

*In article reviews the main scope applying of the elemental analysis of solids, which is very important for the development of modern science. The more detail reviews the layered analysis by secondary ion mass spectrometry. Also outlines the advantages and disadvantages of layered analysis.*

**Keywords:** *elemental analysis, secondary ion mass spectrometry, layered analysis.*

УДК621.384.653; 538.97; 539.12.04

**С.В. Кулініч**

*Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка*

## **ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ АНАЛІТИЧНОГО ПРИСКОРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ**

### **1. Вступ**

В ядерних дослідженнях основними джерелами частинок високих енергій у наш час є прискорювачі. Збільшення енергії заряджених частинок у прискорювачах відбувається внаслідок дії на них електричного поля. Прискорювальні частинки не повинні зазнавати зіткнень з молекулами повітря. З цією метою їх прискорюють у вакуумі, а тому всі прискорювачі є вакуумними установками. За способом розгону частинок прискорювачі можуть бути нерезонансними та резонансними. За формою траєкторії руху прискорених частинок прискорювачі поділяють на лінійні і циклічні.

За обладнанням і принципом дії вони відносяться до фізичної електроніки і радіотехніки надвисоких частот. Залежно від елементарних частинок розроблені різні типи прискорювачів. Так, прискорювачі для протонів,  $\alpha$ -частинок та важких іонів непридатні для прискорення електронів. Енергія прискорених заряджених частинок змінюється в межах від декількох МеВ до сотень гігаелектрон-вольт (ГеВ). Верхня межа визначається не принциповими ускладненнями, а рівнем розвитку техніки прискорювачів. Ця межа постійно підвищується приблизно на порядок за десятиріччя.

Актуальністю роботи є те, що роль прискорювачів у ядерній фізиці і особливо у фізиці елементарних частинок вирішальна. Крім застосування у фізиці, прискорювачі використовуються в хімії, біофізиці, геофізиці, медицині.

Метою роботи є з'ясувати основні принципи роботи лінійних прискорювачів та розглянути їх будову, історію розвитку та класифікацію.

Роботу поділено на три розділи. В першому та другому розділі розглядається загальна теорія та принцип роботи прискорювачів. Третій розділ присвячено аналітично - прискорювальному комплексу "Сокіл".

В останні роки знайшли широке застосування ядерно - фізичні методи аналізу (ЯФМА) з використанням пучків заряджених частинок. Ці методи є хорошим доповненням до існуючих методів елементного аналізу, а в ряді випадків дозволяють вирішувати завдання, які не можуть бути вирішені іншими методами.

У ННЦ ХФТІ окремі роботи з розробки та застосування ЯФМА проводилися ще в 60-70-х роках минулого століття [1-2]. При цьому використовувалося обладнання, створене для проведення досліджень в галузі ядерної фізики. В 1983 р. в ННЦ ХФТІ

був створений малогабаритний електростатистичний прискорювач, який став основою для аналітичної установки з використанням ЯФМА [3-4]. Така установка в різних комплектаціях була поставлена в ряд організацій країн СНД. У минулі роки тривала робота щодо її вдосконалення, і в даний час розроблений набір експериментального обладнання, який дозволяє реалізувати всі основні можливості миттєвих ядерно-фізичних методів.

## 2. Аналітичний ядерно - фізичний комплекс «Сокіл»

Аналітичний ядерно - фізичний комплекс (АЯФК) «Сокіл» ІПФ України складається з наступних основних елементів:

- електростатичного прискорювача горизонтального типу з вихідними пристроям;
- експериментальних камер для застосування набору ЯФМА ;
- вимірювально -обчислювального устаткування, що дозволяє управляти роботою комплексу та автоматизувати обробку результатів експерименту.

### 2.1. Прискорювач і вихідні пристрої [4]

Зовнішній вигляд електростатичного прискорювача зображений на рис. 1. Прискорювач має наступні параметри:

- енергія прискорених однозарядних іонів 0,2... 2 MeV;
- стабільність і моноенергетичність іонів 0,04... 0,07 %;
- струм іонів пучка на прямому виході 50 мкА;
- струм іонів пучка після аналізатора 20 мкА;
- прискорювані іони водень, гелій та інші іони газів.

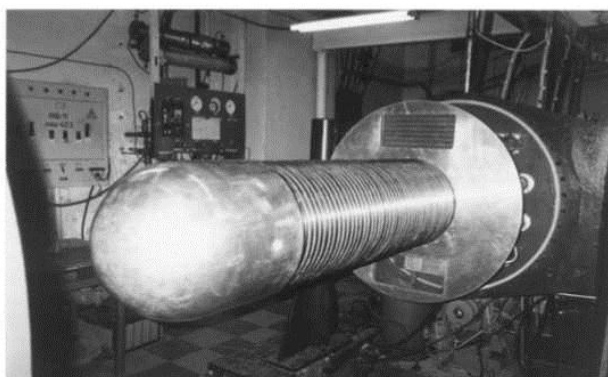


Рис. 1. Малогабаритний електростатичний прискорювач

Вихідні пристрої складаються із іонопроводів з системами спостереження і вимірювання пучка, розрахункового магніту. Розрахунковий магніт одночасно є і мас-аналізатором і дозволяє відхиляти пучок прискорених іонів заданої маси по п'яти експериментальним каналах. Три канали розташовані зліва по ходу пучка (канал № 1 - 45 °, № 2 - 26 °, № 3 - 6 °) і два- праворуч (канал № 4 -26 °, № 5 - 45°).

На каналах № 1, 2, 4 встановлені експериментальні камери, які дозволяють проводити дослідження за допомогою наступних ЯФМА:

- миттєвого випромінювання з ядерних реакцій ( NRA, PIGE );
- характеристичного рентгенівського випромінювання, збуджуваного протонами (PIXE);

- зворотного Резерфордського розсіяння ( RBS);
- вторинного рентгенівського випромінювання ( PXX );
- методу ядер віддачі ( ERD ).

На каналі № 5 розташований «протонний мікрозонд», який створює пучок прискорених протонів з поперечним перерізом  $3 \times 5$  мкм і дозволяє проводити дослідження за допомогою методів RBS, PIXE, PIGE.

Канал № 3 дозволяє транспортувати пучки прискорених іонів водню, азоту і інертних газів до ксенону. Використовується для опромінення твердотільних зразків. Загальний вигляд АЯФК «Сокіл» зображений на рис. 2.

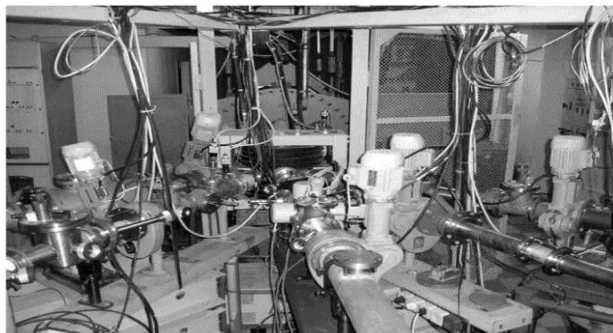


Рис. 2. АЯФК «Сокіл»

## 2.2. Камера "ХРІ"

Камера "ХРІ" розташована на каналі №1, встановлена на юстирувальному столі і має незалежне вакуумне відкачування. Усередині камери розташований утримувач зразків револьверного типу, в якому може бути закріплено 24 товстих або тонких мішені. Площина опромінюваної мішені перпендикулярна пучку, що падає. Камера ізолювана від іонопровода і юстирувального столу, і може використовуватися як циліндр Фарадея

У камері "ХРІ" існує два канали для реєстрації рентгенівського випромінювання. Детектори розташовуються симетрично по відношенню до пучка протонів під кутом  $135^\circ$ . При цьому перший детектор має меншу чутливу площу і товщину, кращий енергетичний дозвіл, і призначений для реєстрації х.р.в. від легких елементів. Другий детектор має значну товщину і площину, і призначений для реєстрації х.р.в. К-серії від атомів елементів з порядковими номерами  $>40$ . В якості першого детектора, як правило, використовується Si(Li)-детектор, другий детектор може бути як Si(Li), так і HpGe, в окремих випадках на це місце може бути встановлений Ge(Li)-детектор. Перед кожним з детекторів розташовується коліматор рентгенівського випромінювання [5,6].

## 2.3. Установка "Рентген"

На виході № 2 встановлена установка "Рентген" [7], яка дозволяє виводити пучок протонів в атмосферу через тонку фольгу. Характерна товщина фольги з різних матеріалів знаходиться в межах від одного до декількох мікрон.

Функціонально установка "Рентген" може бути розбитий на три частини. Перша містить систему електростатичного відхилення пучка протонів. Друга – система аварійного захисту, оскільки є вірогідність ушкодження випускної фольги і, як наслідок, ушкодження елементів аналітичного комплексу. Система аварійного захисту складається з аварійного клапана з механізмами взводу і спрацьовування, і системи

детектування тиску, яка видає сигнал спрацьовування клапана при заданому тиску. Одночасно робиться виключення двигуна транспортера зарядів, блоку зарядки і спрацьовує вакуумний затвор, що відділяє прискорювальну трубку від іонопровода. Третім вузлом є аналітичний блок з елементами випуску пучка іонів в атмосферу, кріплення мішеней і детектувальної апаратури, юстирувальних пристроїв. Він також може бути трансформований для отримання рентгенівського випромінювання від вторинних випромінювачів з надчистих матеріалів і проведення рентгенофлуоресцентного аналізу (метод PXX) [8]. Для поліпшення відношення сигнал/фон відбір первинного характеристичного випромінювання робиться під кутом 1350, а реєстрація вторинного випромінювання під 900. Така модифікація установки підвищує селективність аналізу і дозволяє вирішувати завдання аналізу об'єктів з поганою електропровідністю і рідини.

#### 2.4. Універсальна камера

Ця камера встановлена на виході № 4. У камері реалізовані наступні методи аналізу матеріалів: PIXE, RBS, PIGE, ERD. У іонопроводі перед камерою розташована система моніторингу пучка із стабільністю не гірше 0.3 %. В камері встановлений гоніометр з трьома обертальними і одним поступальним ступенем свободи. Гоніометр дозволяє здійснювати кутове сканування мішені під пучком з точністю 0.02 і поступальне переміщення з точністю 0.01 мм. Камера оснащена трьома поверхнево-бар'єрними детекторами (ПБД), детектором рентгенівського випромінювання і детектором випромінювання. ПБД мають незалежні поступальні і обертальні ступені свободи. Детектор для виміру спектрів зворотного розсіяння розташовується під кутом 170° по відношенню до пучка. ПБД великої площі зі змінними поглиначами призначений для реєстрації продуктів реакцій (p,α) і (α,p). Детектор для реєстрації протонів віддачі при аналізі зразків на зміст водню розташовується під кутами 30... 60°. Si(Li) -детектор розташований під кутом 140° по відношенню до пучка. Ge(Li) -детектор, розташований під кутом 90° по відношенню до пучка, оточений свинцевим циліндричним екраном завтовшки 20 мм для зменшення фону. Відкачування камери до залишкового тиску 10<sup>-4</sup> Па забезпечується турбомолекулярним насосом з азотною пасткою, розташованою безпосередньо в камері.

#### 2.5. Протонний мікрозонд

На каналі № 5 встановлений ядерний мікрозонд (ЯМЗ) [9, 10]. На ЯМЗ реалізовані наступні методи аналізу матеріалів: PIXE, RBS, PIGE.

Основні іонно-оптичні параметри системи формування ЯМЗ наступні

відстань від першої діафрагми до першої лінзи дублету, м	2.55;
ефективна довжина лінз, м	0.05;
відстань між лінзами дублету, м	0.05;
відстань від другої лінзи до площини мішені, м	0.17;
збудження першої лінзи	0.592317;
збудження другої лінзи	-0.719344;
магнітна індукція на полюсі, перша лінза, Тл	0.171996;

магнітна індукція на полюсі, друга лінза, Тл	-0.253679;
коефіцієнт зменшення в горизонтальній площині $M_x^{-1}$	-5.034;
коефіцієнт зменшення у вертикальній площині $M_y^{-1}$	-23.437;
енергія протонів, МеВ.	1,1 1.7
струм пучка з розмірами $\sim 5$ мкм, нА	2.

Установка ЯМЗ (рис.3) складається з наступних вузлів і систем: колімаційної системи; фокуруючої системи; вакуумної системи; антивібраційного столу; камери мішені; системи збору і накопичення спектрометричної інформації. За допомогою мікрозонда можна реалізувати аналіз зразка в режимі лінійного сканування пучком і аналіз у вибраній точці на поверхні зразка.

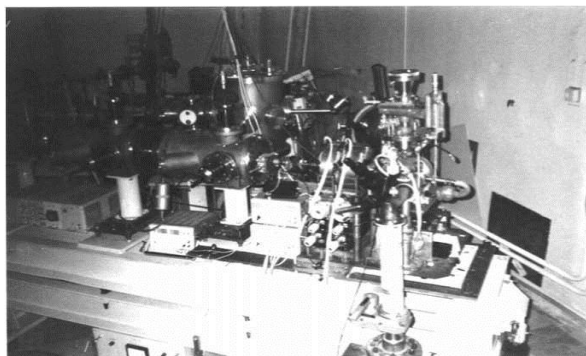


Рис. 3. Загальний вигляд установки ЯМЗ

## 2.6. Канал опромінення матеріалів[11]

Високочастотне джерело іонів, використовуване на прискорювачі, може забезпечити пучки іонів практично усіх газів, тому ставилося завдання створити канал опромінення матеріалів, який дозволяв би транспортувати іони з енергією в діапазоні 0.2... 2 МеВ з масами аж до ксенону.

Для створення каналу опромінення використаний прямий вихід камери роздавального магніта(канал № 3).

При опроміненні зразків іонами водню, вуглецю, азоту і кисню необхідно проводити розділення іонів пучка по масах, оскільки в прискореному пучку є як атомарні, так і молекулярні іони. Тому канал опромінення необхідно було розташувати під деяким кутом по відношенню до первинного напрямку пучка. Кут повороту пучка вибирався, виходячи з геометричних розмірів приміщення і конструкційних особливостей установки. Максимально можливим виявився кут повороту  $5^{\circ}40'$ , що відповідає радіусу повороту пучка іонів, рівному 2.5 м. При такому радіусі повороту роздавальний магніт дозволяє транспортувати в канал опромінення важкі іони аж до ксенону з енергією 2 МеВ.

Схема каналу випромінювання показана на рис.3.6. Він складається з наступних основних вузлів: щілинного приладу(1); системи розгортки(2); камери опромінення(3); системи вакуумного відкачування; ділянок іонопровода; підставок з системами юстирування.

Щілинний прилад виконує дві функції – він є вихідною шпарою мас-аналізатора і одночасно елементом системи стабілізації енергії прискорених іонів.



Важливим вузлом каналу опромінення є система розгортки пучка. Вибрана електростатична система розгортки, оскільки вона забезпечує однакове відхилення іонів пучка незалежно від маси.

Основні параметри системи розгортки каналу опромінення матеріалів наступні:[13]

діапазон енергій пучка іонів	0.2... 2 MeV;
діаметр пучка іонів	~ 2 мм;
метод відхилення пучка	електростатичний;
частота розгортки пучка по осі «Х»	...260 Гц;
частота розгортки пучка по осі «У»	4 кГц;

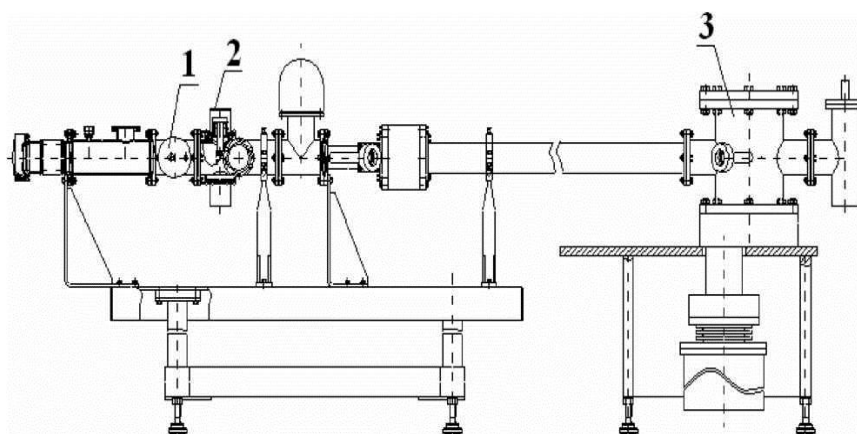


Рис. 4. Схема каналу випромінювання

відстань між пристроєм і мішенню	1800 мм;
непостійність дози опромінення по «кадру»	~10%(±5%);
відстань між пластинами, що відхиляють, 10 мм;	
довжина пластини	100 мм;
ширина пластини	30 мм;
максимальна різниця потенціалів між пластинами	4 кВ;
розмір області опромінення по осях Х і У	
регулюється незалежно від 0 до 40 мм	

Блок живлення скануючого пристрою складається з трьох модулів: живлення, високовольтних підсилювачів, управління.

Модуль живлення забезпечує стабілізованим електроживленням  $\pm 12$  В, +9 В, +5 В і нестабілізованим +5 кВ усі інші модулі блоку. Модуль високовольтних підсилювачів складається з чотирьох підсилювачів, які виконані на лампах 6П13С і мають коефіцієнт посилення сигналу по напрузі близько 500. Вихідні сигнали з підсилювачів подаються на пластини скануючого пристрою. Сигнали, що управляють, на модуль поступають з модуля управління. Модуль управління робить чотири напруги трикутної форми, які управляють високовольтними підсилювачами. Напруга попарно погоджена між собою по фазі, їх амплітуда залежить від енергії пучка іонів і від розмірів ділянки мішені, яка сканується; частота повторення імпульсів залишається постійною.

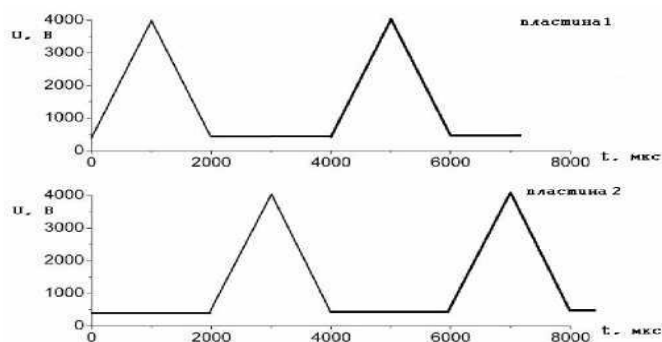


Рис. 5. Крива зміни напруги на пластинах

Крива зміни напруги на пластинах "Х" представлена на рис.5. Форма кривої напруги на пластинах "У" така ж.

Камера зразків створена на базі універсального вакуумного поста ВУП-4 і дозволяє при опроміненні використати його стандартне оснащення (нагрівач, охолоджувач, системи кріплення зразків). Камера оснащена новою системою відкачування на основі турбомолекулярного насоса, який дозволяє підтримувати залишковий тиск газу в камері під час опромінення на рівні  $5 \cdot 10^{-4}$  Па; передбачена можливість регулювання температури утримувача зразка в діапазоні від 80 до 450К.

### 3. Висновок

АЯФК «Сокіл», оснащений таким складом експериментального обладнання, дозволяє вирішувати широке коло аналітичних завдань в галузі матеріалознавства, екології, біології, медицини, а також проводити опромінення зразків іонами для вирішення різних завдань матеріалознавства.

### Література

1. Гусева М.И., Инопин Е.В., Цытко С.П. Глубина проникновения и характер распределения вбитых атомов в изотопной мишени Si 30 // ЖЭТФ. – 1959. – Т. 36. – С. 3-8.
2. Сторишко В.Е. Применение ускорителей в народном хозяйстве// ВАНТ. Сер.: Общая и ядерная физика. – 1983. – Вып. 3(24). – С. 3-5.
3. Вергунов А.Д., Левченко Ю.З., Новиков М.Т. и др.// Там же. – 1983. – Вып. 3(24). – С. 13.
4. Батвинов Л.П., Вергунов Ф.Д., Глазунов Л.С. и др.// ВАНТ. Сер.: Техника физического эксперимента. – 1985. – Вып. 1(22). – С. 26.
5. Батвинов Л.П., Ехичев О.П., Левенец В.В. и др. Устройство для рентгенофлуоресцентного анализа. – А. С. №1498205, 1989.
6. Levenets V., Ekhechev O., Omelnyk O., Shchur A. The modular installation "Analysis" for IBA // 10-th Inter. Conf. on "Particle Induced X-ray Emission and its Analytical Application", 4 - 8 June 2004, Ljubljana, Slovenia. Abstracts. – P. 53.
7. Батвинов Л.П., Ехичев О.И., Левенец В.В. и др. Установка для рентгенофлуоресцентного элементного анализа. – А. С. №1331254, 1987.
8. Левенец В.В., Батвинов Л.П., Ехичев О.И. и др. Устройство для проведения рентгенофлуоресцентного анализа на ускорителе тяжелых ионов// Материалы 6-й Междунар. конф. «Взаимодействие излучения с твердым телом», ВИТТ-2005. – Минск, 2005. – С. 393-395.

9. Бондаренко В.Н., Гончаров А.В., Колот В.Я., Сухоставец В.И. Установка ядерный микрозонд// Тр. XII Междунар. конф. по электростатическим ускорителям, 25-28 нояб. 1997 г. – Обнинск: ГИЦ РФ Физико-энергетический институт, 1997. – С. 86-89.
10. Bondarenko V.N., Goncharov A.V., Kolot V.Ya. Development of NSC KIPT nuclear microprobe // ВАНТ. Сер.: Ядерно-физические исследования. – 1999. – №4(35). – С. 98-101.
11. Glazunov L.S., Goncharov A.V., Zats A.V. et al. Channel for ion irradiation of materials at the accelerator “Sokol” // Problems of Atomic Science and Technology. Series: “Nuclear Physics Investigation”. – 2006. – No. 2(46). – P. 184-186.

**Анотація.** Кулініч С.В. Фізичні основи роботи аналітичного прискорювального комплексу. Описано склад та функціональні можливості аналітичного ядерно-фізичного комплексу «Сокіл» на базі малогабаритного електростатичного прискорювача.

**Ключові слова:** прискорювач, Сокіл, канал.

**Аннотация.** Кулинич С.В. Физические основы работы аналитического ускорительного комплекса. Описаны состав и функциональные возможности аналитического ядерно-физического комплекса «Сокол» на базе малогабаритного электростатического ускорителя.

**Ключевые слова:** ускоритель, Сокол, канал.

**Annotation.** S.V. Kulinich. Physical basis of accelerating COMPLEX ANALYTICAL. The description of structure and functionalities of an analytical nuclear-physical complex "Sokol" is submitted on the basis of the small-sized electrostatic accelerator.

**Keywords:** Accelerator, Falcon, Channel.

УДК 37.033:502.2-057.874:53.01/04”312”

**О.Ю. Лазаренко**

*Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка*

## МЕТОДОЛОГІЯ ПРИРОДОЗНАВСТВА ЯК ЗАСІБ ФОРМУВАННЯ В УЧНІВ СУЧАСНОЇ ФІЗИЧНОЇ КАРТИНИ СВІТУ

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується прискоренням темпів життя, наростанням потоків інформації, швидким розвитком науки і техніки, очікуванням глобальних екологічних і техногенних катастроф. Для того щоб реалізуватися в такому суспільстві, людина повинна мати великі знання з усіх галузей науки і культури, вміти самостійно і критично мислити, швидко орієнтуватися, вміти брати на себе відповідальність. Але дослідження Всеросійського центру вивчення громадської думки показують, що для реальної людини характерні: метафізичність мислення, матеріально-прагматична система цінностей, несформованість моральних уявлень, труднощі у самовизначенні та самореалізації.