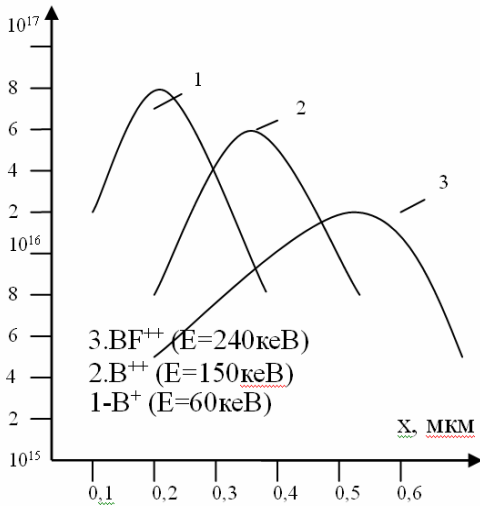
Рис. 9. Спектр іонів за масою при використанні червоного фосфору, BF<sub>3</sub>, PF<sub>5</sub> (AsF<sub>5</sub>).

аргону протягом 10-12 хв. Далі дисиліцид  $TiSi_2$  видалявся і визначався концентраційний профіль розподілу методом опору розтікання.

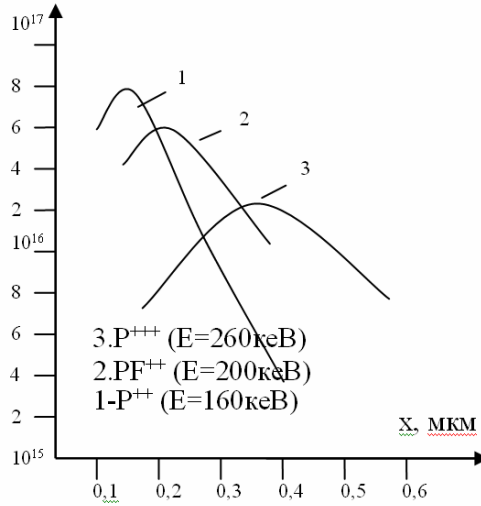
Як впливає із отриманих даних перехідний контактний опір тестових структур не змінювався аж до температури  $850^\circ C$ , а при більш високих температурах спостерігалось суттєве збільшення опору як до  $n^+$ , так і до  $p^+$ -областей  $Si$ . Для усунення явища сегрегації домішок  $B$ ,  $P$  в дисиліциді титану проводилась високоенергетична багатозарядна імплантація миш'яку  $As^{++}$  та  $BF_3^{++}$  ізотоп 10,  $E =$

Це підтвердилось спектрами оберненого резерфордівського розсіювання  $1,5\text{ meV}$  іонів гелію ( $He^{+4}$ ) для структури півки  $TiSi_2 - n^+ - Si$ , легованих  $As^{++}$  (рис. 8). Тобто імпульсна фотонна термообробка не змінює концентраційного профілю миш'яку ( $As^{++}$ ) в  $n^+$ -областях  $Si$ .

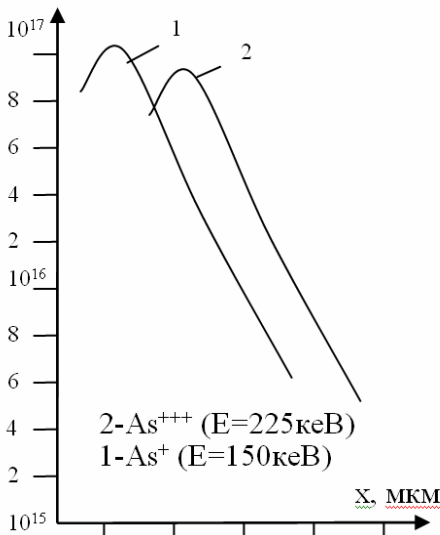
Використання двозарядних іонів миш'яку  $As^{++}$  та бору  $BF_3^{++}$  ізотоп 10 для формування  $n^+$  і  $p^+$ -областей кремнію дозволяє виключити температурну їх сегрегацію в дисиліцидну розводку і забезпечує її температурну стабільність в контактних з'єднаннях.



а)



б)



в)

Рис. 10. Концентраційні профілі багатозарядних іонів бору (а), фосфору (б) і миш'яку (в) для дози  $D = 20\text{ мкАм/см}^2$ .

$250\text{ кеВ}$ ,  $D = 50\text{ мкА/см}^2$  взамін однозарядних бору та фосфору. Так як іонні радіуси  $As^{++}$  та  $BF_3^{++}$  є більшими, ніж  $B^+$  і  $P^+$ , то і їхні коефіцієнти дифузії є меншими майже на порядок. Це звичайно виключає перерозподіл цих домішок в контактні дисиліциду титану. Крім того, максимум концентраційного профілю для багатозарядних іонів миш'яку  $As^{++}$  та бору  $BF_3^{++}$  ізотоп 10 зміщується на глибину  $0,1\text{ мкм}$ , що також позитивно впливає на температурну стабільність контактів до  $n^+$  і  $p^+$ -областей кремнію.

**Особливості імплантаційного оксидування силіцидів перерозподілу домішок в них.**

Проведені дослідження показали, що кінетика процесу окислення дисиліциду титану аналогічна до процесу окислення кремнію і підпорядкована лінійно-параболічному закону:

$$\frac{1}{B}x^2 + \frac{A}{B}x = t + \tau, \text{ або} \\ x^2 + Ax = B(t + \tau) \tag{2}$$



де  $B$  – параболічна константа швидкості росту оксиду,  $x$  – товщина нарощеного оксиду;  $B/A$  – лінійна константа,  $t$  – час оксидування,  $\tau$  – поправка на чистоту поверхні (для силіциду  $TiSi_2$  константа  $B$  більша в 2-2,5 рази ніж ця сама константа для  $SiO_2$ ).

В даній роботі проведений також комплекс досліджень на вивчення впливу високоенергетичної багатозарядної імплантації кисню ( $O^{++}$ ) в дисиліцид титану та її активації з метою створення якісної діелектричної ізоляції. Для субмікронної технології використання високотемпературного оксидування є недоцільним, бо воно викликає велику деградацію створених р- n-переходів. Саме високоенергетична багатозарядна імплантація відкриває нові можливості субмікронної технології у формуванні як мілких, так і глибоких р- n-переходів, а також при створенні локальної ізоляції та внутрішніх гетерних шарів на основі оксинітриду кремнію. Це зумовлено тим, що швидкість імплантованого оксидування майже в 2,5-3 рази вища дифузійного, бо в окисному процесі приймають участь як іони кисню, так і атоми  $Ti$ ,  $Ta$ ,  $Si$ .

Досліджувалися можливості високоенергетичної багатозарядної імплантації іонів фосфору, бору, миш'яку, кисню, азоту на установках «Лада-30» та «Везувій-8».

Відомо, що іонний пучок, який витягнутий із джерела іонів, являє собою суміш із різної відносної кількості молекул та ізоотопів легуючого матеріалу.

Наприклад, газ  $BF_3$  розпадається на  $BF_3$  ізоотоп  $^{10}B^+$ ,  $^{11}B^+$ . В пучку є присутні також деяка кількість іонів, які утворюються від іонізації залишкових газів.  $BF_3^{3+}$  ізоотоп  $^{10}$  ми вже використовували для формування мілких  $P^+$ - областей.

Відхилення заряджених частинок в магнітному аналізаторі здійснюється за наступною залежністю:

$$R = \frac{143,95}{H} \sqrt{\frac{MU}{n}} \quad (3)$$

$R$  – траєкторія іона в сантиметрах,  $H$  – напруженість магнітного поля,  $U$  – витягуюча пучок напруга, у вольтах,  $B$ ,  $M$  – маса іонів у відповідних одиницях,  $n$  – заряд іона.

Для контролю якості сепарації та ідентифікації іонів знімалися мас-спектри для необхідних легуючих домішок. Двозарядні іони з'являються в положенні, яке відповідає половині їх маси, а молекули – при подвоєній масі відповідного іона.

Для отримання іонів фосфору та миш'яку використовувалися легуючі речовини: червоний фосфор і газоподібні п'ятифтористі фосфор та миш'як ( $PF_5$ ,  $AsF_5$ ). Спектри для  $BF_3$ ,  $PF_5$ ,  $AsF_5$  і червоного фосфору подані на рисунку 6. Порівняння спектрів показало що використання в ролі легуючого елемента твердого червоного фосфору дозволяє отримувати більш чистий спектр, бо в пучку є присутні тільки односторонні іони  $P^+$  або  $P^{++}$  в залежності від ступеня його іонізації.

При використанні в ролі легуючого газу  $PF_5$  ( $AsF_5$ ) в спектрі є вже присутня велика кількість домішок, крім фосфору (миш'яку) і фтору та їх

сполук, які необхідно в сепараторі ідентифікувати як за масою, так і за зарядом.

Після імплантації та імпульсного відпалу вимірювалися профілі розподілу імплантованої домішки за допомогою імпульсних СВ-характеристик обернено зміщеного переходу Шоттки. В ролі вихідних  $Si$  – пластин використовувалися пластини КЕФ4,5 (100) та КДБ80 (100). Для отримання багатозарядних іонів використовують наступні співвідношення:

– енергія імплантованих багатозарядних іонів  $E = (U_{\text{вит}} + U_{\text{приск}})$ , де  $U_{\text{вит}}$  – витягуюча і прискорююча напруга,  $n$  – кратність заряду іона;

– доза імплантованої багатозарядної домішки дорівнює  $D_n = D \cdot n$ , де  $D$  – дози однозарядних, а  $n$  – кратність заряду;

– струм мас – сепаратора при легуванні багатозарядними іонами обчислюється за формулою  $I_n = I/V_n$ , де  $I$  – струм сепаратора з однозарядними іонами,  $n$  – кратність заряду.

Імплантація кремнію здійснювалася багатозарядними іонами бору, фосфору та миш'яку з енергією 60-250 кеВ і дозою  $10^{16}$ - $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Струм іонного пучка багатозарядних іонів складає:  $P^{++}(As^{++})$  – 10-120 мкА;  $P^{+++}(As^{+++})$  – 0,1-10 мкА;  $B^{++}$  – 5-15 мкА;  $BF_3^{++}$  – 0,1-8,5 мкА.

Концентраційні профілі двозарядних іонів  $BF_3^{++}$ ,  $PF_2^{++}$ ,  $AsF_2^{++}$  подані на рисунку 6.

**Висновки.** Технологія отримання двох і трізарядних іонів бору, фосфору та миш'яку дозволяє відразу підвищити їх енергію в 2 чи 3 рази на діючих установках іонної імплантації.

Даний процес нами використаний також для формування ізоляції в дисиліцидних плівках титану за допомогою двозарядних іонів кисню. Враховуючи, що товщина дисиліцидних плівок складає 0,5-0,6 мкм, робимо висновок, що для забезпечення повної їх імплантації іонами кисню  $O^{++}$  необхідна енергія

$E = 250$ - $280$  кеВ при дозі  $2$ - $28$  мкАм/см<sup>2</sup>.

Активація імплантованих іонів кисню проводилася тим же швидким імпульсним відпалом з використанням галогенних ламп протягом 3 -10 с при  $T = 520$ - $580$ °С. Імплантація окислення іде швидко, бо в процесі оксидування задіяні атоми  $Ti$  і  $Si$ .

Однією із головних проблем, які виникають при використанні селективної високоенергетичної імплантації, є забезпечення надійного маскуванню сусідніх областей топології. Тому для підсилення маскуючих властивостей позитивних фоторезистів ми використали поліамідну композицію (ПД) [8]. Технологія формування такої маскуючої плівки із полііміду дуже близька до фоторезисту. Відповідно, для високоенергетичної імплантації ефективним є зняття резисту і полііміду. Для цього ми використали плазмохімічний процес зняття маскуючих плівок в плазмі кисню та водню (40-67 об з  $H_2$ ).

В даній роботі також показано, що використовуючи сумісну багатозарядну високоенергетичну імплантацію кисню і азоту, можна в заданих локальних областях формувати захований

шар оксинітриду кремнію, що має властивості ізолятора та ефективного гетера для домішок і дефектів. Більш ефективною в цьому випадку є багатозарядна імплантація молекулярних іонів  $N_2O^{++}$ , які забезпечують одночасну імплантацію азоту і кисню. В цьому випадку енергія пучка складала 250-300 кеВ при дозі  $3 \cdot 10^{16}$ - $1,4 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> ( $D = 2$ - $10$  мкАм/см<sup>2</sup>).

Активація імплантованих іонів  $N_2O^{++}$  забезпечувалася імпульсним фотонним відпалом при температурі  $T = 800$ - $1000^\circ\text{C}$  протягом 3-10 с. Властивості отриманих шарів досліджувались методами ІЧ-спектроскопії, електронної Оже-спектроскопії. ІЧ-спектри знімалися на спектрофотометрі UR-20 (типу Jpicorda) в діапазоні

хвильових чисел 700-1200 см<sup>-1</sup>. При цьому фіксується структура  $Si_x, O_y, N_z$  при дозі  $N_2O^{++}$ , що дорівнює  $8 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Імплантація  $N_2O^{++}$  в силіцид створює не тільки локальні ізолюючі шари, але і гетеруючі.

Таким чином, високоенергетична багатозарядна імплантація є ефективним інструментом для формування багаторівневої силіцидної розводки в субмікронних структурах з високою конформністю та планарністю.

**Атаманюк Р.Б.** – аспірант кафедри радіофізики та електроніки;

**Новосядлий С.П.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіофізики та електроніки.

- [1] С.П. Новосядлий. Фізико-хімічні основи субмікронної топології ВІС // *Вісник*, Івано-Франківськ, 35 с. (2003)
- [2] С.П. Новосядлий. *Висококонтрастний фоторезист для субмікронної топології великих інтегральних схем*. Фотоелектроніка, Вища школа 9 с. 37-39 (2000).
- [3] С.П. Новосядлий. Шляхи підвищення роздільної здатності проєкційної літографії // *Металофізика і новітні технології*, **24**(8), сс. 1073-1082 (2002).
- [4] P.D. Brais. Edge acuity and resolution in position type photoresist system // *Irl. Stat. Technol.*, **20**(8), pp. 76-77 (1977).
- [5] W. Arden, H. Keller, L. Mader. *Optical projection lithography*. Irl. Stat. Technol (7), pp. 143-145 (1983).
- [6] А.Б. Микитин, М.А. Микитина, Р.А. Сурис. Формирование изображения оптической системой в проекционной литографии // *Электронная промышленность*, Выпуск 5/89, сс. 27-32 (1990).
- [7] Ш. Маюрарка. *Силіциди для СБИС*. Пер. с англ. В.В. Баранова под ред. д.т.н. Ю.Д.Чистякова. М, Мир. 172 с. (1986).
- [8] С.П. Новосядлий. *Фізико-технологічні основи субмікронної технології ВІС*. Івано-Франківськ, Сімік 351 с. (2003).
- [9] В.А. Лабунов, В.Є. Борисенко, Д.И. Заровский. Формирование силицидов импульсной термообработкой пленочных структур // *Зарубежная электронная техника*. (8), сс. 27-54 (1985).
- [10] С.П. Новосядлий. Механізми формування плівок дисиліциду титану в реакторі зниженого тиску на основі аморфного кремнію // *Металофізика і новітні технології*, **23**(5), сс. 597-608 (2001).
- [11] С.П. Новосядлий. Фізико технологічні аспекти формування низькотемпературних плівок функціональних шарів великих інтегральних схем // *Вісник Львівського державного університету*. Серія фізична (29), сс. 95-105 (1997).

R.B. Atamanyuk., S.P. Novosiadly

## High Contrasting Display and Physics-Technological Aspects of Foundation Submicron Technology Big Integrated Circuits

*Precarpathian national university named after Vasyl Stefanyk  
roman.atamanyuk@mail.ru*

The high fast-acting of large-scale arrays is provided not only minimization of area of laying out of topology but also its specific resistance and profiling of contact windows. For the decision of this task in projection lithography use as high-contrasting photoresist so highly-contrasting display.

There is a sharp necessity for diminishing of area of laying out and it specific resistance for the maintainance of high fast-acting of big integrated circuits (BIC) in transition in the submicrometer range of topology sizes of structures BIC. Existent laying out dissatisfies these conditions. Therefore in this article researches are lighted up at forming of silicid tapes by different methods, in particular in the reactors of atmospheric and reduced pressure of type «Isotron» by the curriculum of monosilan and magnetron pulverization of titanic target in plasma of mixture of argon and monosilan (or disilan). Such researches are needed not only from the point of view the receipt of minimum specific resistance and defectness but also receipt of high reliable resistance contacts to n+ - and p+ - areas. The terms of the implantation oxidizing of silicid of titan are determined for forming of vertical inter-element isolation.