

В.І. СОРОКА,<sup>1</sup> С.О. ЛЕБЕДЬ,<sup>2,3</sup> М.Г. ТОЛМАЧЕВ,<sup>2</sup> О.Г. КУХАРЕНКО,<sup>2,3</sup>  
О.О. ВЕСЕЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України  
(Просп. Науки, 47, Київ 03680; e-mail: soroka@kinr.kiev.ua)

<sup>2</sup> Дослідницька лабораторія “Спектр”, Фірма “Т.М.М.”  
(Вул. Машинобудівна, 50а, Київ 03067)

<sup>3</sup> Науково-навчальна лабораторія “ТДМС”, Інститут високих технологій,  
Національний університет ім. Тараса Шевченка  
(Вул. Машинобудівна, 50а, Київ 03067)

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДАМИ ЯДЕРНОГО МІКРОАНАЛІЗУ ПОВЕРХНЕВИХ НАНОШАРІВ СТРУКТУРИ ЗОЛОТО–КРЕМНІЙ

УДК 539.23:621.315.592

---

*Ядерними аналітичними методами резерфордівського зворотного розсіяння та індукованого частинками характеристичного рентгенівського випромінювання досліджено поверхневі нанощари структури золото–кремній. Від параметрів цих шарів кардинально залежать електротехнічні властивості побудованих на їх основі електронних приладів. Вимірювання виконано на прецизійній мікроаналітичній установці “Скануючий ядерний зонд” щойно введеної в експлуатацію в лабораторії “Спектр”. Експеримент показав, що товщина шару золота, напиленого на поверхню зразків, дорівнює ~17 нм (для одного зразка) і ~20 нм (для другого зразка). Неоднорідність товщини цих шарів по поверхні не перевищує 1,6 нм і не виходить за межі похибки експерименту. Під золотом, у проміжному шарі золото–кремній, виявлено значну кількість домішки. Імовірно, що це залишок фтору після технологічної операції травлення поверхні кремнію в суміші кислот, куди входить і плавикова (HF) кислота. Показово, що кількість виявленого фтору для серії вимірів сильно корелює з величиною струму альфа-частинок на мішені під час набору спектра. Очевидно, що локальний нагрів мішені залежить від величини струму. Звідси впливає різна швидкість локальної дифузії атомів фтору з поверхні мішені.*

*Ключові слова:* ядерний мікроаналіз, резерфордівське зворотне розсіяння, індуковане частинками характеристичне рентгенівське випромінювання, альфа-частинки, “скануючий ядерний зонд”, поверхневі нанощари, проміжний шар.

### 1. Вступ

Дослідженню бар’єрних структур метал–напівпровідник присвячено велику кількість робіт у зв’язку з широким їх застосуванням для створення приладів мікро- та наноелектроніки. Особливої уваги заслуговує вивчення проміжного шару метал–на-

півпровідник, від якого в значній мірі залежать електрофізичні властивості приладів. Межа між контактуючими матеріалами задається способом її формування. Технологія виготовлення різного типу гетеросистем охоплює багато типових операцій. Визначальними при формуванні бар’єрних структур є дві стадії. Це стадія підготовки поверхні напівпровідника (особливо останні її етапи: травлення, промивання, сушіння) та стадія металізації

© В.І. СОРОКА, С.О. ЛЕБЕДЬ, М.Г. ТОЛМАЧЕВ,  
О.Г. КУХАРЕНКО, О.О. ВЕСЕЛОВ, 2013

Таблиця 1. Аналітичні можливості ядерно-фізичних методик Київського скануючого ядерного мікрозонда

| Методика | Вимірюваний сигнал                   | Просторова роздільна здатність, мкм | Глибинна роздільна здатність, мкм | Елементи, які детектуються (атомний номер, $Z$ ) | Порогова чутливість, мг/кг | Погрішність кількісного аналізу, % |
|----------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|------------------------------------|
| PIXE     | X-промені                            | $\geq 2,0$                          | 0,5–15                            | $> 11$   | $\sim 1$                   | 5–10                               |
| RBS      | Іони, розсіяні в зворотному напрямку | $\geq 2,0$                          | 0,01–15                           | $> 2$  | $\sim 1$                   | 3–5                                |

поверхні (особливо способи нанесення металу на поверхню та способи термообробки).

Метою даного дослідження є перевірка окремих результатів щодо виконання вказаних двох стадій виготовлення структури Au/Si, після внесення певних змін у технологію виробництва. Разом з тим метою роботи є перевірка функціональних можливостей щойно введеної в експлуатацію прецизійної мікроаналітичної установки “Скануючий ядерний зонд” [1, 2]. Під час досліджень використовувалися аналітичні методи ядерної фізики – методи ядерного мікроаналізу. У нашому випадку йдеться про метод резерфордівського зворотного розсіяння (RBS, Rutherford Backscattering) [3], та метод характеристичного рентгенівського випромінювання, індукованого прискореними частинками (PIXE, Particle Induced X-ray Emission) [4].

## 2. Експеримент

Вимірювання здійснювалися на авторській установці “Скануючий ядерний мікрозонд”, базою для якої став модернізований однокінцевий електростатичний прискорювач іонів KN-3000, типу Ван де Грааф [1, 2]. Головні електротехнічні параметри цієї установки:

- тип прискорених частинок – протони та альфа-частинки (іони атомів водню й гелію);
- енергія пучка іонів – 1–2,2 МеВ;
- струм робочого мікропучка іонів на досліджуваному зразку – 1 пкА–15 нА (при середньому діаметрі пучка на зразку – від 2 до 50 мкм відповідно);
- максимальна площа сканування мікропучка –  $400 \times 400$  мкм<sup>2</sup>;
- тиск залишкового газу у вакуумній камері мішеней –  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  Тор.

На даний час на прискорювачі зібрано та налагоджено дві експериментальні методики. Це методики PIXE та RBS (див. табл. 1).

Перелічені в табл. 1 методики дозволяють у сукупності виконувати як якісний, так і кількісний (двовимірний у тому числі) мікроаналіз домінуючих, домішкових та слідових хімічних елементів у зразку. За необхідності ці методики можуть працювати одночасно. Необхідно також відзначити деякі переваги мікро-RBS та мікро-PIXE методик над альтернативними мікроаналітичними методиками:

- висока порогова чутливість (до 1 мг/кг) для більшості хімічних елементів;
- придатність для аналізу практично всіх елементів;
- експресність аналізу (від 5 до 100 хвилин);
- високий ступінь локальності як по поверхні, так і глибині зразка (див. табл. 1);
- неруйнуючий характер аналізу.

Як видно з табл. 1, обидві методики добре доповнюють одна одну. Маючи приблизно однакову чутливість, перша забезпечує майже абсолютну вибірковість щодо хімічних елементів, а друга – кращу глибинну роздільну здатність та можливість аналізувати в зразку і легкі елементи (із  $Z > 2$ ).

З партії зразків для дослідження було відібрано два. На початковій стадії експерименту стояла одна задача – вимірювання товщини напиленого на поверхню кремнію шару золота. Крім того, необхідно було одержати результати щодо товщини для кількох точок, щоб можна було оцінити величину неоднорідності цього шару по поверхні. Лінія розміщення точок, в області яких виконувалися вимірювання, проходила через центр мішеней. Експеримент RBS виконувався за схемою стандартної геометрії, коли напрямком пучка з прискорювача, після проходження дев’яностаградусного ана-

лізуючого магніту, збігався з нормаллю до поверхні мішені. Кут розсіяння  $\theta$  дорівнював  $157^\circ$ . Окремі вимірювання виконувалися для геометрії з нахилом, коли кут ( $\theta_1$ ) між напрямком пучка і нормаллю до мішені становив  $60^\circ$  при тому самому куті розсіяння.

У даному експерименті спектри RBS отримували за допомогою кремнієвого поверхнево-бар'єрного детектора при енергії альфа-частинок 1,85 MeV. Для калібровки енергетичної шкали аналізатора та деяких перевірок енергію зменшували до 1,5 MeV. Ціну каналу аналізатора встановлено на рівні 4,34 кеВ/канал. Спектри для окремих точок набиралися при різних значеннях струму альфа-частинок на мішені. Струм змінювали приблизно від 2,5 нА до 12,0 нА.

Рентгенівське випромінювання реєструвалося енергодисперсійним Si(Li) детектором, з енергетичною роздільною здатністю 165 eV при енергії випромінювання 6 кеВ. Детектор PIXE розташовувався під кутом  $\sim 60^\circ$  по відношенню до напрямку пучка іонів із прискорювача.

Спектри на рис. 1 частково ілюструють можливість даних методик щодо ототожнення хімічних елементів у поверхневих шарах мішені. Обидва спектри отримано за однакових умов: енергія ( $E_0$ ) альфа-частинок дорівнювала 1,50 MeV, кут розсіяння ( $\theta$ ) дорівнював  $157^\circ$ . Нижній спектр відповідає розсіянню на одному із зразків кремнію, з поверхневим шаром золота. Верхній спектр – розсіянню на тому самому зразку кремнію (зворотний бік), з поверхневим шаром германію.

Кінематичний множник (шкала справа) для заданих умов експерименту можна вирахувати за відомою формулою або скористатися інтерпольованими табличними даними [3]. Для завідомо присутніх у мішені елементів Au та Si він дорівнює 0,9252 і 0,5805 відповідно. Координати точки Au, позначеної зірочкою, відповідають кінематичному множнику і номеру каналу аналізатора для центра ваги піка золота. Координати позначеної зірочкою точки Si відповідають кінематичному множнику й номеру каналу аналізатора для середини висоти переднього краю спектра від кремнію. Лінійна залежність енергії розсіяних частинок (номера каналу аналізатора) від кінематичного множника дозволяє провести пряму лінію Au–Si та продовжити її. Кут нахилу прямої задається ціною каналу аналізатора. Тепер зрозуміло, що перетин лінії коор-

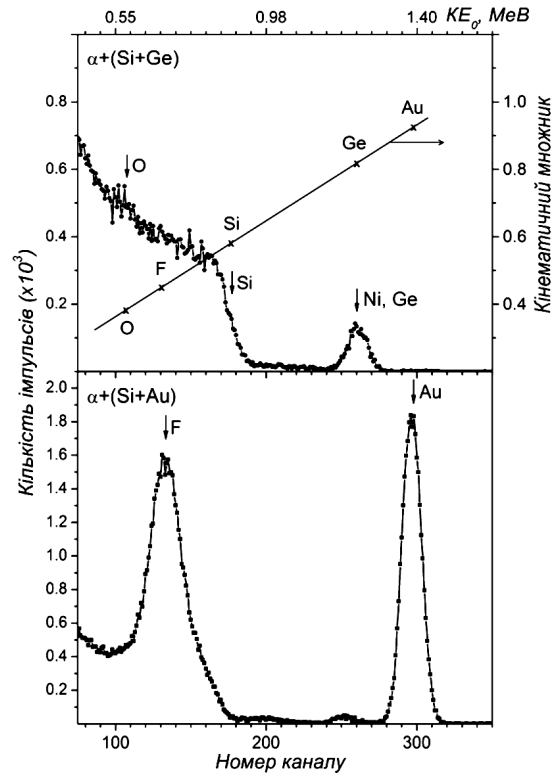
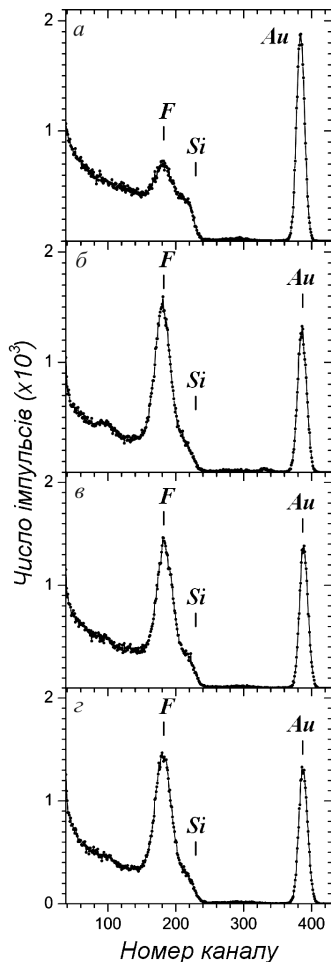


Рис. 1. Спектри зворотного розсіяння альфа-частинок з енергією 1,50 MeV під кутом  $157^\circ$ . Хрестиками показано положення піків хімічних елементів та положення високоенергетичного краю спектра для кремнію відповідно до їх кінематичного множника

динат центра ваги піка, зафіксованого приблизно в 135 каналі, з проведеною лінією дає можливість визначити кінематичний множник невідомого елемента. Його величина ( $K = 0,445$ ) відповідає хімічному елементу фтору ( $F^{19}$ ). Таким же способом приблизно в 105 каналі фіксуємо розсіяння на поверхневому шарі кисню ( $O^{16}$ ,  $K = 0,381$ ). На лінії зірочкою позначено також положення германію. Проте розшифровка спектрів PIXE в даному разі однозначно вказує на наявність, крім германію, атомів нікелю. Оскільки германій і нікель знаходяться приблизно в середній частині періодичної системи елементів і близько один біля одного, сигнали від них на спектрі RBS для даних умов експерименту практично не розділяються.

### 3. Результати

На рис. 2 показано вибрані спектри зворотного розсіяння альфа-частинок з енергією 1,85 MeV для



**Рис. 2.** RBS спектри від фрагментів робочої поверхні зразків за різних умов експерименту (згори – вниз): *a* – зразок № 1,  $\theta = 157^\circ$ ,  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $I = 12$  нА; *б* – зразок № 2,  $\theta = 157^\circ$ ,  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $I = 2,5$  нА; *в* – зразок № 1,  $\theta = 157^\circ$ ,  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $I = 2,5$  нА; *г* – зразок № 1,  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta_1 = 60^\circ$ ,  $I = 2,5$  нА

різних інших умов експерименту. На спектрах видно, що крім чітко відокремленого піка, який формують розсіяні на тонкому шарі золота альфа-частинки, проявляється ще один пік. Він накладається на високоенергетичну частину спектра розсіяння від товстої матриці з кремнію. При зміні енергії альфа-частинки і форма піка, і відносно його положення залишалися тими самими (рис. 1, 2). Отже, він не спричинений резонансною ядерною взаємодією, а зумовлений резерфордівським розсіянням на елементі, легшому за кремній. Додаткові вимірювання (за умов стандартної геометрії та геометрії з нахилом в одній і тій же точці на

поверхні мішені) показали, що невідомий елемент знаходиться в поверхневій області кремнію. Виконані в подальшому розрахунки дозволили ідентифікувати цей хімічний елемент як фтор ( $F^{19}$ ). (Тут варто відзначити, що для зразка золото-кремній, виготовленого значно раніше за дещо іншою технологією, слідів атомів фтору в даному експерименті не виявлено взагалі). Невеликі піки на спектрах в області сотого каналу відповідають за кінематикою розсіяння альфа-частинок на поверхневому шарі вуглецю. Нагар вуглецю на поверхні мішені під час опромінення альфа-частинками зумовлений наявністю залишків парів масла з молекулярного насоса при відкачуванні камери реакцій на вакуум.

Для надійної ідентифікації атомів фтору необхідно було спочатку визначити товщину поверхневого шару золота, щоб потім урахувати втрати енергії альфа-частинок при проходженні через золото як у прямому (частинки з прискорювача), так і в зворотному (розсіяні частинки) напрямках. Опускаючи детальні викладки теорії RBS [3], запишемо кінцеву формулу вирахування товщини шару важкого елемента на поверхні матриці легкого елемента:

$$(Nt)_i = \frac{A_i \sigma_M}{H_M \sigma_i} \frac{\delta E}{[\varepsilon_M^M]}. \quad (1)$$

Зауважимо тільки, що формулу (1) одержано за умови малої товщини поверхневого шару (або для малої кількості атомів у поверхневому шарі матриці). Проте критерій “малості” не уточнюється.

У наведеній формулі:  $(Nt)_i$  – кількість атомів важкого елемента на  $1 \text{ см}^2$  (товщина шару в одиницях кількості атомів на одиницю площі);  $N$  – атомна густина хімічного елемента;  $t$  – товщина шару в одиницях довжини;  $A_i$  – площа (у відліках) сигналу на спектрі під піком досліджуваного елемента (рис. 1);  $H_M$  – висота спектра, яка дорівнює числу відліків у каналі аналізатора, оцінена для розсіяння від поверхні матриці;  $\sigma_M$  – поперечний переріз резерфордівського розсіяння на ядрах матриці;  $\sigma_i$  – поперечний переріз резерфордівського розсіяння на ядрах досліджуваного елемента;  $\delta E$  – ширина каналу аналізатора;  $[\varepsilon_M^M]$  – фактор зворотного розсіяння, який відповідає атому розсіяння і речовині, у якій відбувається гальмування (для спрощення розрахунків можна користуватися значеннями фактора з таблиць [3]).

Диференціальні поперечні перерізи пружного розсіяння заряджених частинок із зарядом  $Z_1$  кулонівським полем ядра із зарядом  $Z_2$  задаються формулою Резерфорда, яка для малих значень  $m/M$  ( $m$  – маса налітаючої частинки,  $M$  – маса розсіюючого атома) має зручне наближення:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \cong 1,295 \left( \frac{Z_1 Z_2}{E_0} \right)^2 \left[ \operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2} - 2 \left( \frac{m}{M} \right)^2 + \dots \right], \text{ мб/ср}, \quad (2)$$

де енергія повинна бути виражена в МеВ.

На рис. 3 проілюстровано залежність товщини шару золота від вибору місця вимірювання на зразках. Можна стверджувати, що, при середньому значенні товщини  $\sim 17$  нм для зразка № 1 і  $\sim 20$  нм для зразка № 2, неоднорідність товщини не виходить за межі похибки даного експерименту. Середня статистична похибка визначення товщини шару (повна ширина розподілу на половині висоти) становить  $\sim 1,6$  нм. При переході від одиниці вимірювання товщин шарів золота в ат/см<sup>2</sup> до лінійних одиниць (в нм) вважалося, що атомна густина поверхневого шару дорівнює об'ємній густині речовини. Варто відзначити, що цей результат узгоджується з оцінками однорідності товщини золота, отриманими спектродотометричним методом на стадії виготовлення зразків.

Для обчислення кількості атомів фтору ми використали також формулу (1). Пік фтору чітко виділяється на фоні розсіяння від кремнію. Сумарну кількість відліків під піком фтору ( $A_i$ ) знаходили, віднімаючи відліки розсіяння на кремнії у відповідних каналах аналізатора. Звичайно при такому способі розрахунку вноситься деяка систематична похибка. Для точнішого визначення фактора зворотного розсіяння  $[\varepsilon]$  необхідно враховувати ту обставину, що ми досліджуємо шар, який складається в певній пропорції з двох елементів (кремнію й фтору). Проте в даному експерименті нас цікавив перш за все факт наявності самого фтору та його відносна концентрація по поверхні.

Результат вимірювання кількості фтору  $(Nt)_F$  у тих самих місцях на поверхні зразків, де досліджувалося золото, показано на рис. 4. Звертаємо увагу на той цікавий факт, що виявлена кількість атомів фтору різко корелює з величиною струму альфа-частинок, за якого вимірювали їх розсіяння у вибраних місцях на зразку. Отже, звідки в такій кількості фтор і чому він так себе поводить? Однією з

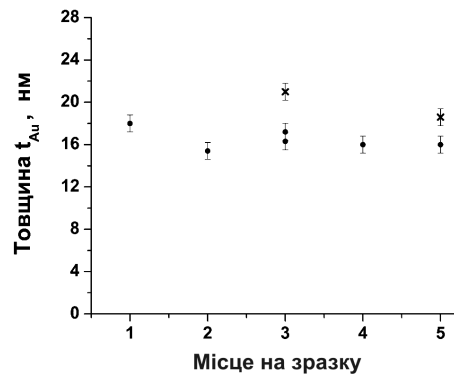


Рис. 3. Залежність товщини поверхневого шару золота від місця на робочій поверхні зразка: ● – зразок № 1; x – зразок № 2. Місця для вимірів розташовувалися вздовж лінії, яка проходила через центр зразка (місце 3). Місця 1 і 5 вибиралися на краях зразка

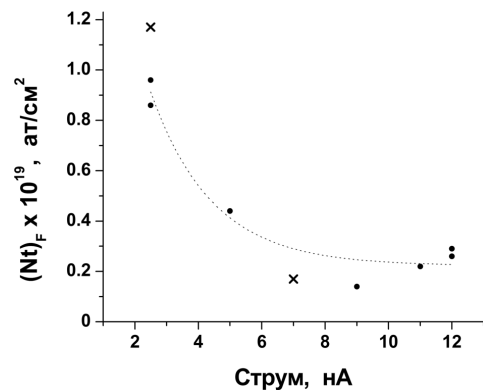
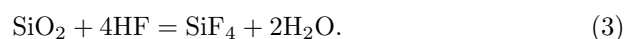


Рис. 4. Залежність кількості атомів фтору в поверхневому шарі кремнію від величини струму альфа-частинок: ● – зразок № 1; x – зразок № 2

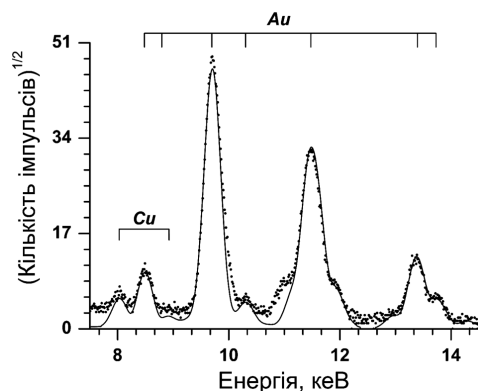
операцій підготовки зразків є травлення заготовок кремнію в суміші кислот, після операції шліфування. До складу суміші входить і концентрована плавикова (фтористоводнева) кислота. Фтороводень і фтористоводнева кислота мають властивість взаємодіяти з діоксидом кремнію  $\text{SiO}_2$  [5]:



У результаті утворюється газоподібний фторид кремнію  $\text{SiF}_4$ . У розчині плавикової кислоти фторид кремнію не виділяється, бо він взаємодіє з молекулами  $\text{HF}$ :



Утворюється добре розчинна кремнефтористоводнева кислота, у молекулі якої один атом крем-



**Рис. 5.** PIXE спектр від фрагмента робочої поверхні зразка № 2

нію міцно втримує шість атомів фтору. Таким чином, якщо після операції травлення належно не витримано процедуру промивки та сушки, то залишки кислоти можуть бути значними.

У поверхневих шарах досліджуваних зразків може бути невеликий залишок кисню, який взагалі змивається плавиковою кислотою. Але сигнал від нього попадає в низькоенергетичну область великого піка від фтору і практично не помітний на спектрах (рис. 1). Що стосується водню, то розсіяння альфа-частинок на атомах водню під задніми кутами неможливе за кінематиною.

Тепер проаналізуємо факт залежності виявленої кількості фтору від струму альфа-частинок при дослідженні зразків. Можна порадити, що в процесі гальмування частинок з енергією 1,85 МеВ при струмі 10 нА виділяється потужність  $1,85 \times 10^{-2}$  Вт. Зауважимо, що площа опромінюваної ділянки на мішені становила близько  $2 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup> (діаметр пучка на поверхні мішені дорівнював приблизно 50 мкм). У перерахунку на 1 см<sup>2</sup> виділена потужність еквівалентна  $\sim 1$  кВт. Отже, локальний нагрів мішені значний. Його, певно, достатньо для інтенсивної дифузії атомів фтору з поверхні зразка. Цікаво, що при зменшенні струму альфа-частинок приблизно в 5 разів, інтенсивність дифузії помітно спадає. З різних точок зору виявлений факт доцільно дослідити додатково.

Як відомо [6], для більшості хімічних елементів перерізи PIXE реакцій на протонах значно вищі, ніж на альфа-частинках. Тому для PIXE аналізу зразків нами було використано мікропучок протонів. На рис. 5 наведено експериментальний та роз-

рахований PIXE спектри (лінії серій K і L для Cu і Au відповідно) від фрагмента робочої поверхні в центральній частині зразка № 2.

Експериментальний спектр отримано в режимі програмованого рівномірного сканування мікропучком протонів з енергією 1,85 МеВ по поверхні зразка площею  $300 \times 300$  мкм<sup>2</sup> у заздалегідь вибраному місці (там, де вимірювався зображений на рис. 2, б RBS спектр). Позиціювання мікропучка здійснювалося за допомогою механічного 3-D (у координатному просторі) мікроманіпулятора та оптичного 500X мікроскопа [1, 2]. Розмір плями від пучка протонів на поверхні зразка не перевищував 15 мкм, а величина струму становила 300 пкА. Для фільтрування інтенсивних низькоенергетичних рентгенівських променів, що летять від кремнієвої основи зразка, перед PIXE детектором було встановлено стандартний фільтр – алюмінієву плівку товщиною 40 мкм. Таким способом вдається уникнути режиму перевантаження Si(Li) детектора та забезпечити високу чутливість методики до більш важких хімічних елементів. Застосовані заходи сприяли виявленню на поверхні зразка № 2 в декількох зонах досліджень рівномірно розподілені сліди міді (див. рис. 5). Наведений на цьому рисунку модельний PIXE спектр було отримано за допомогою всевітньо відомої програми GupixWin [7]. Програму було використано для подальшого кількісного аналізу спектрів. Визначено, що концентрація золота в області сканування дорівнює 38,4 мкг/см<sup>2</sup>. Це еквівалентно товщині плівки золота  $\sim 20$  нм і добре узгоджується з результатами попереднього RBS аналізу зразка. Розраховано також відносну до золота концентрацію слідів міді. Вона виявилася рівною 0,21%.

#### 4. Висновки

Виконані дослідження підтвердили, що ядерні методи не руйнуючого аналізу з успіхом можуть використовуватися не тільки для дослідження матеріалів, а й виробів з них. Контроль за допомогою цих методів може давати цінну інформацію і на стадії виготовлення приладів, і, періодично, на стадії їх експлуатації. Таким способом можуть оперативно з'ясуватися причини погіршення робочих характеристик.

Введений недавно в м. Києві в експлуатацію електростатичний прискорювач, обладнаний мікрозондом і двома експериментальними методиками,

цілком придатний для виконання широкого класу робіт з ядерного мікроаналізу. Більше того, після перших експериментів з'ясувалися шляхи покращення параметрів пучка прискорених частинок і робочих характеристик методик, що, в сукупності, дасть можливість ставити більш прецизійні експерименти й отримувати точніші дані.

Виявлення значної кількості фтору у проміжному шарі золото-кремній, а також факт значної зміни його відносної концентрації залежно від величини струму альфа-частинок при наборі спектра, потребують додаткового експериментального дослідження. Доцільно також повторити кількісний аналіз результатів розрахунку для фтору в рамках більш коректних наближень, оскільки для виявленої кількості атомів фтору умовний критерій "малості" може бути занадто приблизним.

*Автори висловлюють вдячність доктору Я. Леккі з Інституту ядерної фізики (м. Краків, Польща) за надану допомогу при виконанні кількісного PIXE аналізу.*

1. S. Lebed, M. Tolmachov, O. Kukhareenko, and O. Veselov, Nucl. Instrum. Methods B **267**, 2013 (2009).
2. Сканиуючий іонний зонд лабораторії "Спектр", <http://www.prober.in>
3. W.K. Chu, J.W. Mayer, and M.A. Nicolet, *Backscattering Spectrometry* (Academic Press, New York, 1978).
4. S.A.E. Johanson and T.B. Johanson, Nucl. Instrum. Methods B **137**, 473 (1976).
5. Н.Л. Глинка (Общая химия, Ленинград: Химия, 1985).
6. M.V.H. Breese, D.N. Jamieson, and P.J.C. King, *Materials Analysis Using a Nuclear Microprobe* (Wiley, New York, 1996).
7. J. Maxwell, J. Campbell, and W. Teesdale, Nucl. Instrum. Methods B **43**, 218 (1989).

Одержано 27.08.12

*В.И. Сорока, С.А. Лебедь, Н.Г. Толмачев,  
А.Г. Кухаренко, О.А. Веселов*

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ ЯДЕРНОГО МИКРОАНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСЛОЁВ СТРУКТУРЫ ЗОЛОТО-КРЕМНИЙ

##### Резюме

Ядерными аналитическими методами резерфордовского обратного рассеяния и частицами индуцированного ха-

рактеристического рентгеновского излучения исследованы поверхностные нанослои структуры золото-кремний. От параметров этих слоёв существенно зависят электротехнические свойства изготовленных на их основе электронных приборов. Измерения выполнены на прецизионной микроаналитической установке "Сканирующий ядерный зонд", недавно введённой в эксплуатацию в лаборатории "Спектр". Эксперимент показал, что толщина золота, нанесённого на поверхность образцов, была равной  $\sim 17$  нм (для одного образца) и  $\sim 20$  нм (для второго образца). Неоднородность толщины по поверхности не превышает 1,6 нм и не выходит за пределы ошибки эксперимента. Под золотом, в промежуточном слое золото-кремний, обнаружено значительное количество фтора. Вероятно, что это остаток после технологической операции травления поверхности образцов в смеси кислот, куда входит и плавиковая (HF) кислота. Обнаружено также, что количество фтора для серии измерений сильно зависит от величины тока альфа-частиц на мишени во время набора спектра. Очевидно, что локальный нагрев мишени зависит от величины тока. Отсюда следует разная скорость локальной диффузии атомов фтора с поверхности мишени.

*V.I. Soroka, S.O. Lebed, M.G. Tolmachov,  
O.G. Kukhareenko, O.O. Veselov*

#### NUCLEAR MICROANALYSIS STUDY OF SURFACE NANOLAYERS IN GOLD-SILICON STRUCTURES

##### Резюме

The Rutherford backscattering and particle-induced X-ray emission methods are used to study the surface layers in gold-silicon structures, the parameters of which govern the operational characteristics of electron devices constructed on their basis. The measurements are performed on a high-precision micro-analytical unit "Nuclear scanning probe" recently put into operation at the "Spectrum" laboratory. The thicknesses of a gold layer sputtered onto the specimen surface were about 17 and 20 nm for two different specimens. The layer non-uniformity was less than 1.6 nm and did not exceed the experimental error. A substantial amount of the fluorine impurity was revealed under the gold layer in the gold-silicon interface layer. Probably, it may be remnants of fluorine remaining after the etching of the silicon surface in a mixture of acids that included the hydrofluoric one (HF). The amount of fluorine detected in a series of measurements was found to strongly correlate with the current of alpha-particles at the target surface during the spectrum measurement. Since the local heating of the target depends on the current, it is evident that the local diffusion rate of fluorine atoms varied over the target surface.