

## КИЇВСЬКИЙ СКАНУЮЧИЙ ЯДЕРНИЙ МІКРОЗОНД З МЕТОДИКОЮ ПРЕЦИЗІЙНОГО ПРОГРАМОВАНОГО ОПРОМІНЕННЯ ЗРАЗКА МІКРОПУЧКОМ ІОНІВ

*С.О. Лебедь<sup>1,2</sup>, О.Г. Кухаренко<sup>1,2</sup>, М.Г. Толмачов<sup>2</sup>, О.В. Третьяк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Інститут високих технологій Державного університету ім. Тараса Шевченка,  
Київ, Україна*

*E-mail: <http://iht.univ.kiev.ua>; тел. +38(044)521-35-66, 067-573-18-28;*

<sup>2</sup>*Дослідницька лабораторія «Спектр» Фірми «Т.М.М.»,  
Київ, Україна*

*E-mail: [salmp1@ukr.net](mailto:salmp1@ukr.net); тел. +38(044)593-06-96, 067-573-18-28*

В Києві збудована високотехнологічна установка – скануючий ядерний мікросонд (ЯМЗ) з трьома ядерно-фізичними методиками. Дві з цих методик застосовуються для мікроаналітичних досліджень хімічного складу зразка, а третя – дозволяє виконувати його прецизійне програмоване опромінення (ППО) мікропучком протонів (або альфа-частинок) з енергією 1...2 МеВ. У роботі надана інформація щодо головних особливостей цих методик і техніки експерименту. Наведено приклад комбінованого застосування трьох методик для виконання послідовно (або одночасно) керованої модифікації напівпровідникового зразка радіаційними дефектами і мікроаналізу його складу. Показано, що інсталяція методики ППО на Київському ЯМЗ відкриває додаткову можливість щодо виготовлення 3-D мікроструктур за новою безмасковою технологією.

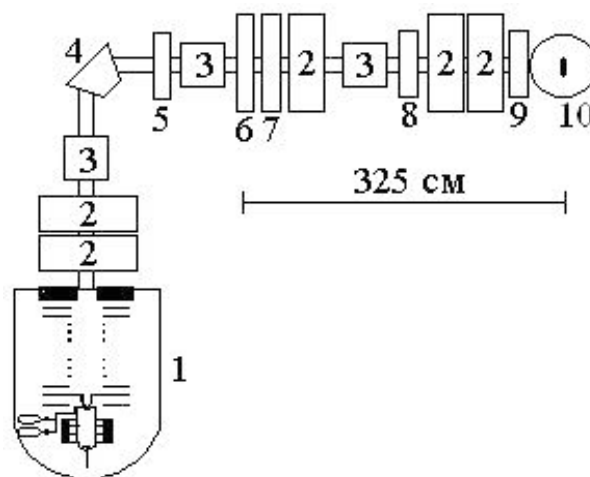
### ВСТУП

Скануючий ядерний мікросонд – унікальна високотехнологічна установка, до складу якої, зазвичай, входять: прискорювач ядер атомів (іонів) до енергій понад 1 МеВ, аналізуючий електромагніт, зондоформуюча система та декілька ядерно-фізичних методик [1]. У більшості лабораторій світу ЯМЗ застосовується в основному в якості мікроаналітичного приладу з відомими спектроскопічними методиками: PIXE (Particle Induce X-ray Emission) [2] і BS (Backscattering Spectroscopy) [3].

Київська установка ЯМЗ (рис. 1) була спроектована і збудована в період 2003–2008 рр. на базі модернізованого однокінцевого електростатичного прискорювача іонів KN-3000 типу Ван де Граафа, 90° аналізуючого магніту з подвійним фокусуванням пучка іонів і оригінальної зондоформуючої системи довжиною 325 см [4, 5].

Головні електротехнічні параметри цієї установки:

- тиск залишкового газу в мішеневій вакуумній камері:  $2 \cdot 10^{-7}$  Торр;
- тип робочих іонів: протони або іони атомів гелію (альфа-частинки);
- середня енергія пучка робочих іонів:  $E_0 = 1 \dots 2,2$  МеВ;
- енергетичний розкид іонів у пучку робочих іонів:  $\Delta E \leq 200$  еВ;
- струм мікропучка іонів на дослідному зразку: 1 пкА...15 нА;
- розмір мікропучка іонів на зразку: 2...50 мкм відповідно.



*Рис. 1. Схема розміщення головних елементів на установці (вид згори): 1 – прискорювач іонів; 2 – магнітна квадрупольна лінза; 3 – камера візуального контролю пучка іонів; 4 – 90° магніт; 5 – циліндри стабілізації пучка; 6 – круглі об'єктні апертури; 7 – прямокутні об'єктні циліндри; 8 – кутовий коліматор; 9 – електромагнітна система сканування пучка іонів; 10 – мішенева камера*

У 2009–2011 рр. на установці були впроваджені в практику наукових досліджень методики мікро-PIXE і BS [5, 6].

Ці методики одні з найбільш універсальних мікроаналітичних методик з потужними можливостями:

- забезпечують високі порогові чутливості ( $\sim 1 \dots 20$  мг/кг) для більшості хімічних елементів з високим ступенем локальності ( $\sim 0,3 \dots 10$  мкм) аналізу;

– дозволяють виконувати якісний і кількісний аналізи зразка (ідентифікувати хімічні елементи у 2-D геометричному просторі і визначити величини концентрацій домінуючих, домішкових та слідових хімічних елементів у зразку відповідно);

– результати аналізу можна отримати за відносно короткий термін (~ 10...100 хв);

– зразок, зазвичай, не руйнується під час вимірювань.

На початку 2012 року на описаному вище ЯМЗ впроваджена в практику наукових досліджень нова методика, яка дозволяє виконувати прецизійне програмоване опромінення зразка мікропучком протонів або альфа-частинок з середньою енергією понад 1 МеВ. Застосування цієї методики в комбінації з методикою BS (і/або мікроPIXE) дозволяє на одній установці (при необхідності, одночасно) комплексно виконувати керовану модифікацію і мікроаналіз зразка.

Мета даної праці:

– надати більш докладну інформацію щодо техніки експерименту та методології аналізу і опромінення зразків;

– показати можливості застосування вище зазначених методик нашого ЯМЗ щодо мікрообробки матеріалів і модифікації напівпровідників [7, 8].

## 1. ГОЛОВНІ МІКРОАНАЛІТИЧНІ МЕТОДИКИ ЯМЗ

Унікальні можливості головних методик і технологій ЯМЗ обумовлені певними особливостями взаємодії високоенергетичних мікропучків легких іонів з матеріальним зразком:

– добре сфокусований мікропучок іонів може мати високу просторову роздільну здатність (0,3...10 мкм при струмі пучка 1 пкА...20 нА);

– домінуюча кількість іонів мало розсіюється по кутам і незначно втрачає свою енергію за один акт взаємодії з ядрами зразка аж до їх повної зупинки;

– пучок іонів має добре визначену значенням параметру  $E_0$  глибину проникнення в зразок ( $E_0$  – середня енергія іонів на вході у зразок).

Ці особливості мегаелектронвольтних мікропучків іонів добре ілюструє рис. 2, а і б. Розрахунки виконані за допомогою програми SRIM [9].

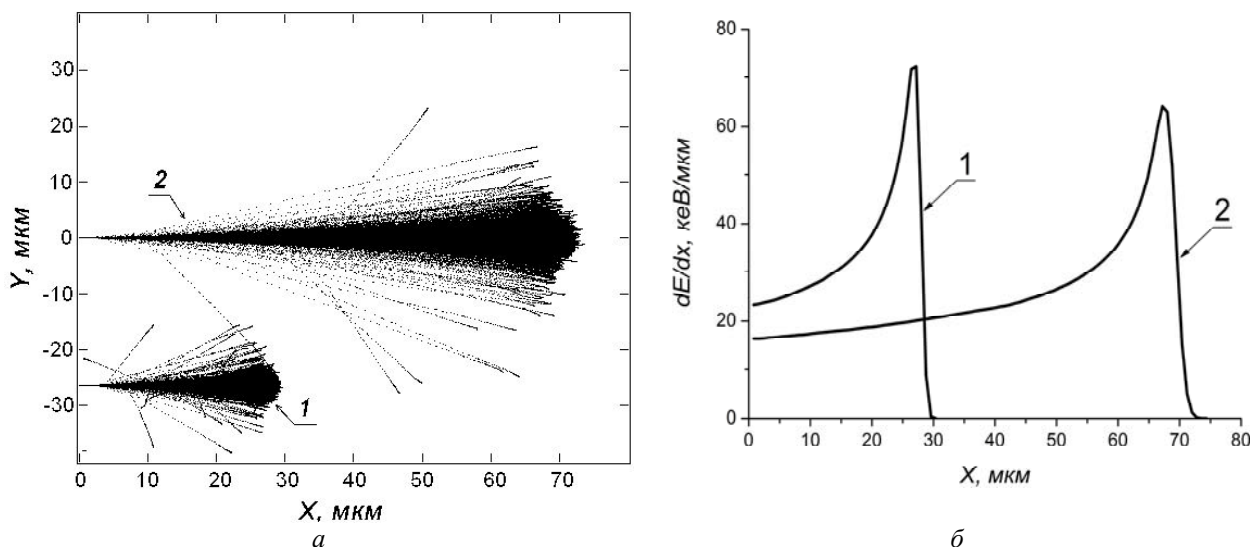


Рис. 2. Розраховані траєкторії (а) та середні енергетичні втрати (б) протонів у глибині зразка ПММА при двох значеннях параметра  $E_0$  на вході у зразок: 1 –  $E_0=1$  МеВ; 2 –  $E_0=1,8$  МеВ

Для цих розрахунків матеріал зразка – ПММА (поліметилметаакрилат,  $H_8C_5O_2$ ) вибраний нами не випадково. Як відомо, в мікроелектроніці полімерний матеріал ПММА широко використовується в якості негативного фоторезиста.

### 1.1. PIXE-МЕТОДИКА

У 70-х роках минулого століття вперше було експериментально доведено [2], що поєднання процесів рентгенівського збудження атомів зразка високоенергетичними (1...3 МеВ) протонами та реєстрації цього випромінювання за допомогою напівпровідникового  $Si(Li)$ - або  $Ge$ -детекторів складає основу для багатоелементного і високочутливого PIXE-метода аналізу.

Як відомо [10], для більшості хімічних елементів перерізи PIXE-реакцій на протонах значно вищі, ніж

на альфа-частинках. Тому для PIXE-аналізу зразків, зазвичай, використовується пучок протонів.

Основою кількісного PIXE-аналізу є визначення з вимірюваних спектрів інтенсивності піків та встановлення їх взаємозв'язку з концентраціями відповідних хімічних елементів. Ця задача може бути розв'язана за допомогою одного з відомих пакетів прикладних програм – GUPIX [11]. За допомогою цих програм, що містять в собі фундаментальні багатопараметричні бази даних, методом послідовних підгонок параметрів гауссових піків знаходиться модельний спектр, який відповідає експериментальному.

Мала ступінь розсіювання мегаелектронвольтних іонів по кутам у зразку (див. рис. 2) забезпечує слабе фонове рентгенівське випромінювання і високу аналітичну чутливість (до 1...10 мг/кг) мікроPIXE-методу. В свою чергу, це дозволяє в

багатьох випадках, що складають практичний інтерес, знайти малу кількість (на рівні  $10^{-16}$  г) слідових елементів у зразку.

При виконанні кількісного PIXE-аналізу, зазвичай, використовується додаткова інформація щодо повного хімічного складу зразка та ступеню його неоднорідності (стандартні зразки з подібною і відомою матрицею і/або результати BS-аналізу).

## 1.2. BS-МЕТОДИКА

У BS-методі реєструються ті з бомбардуючих зразок іонів (масою  $M_1$  та атомним номером  $Z_1$ ) пучка, що внаслідок пружних зіткнень розсіялись у зворотному напрямку від ядра ( $M_2, Z_2$ ) елемента зразка.

Завдяки законам збереження енергії та імпульсу енергія розсіяного іона ( $E_i$ ) однозначно визначається масою  $M_2$  при заданому куті розсіювання іонів ( $\theta$ ). Таким чином, розподіл розсіяних іонів (їх енергетичний спектр) описує елементний склад зразка:

$$E_i = E_0 k, \quad k = \left[ \frac{M_1 \cos \theta + \sqrt{M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta}}{M_1 + M_2} \right]^2,$$

де  $k$  – кінематичний фактор.

У RBS (Rutherford BS) спектроскопії енергія та тип бомбардуючих іонів вибирається таким чином, щоб їх розсіяння атомами мішені було гарантовано кулонівським з диференціальним перерізом (формула Резерфорда):

$$d\sigma = 1.296 (Z_1 Z_2 / E)^2 \operatorname{cosec}^4(\theta/2) d\Omega,$$

де  $d\Omega$  – елемент тілесного кута.

Для RBS оптимальним є пучок іонів гелію з енергією на рівні 0,5...5 MeV. Найкраща роздільна здатність цього методу по масам досягається, коли розсіяні іони реєструються під значними кутами  $\theta = 150 \dots 180^\circ$ . За допомогою поверхнево-бар'єрного кремнієвого детектора вдається досягти роздільної здатності по глибині на рівні 50...300 Å. Точність вимірювань досягає величин 2...5 %.

Для RBS-аналізу тонких зразків (плівок) просторова щільність  $N$  для відповідного елемента у зразку може бути розрахована за формулою:

$$N = A \sin \chi (Q \Omega \eta \sigma)^{-1},$$

де  $A$  – величина площі піка енергетичного спектра;  $\chi$  – кут падіння іонів;  $Q$  – їх кількість;  $\Omega$  та  $\eta$  – тілесний кут та ефективність застосованого детектора часток.

Іони, які розсіялись від атомів, у зворотному напрямку зупиняються у зразку на різній глибині, втрачаючи частину своєї енергії. Тому аналіз RBS-спектрів товстих зразків значно складніший [3]. Оптимальні умови для аналізу таких зразків виконуються, коли маса досліджуваного елемента значно більша від маси ядер матриці.

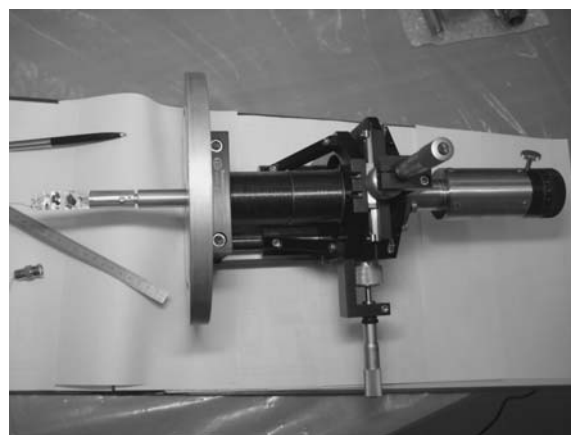
Товщина зразка, яку вдається проаналізувати за допомогою іонів гелію з енергією 2 MeV, складає величину в декілька мікрометрів.

## 1.3. ТЕХНІКА МІКРОАНАЛІТИЧНИХ МЕТОДИК НА КИЇВСЬКОМУ ЯМЗ

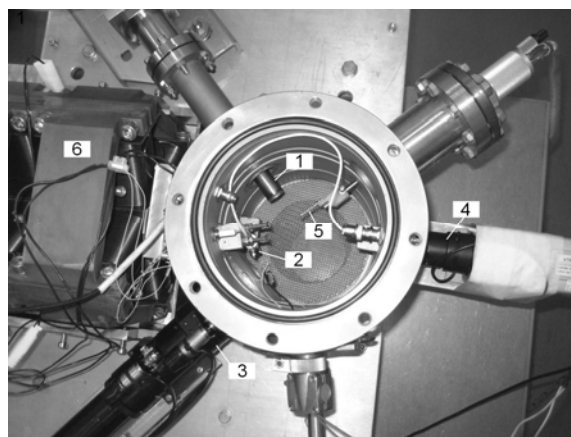
У нашому випадку, рентгенівське випромінювання і розсіяні від зразка (рис. 3,а) заряджені частки реєструються за допомогою енергодисперсійного *Princeton Gamma-Tech* Si(Li)-детектора і іонно-імплантованого поверхнево-бар'єрного кремнієвого детектора (див. рис. 3,б) відповідно.

Застосований PIXE-детектор дозволяє виконувати вимірювання з енергетичною роздільною здатністю 165 eV при енергії випромінювання 6 keV.

Як показано на рис. 3,б, PIXE- і BS-детектори розташовані у вимірювальній вакуумній камері під кутами  $\sim 130^\circ$  і  $\sim 160^\circ$  відповідно по відношенню до напрямку руху мікропучка іонів.



а



б

Рис. 3. Фотографії складових частин мішеневої вакуумної камери ЯМЗ: а – вид збоку на фланець мішеневої камери з утримувачем зразків і 3,5D-мікроманіпулятором; б – вид на камеру згори (фланець камери знятий): 1 – рухома кінцівка PIXE-детектора; 2 – BS-детектор; 3 – оптичний мікроскоп; 4 – CCD-камера; 5 – рухомий фільтр PIXE-детектора; 6 – магнітна квадрупольна лінза

За допомогою PIXE- і RBS-методик у 2011 році нами був досліджений (в 2-D геометричному просторі, тощо) хімічний склад різноманітних зразків: корисних копалин, технічної і питної води,

напівпровідникових виробів, речовини рослинного і тваринного походження [5, 6]. Можливості головних мікроаналітичних методик, діючих на нашому ЯМЗ, наведені в таблиці.

Можливості мікроаналітичних методик

Методика	Вимірюваний сигнал	Просторова роздільна здатність, мкм	Глибинна роздільна здатність, мкм	Елементи, які ідентифікуються (атомний номер Z)	Порогова чутливість, мг/кг	Похибка кількісного аналізу, %
Мікро-PIXE	X-промені	$\geq 2,0$	0,5...10	$\geq 11$	$\sim 1$	5...10
Мікро-BS	Іони, розсіяні в зворотному напрямку	$\geq 2,0$	0,01...0,5	$\geq 2$	$\sim 1$	3...5

## 2. НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЩО БАЗУЮТЬСЯ НА МЕТОДИЦІ ППО ЗРАЗКА ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ІОНАМИ

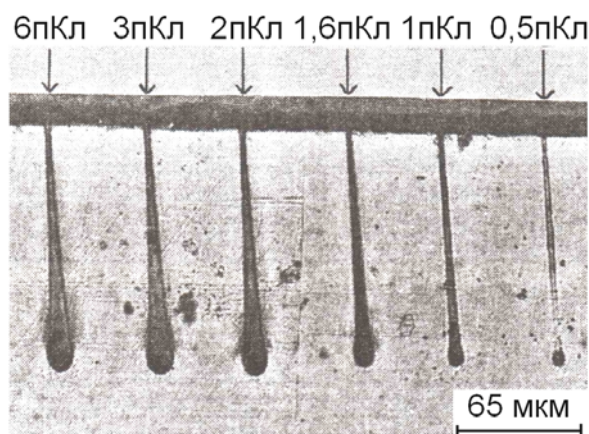
З кінця минулого століття активно розвивається нова ЯМЗ-технологія: PBM (Proton Beam Micromachining – обробки зразка мікропучком протонів), в якій застосовується дозоване локальне опромінювання зразка (зазвичай, фоторезисту типу ПММА або SU-8) мікропучком протонів, середня енергія яких складає 1...3 MeV. Таке опромінення (див. рис. 2) веде до локальної руйнації (або перебудови) хімічних зв'язків між атомами в поверхневих шарах зразка. Шар опроміненого матеріалу зразка може бути видалений одним з відомих методів хімічної обробки – травленням.

На рис. 4,а показано оптичні зображення шести каналів, утворених сфокусованим 3 MeV протонами в глибині зразка з полімеру ПММА, застосовуючи різні дози опромінення [12].

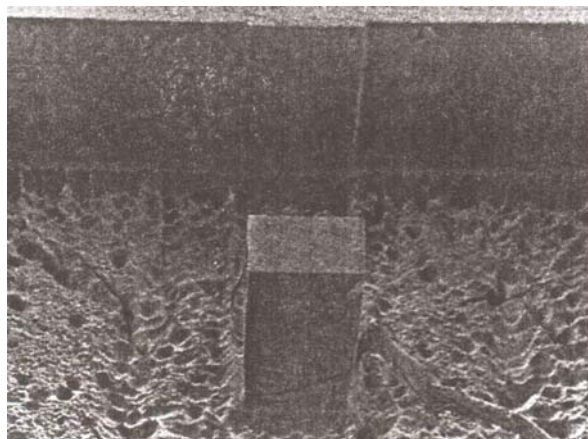
Прямокутна структура (див. рис. 4,б) була виготовлена по технології PBM шляхом послідовного опромінення сусідніх регіонів 100 пкА протонним пучком з локальною дозою 0,6 пкКл/мкм<sup>2</sup> [12].

Технологія PBM була розвинута і застосована в безмасковій ЯМЗ-технології виготовлення трьохвимірних мікроструктур (ґратів, фільтрів, хвилеводів, турбін, тощо) з високим аспектним співвідношенням (від 100 до 1000) [13-14]. Таким чином, була доведена конкурентоспроможність технології PBM щодо традиційної маскової іонної технології (LIGA).

Останнім часом широко застосовується технологія контрольованого опромінення напівпровідників високоенергетичним макропучком протонів з метою модифікувати їх електротехнічні властивості [8]. Зазвичай, зміна властивостей напівпровідникових зразків при його радіаційному опроміненні обумовлена зміною положення в ньому атомів домішок і/або виникненням в ньому радіаційних дефектів (РД) структури (наприклад, пар Френкеля). Утворені у напівпровідниковому зразку РД можуть виконувати роль донорів, акцепторів або центрів рекомбінації носіїв зарядів.



а



б

Рис. 4. Зображення: а – трьохканальних каналів і б – прямокутної структури в глибині зразка

На рис. 5 показана розрахована за допомогою програми SRIM інтегральна кількість таких дефектів, що утворюються в глибині кремнієвого зразка під дією високоенергетичних ( $E_0 = 1,8$  MeV) альфа-частинок і протонів.

Як видно з цього рисунка, альфа-частинки генерують у кремнію:

– значно ближче до поверхні зразка і значно більшу кількість РД, ніж протони (у співвідношенні 278/49);

– максимальну кількість дефектів (~200/іон) у вузькому інтервалі ( $\Delta h \sim 3$  мкм) на визначеній глибині, близькій до величини  $R \sim 6,7$  мкм, де  $R$  – глибина повної зупинки цих іонів у зразку.

На відмінність від високоенергетичних (з енергією від 20 кеВ до 5 МеВ) альфа-частинок протони (іони атомів водню):

– не формують у зразку складні радіаційні комплекси;

– здатні утворювати у напівпровідниковому зразку РД у значно більшому діапазоні глибин (від десятків нанометрів до сотень мікрометрів).

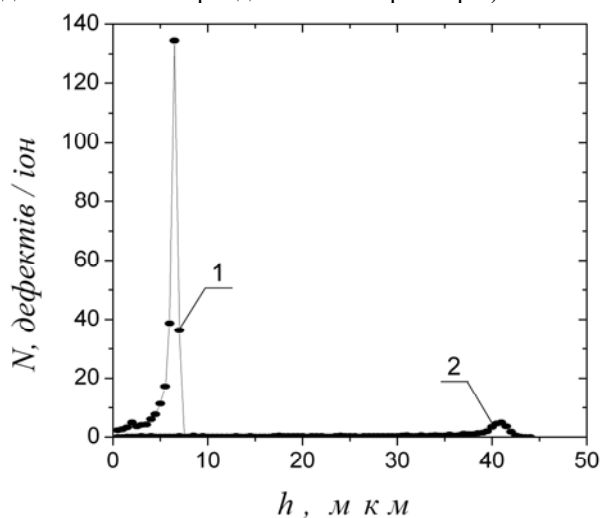


Рис. 5. Загальна кількість пар Френкеля, які утворюються в глибині Si-зразка під дією: 1 – альфа-частинок і 2 – протонів

Також відомо, що за певних умов, коли доза опромінення високоенергетичними альфа-частинками (або протонами) перевищує  $\sim 10^{17}$  іонів/см<sup>2</sup>, у напівпровідниковому зразку на глибині  $R$  починають утворюватися нанопори і порожнечі (розміром від 10 до 100 нм). Таке модифікування напівпровідників нанопористими шарами вже знайшло практичне застосування у декількох відомих технологіях: гетерування (видалення) неконтрольованих домішок з активної зони напівпровідника і “Smart cut” [8, 16]. Остання технологія широко використовується для промислового виготовлення SOI («кременій на ізоляторі») структур.

Покажемо, що застосування ЯМЗ методики ППО напівпровідникових зразків прискореними легкими іонами у комплексі з традиційними аналітичними методиками (див. таблицю) здатне розширити можливості вище зазначених технологій.

### 2.1. ТЕХНІКА ППО НА КИЇВСЬКОМУ ЯМЗ

Техніка і методологія програмованого опромінення зразка мікропучком протонів або альфа-частинок на нашій установці подібні тим, які засовують інші ЯМЗ-лабораторії світу. Зокрема, техніка ППО базується на двох системах програмованого сканування:

1) мікропучка іонів по поверхні зразка за допомогою двох електромагнітів на феритових сердечниках з програмованими джерелами живлення [4]. Ця система забезпечує переміщення

мікро пучка іонів по поверхні зразка з мінімальними кроками по  $x$ - та  $y$ -координатам на рівні 0,01 мкм і з максимальною амплітудою  $\sim 400$  мкм;

2) зразка (відносно нерухомого мікропучка іонів) за допомогою двох крокових двигунів і контролеру з ЧПУ (рис. 6). В нашому випадку ця система сканування здатна забезпечити мінімальні кроки 2-D-переміщень зразка на рівні 0,5 мкм з максимальною амплітудою на рівні 10 мм.

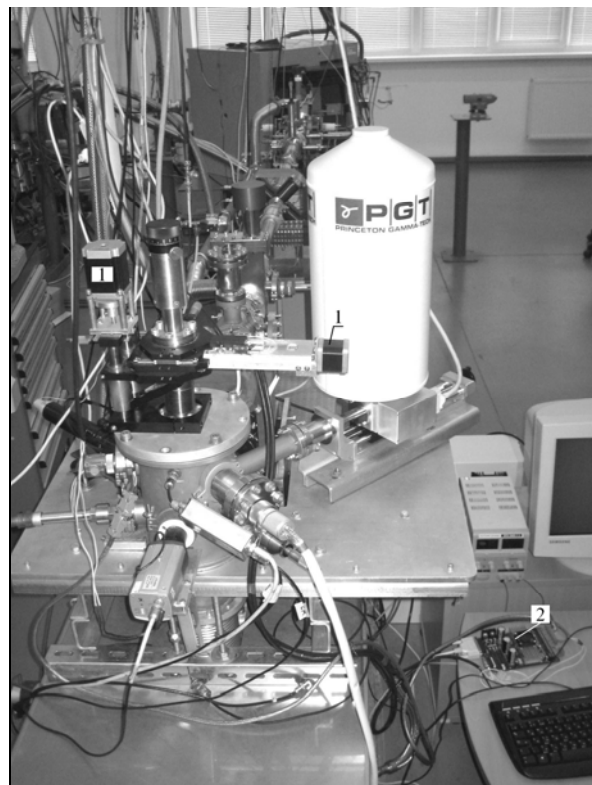


Рис. 6. Зображення мішеневої камери Київського ЯМЗ з основними елементами системи ППО: 1 – крокові двигуни; 2 – контролер з ЧПУ

### 3. ПРИКЛАД КОМПЛЕКСНОГО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИК КИЇВСЬКОГО ЯМЗ ДЛЯ АНАЛІЗУ І МОДИФІКАЦІЇ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ЗРАЗКА

Об’єкт дослідження: поверхневі шари структури Au-Si. На першому етапі експерименту, нами були застосовані методики мікроPIXE і мікроRBS з метою дослідити хімічний склад тонкої Au плівки і кременієвої основи в при поверхневій (активній) зоні структури. Вимірювання виконувалися в режимі локального опромінення зразка альфа-частинками (або протонами у випадку PIXE аналізу) з енергією 1,8 МеВ з відносно невисокими дозами  $\Phi < 10^{17}$  іонів/см<sup>2</sup> [8, 15], коли у кременію ще не утворюються РД. Одночасно підбирався такий режим ППО, який дозволяє виконати як якісний, так і подальший кількісний мікроаналіз зразку. Вище означені умови експерименту були виконані за допомогою електромагнітної системи програмованого рівномірного сканування мікропучка іонів по поверхні зразка у заздалегідь



вибраному місці. Позиціонування пучка іонів на поверхню зразка здійснювалося за допомогою механічного мікроманіпулятора та 600X оптичного мікроскопа (див. рис. 3). Розмір плями від пучка іонів на поверхні зразка складав величину  $d \sim 10$  мкм, величина струму пучка становила  $I \sim 200$  пкА, а загальна доза опромінення зразка у місці дослідження не перевищувала величину  $10^{16}$  іонів/см<sup>2</sup>.

Отриманий в такому режимі PIXE-спектр, представлений на рис. 7.

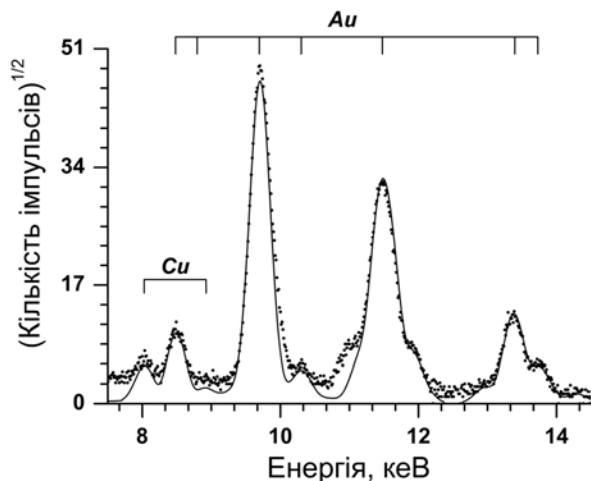


Рис. 7. Експериментальний та розрахований PIXE-спектри (лінії серій K і L для Cu і Au, відповідно) від фрагмента робочої поверхні зразка

Виконані якісний і кількісний аналізи отриманих експериментальних PIXE-спектрів дозволили зробити наступні висновки: а) Au-плівка майже рівномірно напилена на Si-основу і має товщину  $\sim 38$  мкг/см<sup>2</sup> ( $\sim 20$  нм); б) до складу золота у цій плівці входить мідь з відносною (до золота) концентрацією  $\sim 0,2$  %.

В свою чергу, RBS-методика (з дозою опромінення  $\Phi \sim 10^{16}$  іонів/см<sup>2</sup> альфа-частинками) дозволила отримати додаткову мікроаналітичну інформацію про Au-Si-структуру. А саме: а) з більш високою точністю визначити товщину Au-плівки ( $\sim 17$  нм) з похибкою на рівні 1,6 нм; б) ідентифікувати в активній зоні зразка наявність неконтрольованих домішок деяких хімічних елементів з  $2 < Z < 11$ . Зокрема, в при поверхневих шарах декількох зразків були виявлені домішки фтору. Виконані RBS-дослідження показали, що цей домішок майже рівномірно розподілений на поверхні кремнієвої основи. Найвірогідніше, що домішки фтору потрапили в активну зону на етапі травлення заготовок кремнію плавиковою (фтористоводневою) кислотою.

На другому етапі нашого експерименту, до такого зразка у визначеному вище місці дослідження було застосоване додаткове опромінення (загальною дозою  $\Phi \sim 4 \cdot 10^{17}$  іонів/см<sup>2</sup>) альфа-частинками. Одночасно виконувалися вимірювання RBS-спектру.

Порівняльний аналіз отриманого і попереднього RBS спектрів показав, що після додаткового опромінення зразка концентрація фтору в його при поверхневій зоні зменшилась майже в 5 разів.

Наведемо одне з можливих пояснень цьому ефекту. За наших умов додаткового опромінення ( $\Phi > 10^{17}$  іонів/см<sup>2</sup>), у кремнію на глибині близької до  $R \sim 6,7$  мкм, повинна була утворитися максимальна кількість РД по типу пари Френкеля і нанопори [8]. Як видно з рис. 5, в нашому випадку, значна кількість подібних РД здатна утворюватися у безпосередній близькості від активної зони (на глибині декількох мікрометрів) і сприяти процесу гетерування домішок фтору з активної зони напівпровідника.

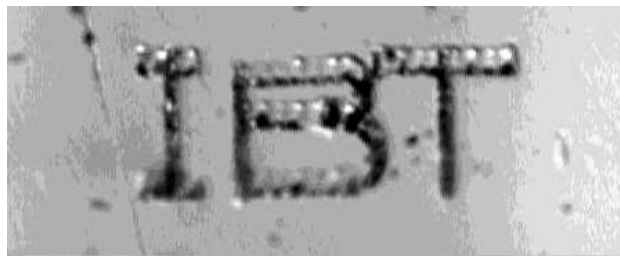
Отримані експериментальні результати комплексного застосування методик ППО і ядерного мікроаналізу добре узгоджуються з результатами попередніх досліджень [8, 15-17]. Створені на Київському ЯМЗ можливості перспективно використати для розвитку нової прецизійної і контрольованої технології модифікації (легування) напівпровідників радіаційними дефектами.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТОВИХ ІСПИТІВ ЗАСОБІВ ТЕХНОЛОГІЇ РВМ

На початку 2012 р. на Київському ЯМЗ були закладені основи технології РВМ, що базуються на методиці ППО зразка з системою прецизійного механічного сканування зразка за допомогою двох крокових двигунів і контролера з ЧПУ (див. рис. 6). За допомогою цих засобів і мікропучка протонів з енергією 1,8 MeV на поверхні ПММА-платівки були виконані мініатюрні надписи логотипів установ (рис. 8).



а



б

Рис. 8. Оптичні зображення логотипів, виконаних у приповерхневих шарах ПММА-платівки по технології РВМ

При написанні цих літер був застосований наступний режим опромінення: струм пучка протонів  $I \sim 25$  пкА, розмір плями на поверхні зразка  $d \sim 5$  мкм, загальна доза опромінення одного пікселя  $Q \sim 20$  пкКл, локальна доза опромінення зразка іонами  $\Phi \sim 0,8$  пкКл/мкм<sup>2</sup>.

Програмований рух ПММА-платівки відносно нерухомого пучка протонів здійснювався за допомогою вище згаданої системи сканування. Параметри, які задавалися у програмі руху крокових двигунів: лінійна швидкість руху зразка  $v \sim 4$  мкм/с, висота літер  $h \sim 70$  мкм.

На рис. 8,а і б показані зображення логотипів, які отримані за допомогою оптичного мікроскопа під різними кутами зору до поверхні зразка: а)  $\sim 90^\circ$  і б)  $\sim 60^\circ$  відповідно. Виміряна глибина проникнення протонів у ПММА-зразок  $R \sim 68$  мкм співпадає з величиною  $R$ , розрахованою за допомогою програми SRIM.

Отримані результати тестування головних компонентів технології PBM відповідають тим, що опубліковані у роботах [12-14]. Таким чином, на Київському ЯМЗ створені додаткові можливості щодо виготовлення 3-D мікроструктур за допомогою безмаскової технології PBM.

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

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. F. Watt. The nuclear microprobe: a unique instrument // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1997, v. B130, p. 1-8.
2. S.A.E. Johanson, T.B. Johanson. Analytical application of particle induced X-ray emission // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1976, v. 137, p.473-516.
3. W.K. Chu, J.W. Mayer, M.A. Nicolet. *Backscattering spectrometry*. N.-Y.: "Academic Press", 1978, 367 p.
4. S. Lebed, M. Tolmachov, O. Kukhareno, O. Veselov. Recent status of the Kiev nuclear probe // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2009, v. B267, p. 2013-2016.
5. Установа «Скануючий іонний зонд» лабораторії «Спектр». <http://www.prober.in>.
6. С.О. Лебедь, М.Г. Толмачов, О.Г. Кухаренко, О.О. Веселов. Методика мікроPIXE Київського скануючого мікрозонду: можливості елементного мікροаналізу // *Чернобильський науковий вісник. Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення* (38). 2011, №2, с. 49-53.
7. J.A. Van Kan, A.A. Bettio, and F. Watt. High Precision 3-D Metallic Microstructures Produced Using Proton Beam Micromachining // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2001, v. B181, p. 258-262.
8. В.В. Козловский, В.А. Козлов, В.Н. Лома-сов. Модифицирование полупроводников пучками протонов // *Физика и техника полупроводников* (2). 2000, №34, с. 129-146.
9. J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Liimark. *The Stopping and Range of Ions in Matter*. Pergamon Press. 1985, v. 1. <http://www.srim.org>.
10. M.B.H. Breese, D.N. Jamieson, P.J.C. King. *Materials analysis using a nuclear microprobe*. N.-Y.: "Wiley", 1996, 423 p.
11. J. Maxwell, J. Campbell, W. Teesdale. The Guelph PIXE software package // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1989, v. B43, p. 218-230.
12. D.G. de Kerckhove, M.B.H. Breese, M.A. Marsh, G.W. Grime. Mask less fabrication of 3-dimensional microstructures in PMMA using nuclear microprobe // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1998, v. B136-138, p. 379-384.
13. J.A. Van Kan, A.A. Bettiol, and F. Watt. High Precision 3-D Metallic Microstructures Produced Using Proton Beam Micromachining // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2001, v. B181, p. 258-262.
14. Y. Furuta, H. Nishikawa, T. Satoh, Y. Ishii, T. Kamiya, R. Nakao, S. Uchida. Applications of microstructures fabricated by proton beam writing to electro-micro filters // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2009, v. B267, p. 2285-2288.
15. M. Breese, G. Grime, and M. Dellith. The effect of ion induced damage on IBIC image // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1993, v. B7, p. 332-338.
16. K.V. Srikrishnan. *Smart-cut process for the production of thin semiconductor material films*. United States Patent, N 5882987, 1999.
17. В.І. Сорока, С.О. Лебедь, М.Г. Толмачов, О.Г. Кухаренко, О.О. Веселов. Дослідження методами ядерного мікροаналізу поверхневих наночастинок структури золото-кремній // *Український фізичний журнал* (Робота прийнята до друку).

Статья поступила в редакцию 27.08.2012 г.

## **КИЕВСКИЙ СКАНИРУЮЩИЙ ЯДЕРНЫЙ МИКРОЗОНД С МЕТОДИКОЙ ПРЕЦИЗИОННОГО ПРОГРАММИРОВАННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦА МИКРОПУЧКОМ ИОНОВ**

*С.А. Лебедь, О.Г. Кухаренко, Н.Г. Толмачев, О.В. Третьяк*

В Киеве построена высокотехнологичная установка – сканирующий ядерный микрозонд (ЯМЗ) с тремя ядерно-физическими методиками. Две из этих методик используются для микроаналитических исследований химического состава образца, а третья позволяет выполнять его прецизионное программированное облучение (ППО) микропучком протонов (или альфа-частиц) с энергией 1...2 МэВ. В статье содержится информация об основных особенностях этих методик и о технике эксперимента. Представлен пример комбинированного использования трех методик с целью выполнить последовательно (или одновременно) контролируемую модификацию полупроводникового образца радиационными дефектами и микроанализ его состава. Показано, что ввод в эксплуатацию методики ППО на Киевском ЯМЗ открывает дополнительную возможность для изготовления 3-D микроструктур по новой безмасочной технологии.

## **KYIV SCANNING NUCLEAR MICROPROBE WITH PRICISE PROGRAMING IRRADIATION TECHNIQUE OF SAMPLE BY ION MICROBEAM**

*S.A. Lebed, O.G. Kukharenko, N.G. Tolmachov, O.V. Tretiak*

The scanning nuclear microprobe (NMP) with three nuclear physic techniques is constructed in Kyiv. The NMP is high technology set up. Two of the above mentioned techniques are used for micro analytical studies of chemical element contamination in the specimen. The third technique allows performing the precise programming irradiation (PPI) of the sample by 1...2 MeV protons (or alpha particles). The peculiarities and hardware of the techniques are described in this paper. There is an example of combined application of third techniques for performing of controlled modification of semiconductor specimen by radiation-induced defects and micro analysis of its composition, sequentially or simultaneously. It is presented that PPI technique of the Kyiv NMP opens an additional possibility for mask less fabrication of 3-D microstructures using new technology.