

Д. Москаль¹, канд.фіз.-мат.наук; В. Мельник², канд.фіз.-мат.наук;
Б. Романюк², докт.фіз.-мат.наук; В. Попов², канд.фіз.-мат.наук;
О. Пастух¹, канд.техн.наук

¹Тернопільська філія Європейського університету,

²Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

ВПЛИВ ІМПЛАНТАЦІЇ ЙОНІВ Cs НА ПЕРЕРОЗПОДІЛ АРСЕНУ НА ГРАНИЦІ РОЗДІЛУ СТРУКТУР SiO₂-Si

В роботі проведено дослідження структур SiO₂-Si з мілкими p-n переходами, сформованими шляхом низькоенергетичної імплантації арсену та додаткової імплантації йонів цезію. Досліджено профілі розподілу арсену за допомогою методу мас-спектрометрії нейтральних часток. Показано, що при відпалах структур при температурах, більших за 800 °C As накопичується на границі розділу фаз. Додаткова імплантація цезію приводить до збільшення ефекту накопичення As. Також спостерігається стимульоване цезієм збільшення товщини поверхневого окису. Запропоновано фізичні моделі цих явищ.

Зменшення розмірів елементів у великих інтегральних схемах вимагає отримання надмілких p-n переходів і збільшення провідності високолегованої області переходу. Для отримання областей n-типу використовується низькоенергетична (<10 кеВ) імплантація арсену з концентрацією $>1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Такі концентрації перевищують розчинність арсену в кремнії, особливо при низькотемпературних відпалах. Це, в свою чергу, приводить до кластеризації легуючої домішки і її електричної деактивації [1]. Для збільшення провідності областей n-типу, як правило, збільшують дозу імплантації. Разом з тим, збільшення дози приводить до підсилення процесу кластеризації [2], а використання низькотемпературних відпалів викликає деактивацію As [3].

Другим небажаним ефектом, який спостерігається при відпалі структур, легованих As, є накопичення легуючої домішки на границі поділу SiO₂-Si [4]. Цей процес починається при температурах відпалу $> 600 \text{ °C}$ і досягає насичення при температурах 900 °C. Домішка, яка знаходиться на границі розділу, є електрично неактивною. Цей ефект пов'язаний з наявністю пасток для арсену, які розташовані в дуже тонкому шарі границі поділу фаз. Ефект накопичення домішки збільшується із зменшенням енергії імплантації. Вивчення явища накопичення легуючої домішки є надзвичайно важливим для розвитку технології надвеликих інтегральних схем, особливо тих, які використовують структури "кремній на діелектрику", де накопичення має місце як на верхній, так і на нижній границях поділу фаз [5].

Важливу роль в процесах перерозподілу домішки та її кластеризації відіграють точкові дефекти - як міжвузлові атоми, так і вакансії. Перспективним методом для управління концентрацією і типом точкових дефектів є йонна імплантація різних домішок, які, за рахунок створення хімічних зв'язків з Si в процесі відпалу структур, дозволяють змінювати концентрацію точкових дефектів відносно їх рівноважної величини при даній температурі.

Саме вивченню цих процесів присвячена дана робота, в якій кремнійові структури з тонким поверхневим шаром SiO₂ після низькоенергетичної імплантації арсену додатково імплантувались йонами цезію. Як відомо, ця домішка впливає на властивості границі поділу фаз, збільшуючи вбудований в окисел позитивний заряд, а також змінює концентрацію електронних станів на границі. В роботі нами проведено дослідження впливу термічних обробок і додаткової імплантації цезію на розподіл арсену в структурах SiO₂-Si.

Зразки і методики експерименту

Кремнійові зразки p-типу провідності (10 Ом · см) з поверхневим окислом товщиною 3 нм імплантувались йонами As з енергією 5-10 кеВ з дозою $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Частина зразків далі додатково імплантувались під кутом 45° до поверхні зразка йонами Cs⁺ з енергією 3 кеВ дозою $1-5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Зразки відпалювались в атмосфері

аргону спочатку при температурі 500°C (5 хвилин) для відпалу радіаційних дефектів, а потім при температурі 900°C (5 хвилин) для активації домішки арсену.

Профілі товщинного розподілу арсену вимірювались з застосуванням методу часопролітної мас-спектрометрії (установка ToF SIMS IV) в двохпучковому режимі з використанням йонів цезію з енергією 0,7 кеВ для розпилення і йонів аргону з енергією 10 кеВ для генерації вторинних йонів, які аналізуються. Проводився аналіз розподілу йонів: Si, SiO₂, As, AsO, AsSi.

Для калібрування мас-спектрів по глибині вимірювалась глибина кратера з застосуванням профілографа Dektak.

Результати експериментів

На рис.1 наведено профілі розподілу йонів арсену, імплантованого з енергією 10 кеВ в структури SiO₂-Si до та після відпалу зразків. Також наведено розподіли кисню, кремнію та SiO₂. Після імплантації максимум розподілу арсену знаходиться на відстані 13 нм від поверхні, що добре співпадає з теоретичним розрахунком профілю розподілу за програмою TRIM 98 (не наведено). Після відпалу спостерігається суттєвий перерозподіл атомів арсену: значна його частина накопичується поблизу границі розділу SiO₂-Si, а також спостерігається дифузія атомів в глибину пластини. По мірі стравлювання зразка спостерігається зростання концентрації атомів кремнію, а також зменшення концентрації атомів кисню та SiO₂, починаючи з глибини 4,5 нм, що свідчить про те, що на поверхні структури є окисел товщиною ~4 нм.

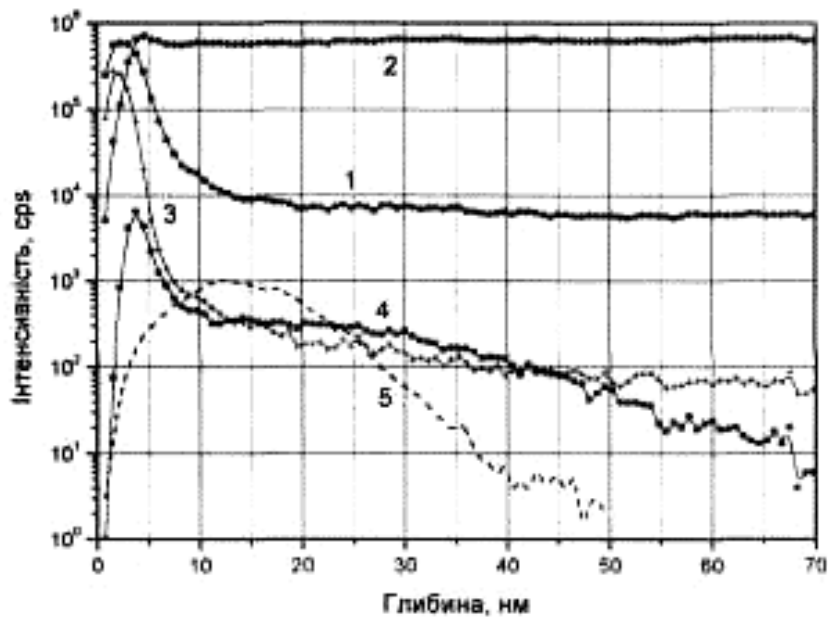


Рис.1. Профілі розподілу домішок в структурі SiO₂-Si після відпалу:
1 -кисень, 2 - кремній, 3 - SiO₂, 4 - AsSi, 5 - AsSi до відпалу

На рис.2 наведено профілі розподілу атомів арсену, імплантованих з енергією 5 кеВ після ізохронних відпалів при різних температурах. При температурі 750°C спостерігається незначне зміщення профілю розподілу арсену в напрямку межі розділу SiO₂-Si. Збільшення температури відпалу приводить до значного накопичення арсену на межі поділу фаз, також спостерігається ефект прискореної дифузії арсену вглиб пластини. Ефект накопичення арсену на межі поділу збільшується з ростом температури та часу відпалу і досягає насичення при температурі 900°C та часу відпалу 1 хв.

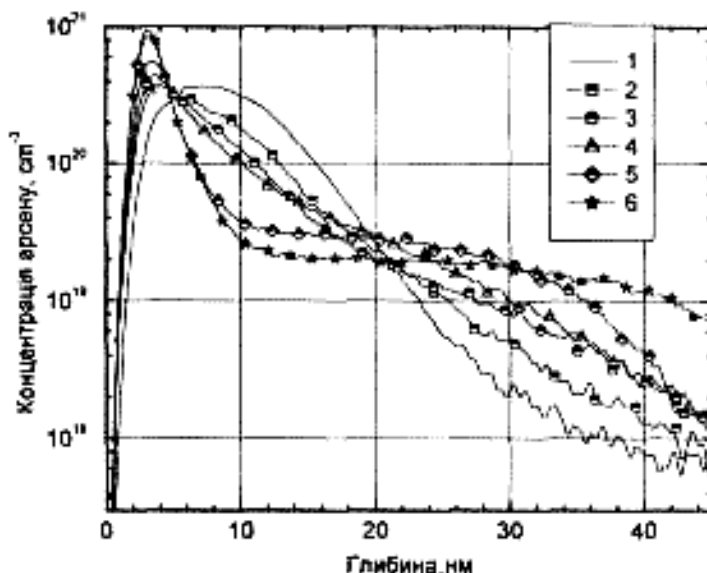


Рис.2. Профілі розподілу атомів арсену імплантованих в структуру SiO₂-Si (1) та після ізохронних відпалів при температурах 750°C (2), 800°C (3), 850°C (4), 900°C (5), 950°C (6). Час відпалу 5 хвилин

На рис.3 зображено профілі розподілу арсену та кисню в структурах, додатково імплантованих йонами цезію з дозою $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Спостерігається незначне збільшення товщини окислу на поверхні, збільшення накопичення арсену на межі поділу фаз, а також деяке збільшення концентрації арсену в області максимуму його розподілу після імплантації.

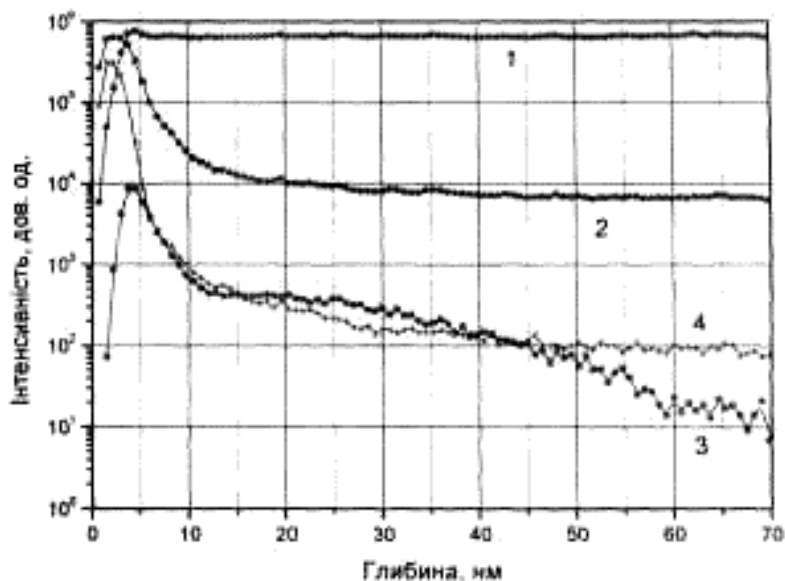


Рис.3. Профілі розподілу домішок в структурі SiO₂-Si після додаткової імплантації цезію з дозою $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ та відпалу. 1 - Si, 2 - кисень, 3 - AsSi, 4 - SiO₂

На рис.4 наведено аналогічні профілі розподілу домішок в структурах, додатково імплантованих йонами цезію із збільшеною ($5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$) дозою. Видно, що зменшення концентрації кисню та SiO₂ починається з глибин 10 нм. На профілі розподілу кремнію в області 2 - 8 нм спостерігається певний рівень сигналу, а після 8 нм концентрація кремнію збільшується і виходить на насичення при товщині 11 нм. Ці результати свідчать, що наявність великої концентрації цезію приводить до збільшення товщини окислу майже в 2 рази. Концентрація арсену на границі розділу фаз суттєво збільшується.

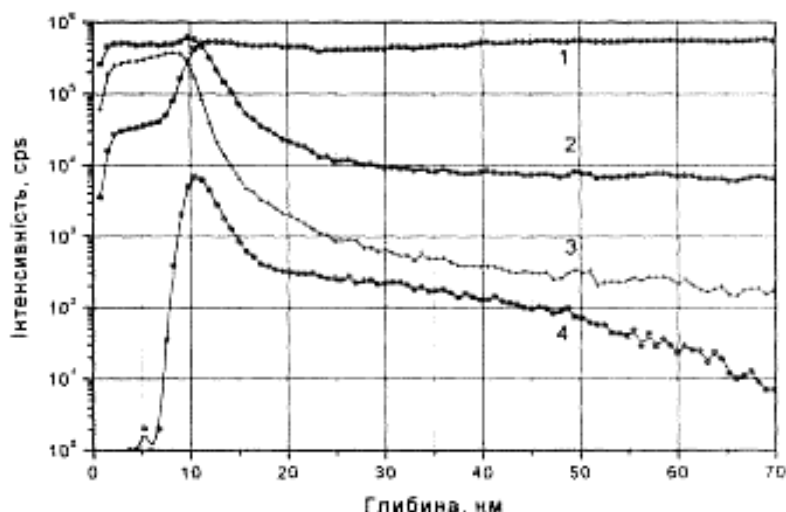


Рис.4. Профілі розподілу домішок в структурі SiO₂-Si після додаткової імплантації цезію з дозою $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ та відпалу. 1 - Si, 2 - кисень, 3 - SiO₂, 4 - AsSi

Для ілюстрації накопичення арсену на границі поділу в зразках, імпантованих цезієм на рис.3 приведено профілі розподілу As в лінійному масштабі. Видно, що в області границі поділу фаз (4-5 нм) концентрація арсену в зразках, імпантованих цезієм, більш ніж в 2 рази перевищує його концентрацію в контрольних зразках.

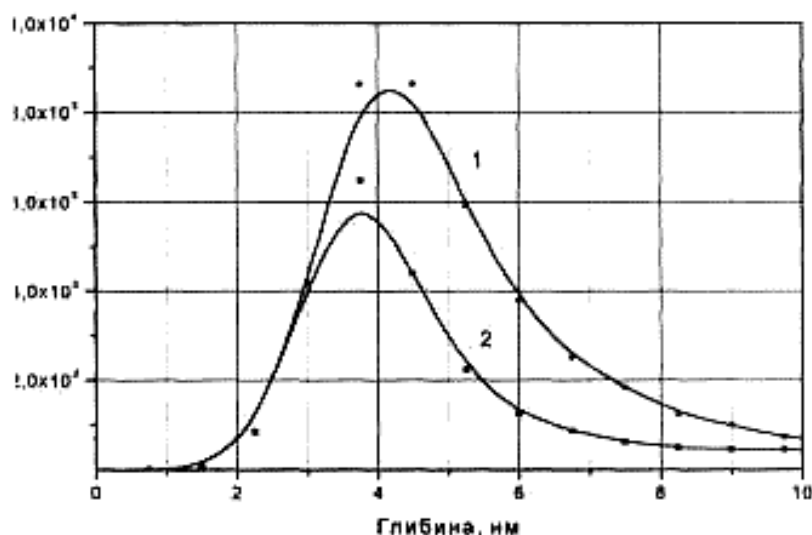


Рис.5. Профілі розподілу As в області границі розділу SiC₂-Si: 1 - зразок, імпантований цезієм, 2 - без імплантації цезію

Для визначення області локалізації арсену нами були проведені експерименти з вимірювання розподілу різних іонів в структурах SiO₂-Si.

На рис.6 наведено профілі розподілу йонів Si, SiO₂, As, AsO, AsSi по глибині структури SiO₂-Si з використанням низькоенергетичного розпорощення мішені. Чітко видно, що максимуми розподілу йонів зміщені один відносно другого. Максимум розподілу арсену співпадає з границею поділу SiO₂-Si, тоді як для йонів AsO він зміщений в сторону окису на 0,3 нм, а для йонів AsSi - в сторону кремнію на 0,5 нм. При цьому положення максимумів всіх цих йонів лежать в межах 0,8 нм, що свідчить про те, що накопичення арсену має місце в області двох моноатомних шарів на самій границі розділу SiO₂-Si.

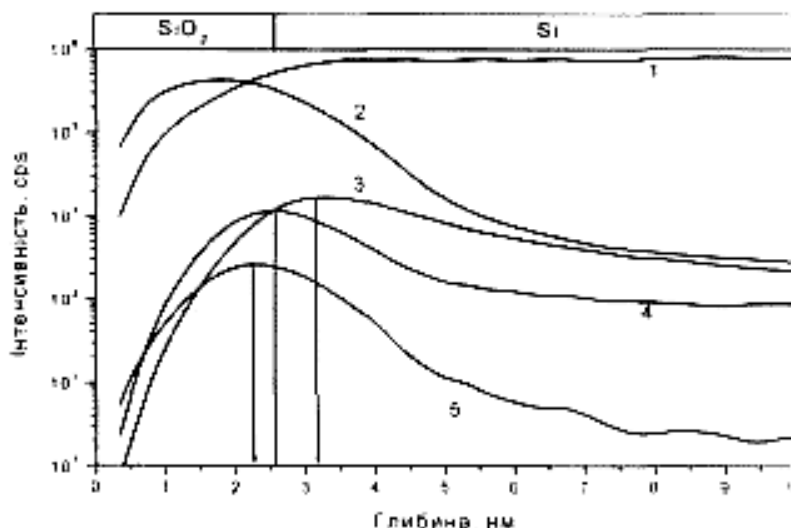


Рис.6. Розподіл йонів різного типу в структурі Si-SiO₂. 1 - Si, 2 - SiO₂, 3 -AsSi, 4 - As, 5 - AsO

Обговорення результатів

В результаті відпалів структур, імплантованих арсеном, спостерігається сильний ефект накопичення його в межах границі поділу SiO₂-Si. В роботі [3] обговорюється механізм такого накопичення, проведено розрахунки енергетичних критеріїв і пропонується модель, в якій атоми захоплюються на дефектні стани, в якості яких виступають обірвані зв'язки кремнію або вакансії. При великих концентраціях As можуть формуватися домішкові пари, що є енергетично вигідним. Існують також моделі, де ефект накопичення пояснюється створенням більш пластичної фази SiO₂As. Але в такому випадку арсен мусить розподілятися в окислі. Наші дослідження показали, рис.6, що As накопичується тільки в області границі розділу. Це підтверджує модель, в якій відповідальними за накопичення є пастки, створені внаслідок неузгодження ґраток SiO₂ та Si. Оскільки цезій є активною домішкою щодо окислення, це приводить до гетерування кисню як з об'єму пластини, так і залишкового кисню з атмосфери відпалу в область розподілу цезію. З рис.2 видно, що концентрація атомів кисню, а також SiO₂ поблизу межі поділу (в області максимуму розподілу цезію) перевищує їх концентрацію в об'ємі SiO₂. Це вказує на те, що в області розподілу цезію формується нестехіометрична плівка SiO₂, а, значить, і концентрація пасток для As буде більшою.

Висновки

В роботі показано, що додаткова імплантація цезію на границю поділу SiO₂-Si стимулює накопичення As на цій межі. Даний ефект пов'язаний з гетеруванням кисню в область розподілу цезію і створенням додаткових пасток для As. Також експериментально доведено, що арсен накопичується в тонкому пограничному шарі товщиною ~0,6 нм.

Дану роботу виконано при частковій підтримці УНТЦ (проект 2367).

The given work deals with investigation of structures SiO₂-Si with shallow p-n transitions, formed by means of low-energy implantation of arsenide and additional implantation of caesium ions. Arsenide division profiles have been discovered with help of neutral particles mass-spectrometry method. It has been showed that when the structures are being heated at temperatures over 800 degrees Celsius As is being cumulated on phase's interface. Additional caesium implantation results in increase of As accumulation effect. The increase of surface oxide thickness, stimulated by caesium is also being observed. Physical models of these phenomena have been suggested.

Література

1. M. Koh, K. Egusa, H. Furumoto et al. Quantitative evaluation of dopant loss in 5-10 keV ion implantation for low-resistive, ultrashallow source/drain formation // Jpn. J. Appl. Phys. V. 38 (1999) p. 2324-2328.

2. K. Shibahara, D. Onimatsu. Antimony clustering due to high-dose implantation // Mat. Res. Soc. Symp., v.610 (2000), p. B8.5.1.
3. J. Dabrowski, R.A. Casali, H.-J. Mussigetal. Mechanism of dopant segregation to SiO₂/Si (001) interfaces // J. Vac. Sci. Technol, v. B18 (4), 2000, p. 2160.
4. Y. Sato, J. Nakata, K. Imai, E. Arai. Arsenic pileup at the SiO₂/Si interface // J. Electrochem. Soc, v. 142 (2), 1995, p.655.
5. Y. Sato, K. Imai, E. Arai. Pileup of n-type dopant in SOI structure and its effect on n-well concentration // J. Electrochem. Soc, v. 142 (2), 1995, p.660.

Одержано 29.03.2005 р.