

ПРИСКОРЕННЯ ІОНІВ ^{14}N НА ЦИКЛОТРОНІ У-120. ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ

С. В. Адаменко¹, А. Є. Борзаковський², О. Ю. Горюнов²,
В. І. Куц², В. О. Рилошко², М. Г. Толмачов¹, А. А. Шведов²

¹ ТОВ «Фірма Т.М.М.», Київ

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

На циклотроні класичного типу У-120 Інституту ядерних досліджень НАН України освоєно новий спектрометричний режим – отримано виведений інтенсивний пучок $^{14}\text{N}^{++}$ з енергією 8,7 МеВ. З використанням часопрольотної методики отримано спектри зворотного розсіяння на різних зразках, що містять важкі елементи на поверхні легкої матриці. Показано можливість застосування такого пучка для індикації мікрокількостей важких елементів (10^{11} атом./см²) на поверхні легкої матриці.

Вступ

На циклотроні У-120 Інституту ядерних досліджень НАН України проведена робота по освоєнню режимів прискорення важких іонів. Робота виконувалась у рамках програми досліджень Електродинамічної лабораторії “Протон-21” (Київ). Метою роботи було розширення спектра частинок, які можна прискорювати, і можливостей використання циклотрона У-120 для фундаментальних досліджень та прикладних задач.

Перші роботи з прискорення важких іонів на циклотроні У-120 було виконано більш 10 років тому, коли були прискорені іони ^{12}C [1] і проводилися роботи з прискорення іонів азоту та бору, які використовувались для імплантації у зразки. Зараз ці роботи було продовжено й отримано виведений пучок іонів $^{14}\text{N}^{++}$ з енергією 8,7 МеВ для спектрометричних задач.

Досліджувалась можливість використання циклотронних пучків такої енергії для елементного аналізу. За методом резерфордівського зворотного розсіяння (РЗР) на виведеному пучку $^{14}\text{N}^{++}$ з використанням часопрольотної методики отримано спектри зворотного розсіяння на різних зразках. Визначено параметри пучка та методики вимірювань.

Циклотрон У-120

Режим прискорення іонів азоту визначався мінімально необхідною перебудовою базових елементів циклотрона У-120 із збереженням можливостей повернення до режимів прискорення легких іонів.

Попередні значення параметрів базових елементів циклотрона для прискорення іонів азоту – частота генератора, величина напруги на дуантах, джерело іонів, резонансна система – визначалися з розрахунків, які наведено в роботі [2]. Розраховані значення були початковими й у процесі налаштування визначалися їхні робочі значення.

Перед зміною режимів роботи було проведено профілактику всіх систем циклотрона із заміною, де це можливо, старої елементної бази на нову. У таблиці наведено значення основних параметрів циклотрона У-120 для прискорення іонів азоту в порівнянні з прискоренням α -частинок.

Для одержання іонів азоту використовувалося стандартне іонне джерело. Як робочий газ використовувався сухий азот 99,9 % чистоти. Було випробувано два типи катодів: танталовий та вольфрамовий. Кращі результати було отримано з вольфрамовим катодом – більший іонний струм й час роботи джерела (80 год) порівняно з танталовим катодом. Танталовий катод забезпечував 30 год безупинної роботи джерела. Було виявлено, що максимальний іонний струм іонів $^{14}\text{N}^{++}$ досягався при зменшенні напуску газу до значень 0,4 - 0,6 см³/хв.

© С. В. Адаменко, А. Є. Борзаковський, О. Ю. Горюнов, В. І. Куц,
В. О. Рилошко, М. Г. Толмачов, А. А. Шведов, 2005

Режими роботи систем циклотрона У-120 при прискоренні α -частинок і іонів $^{14}\text{N}^{++}$

Параметри циклотрона	α -частинки	Іони ^{14}N
Різниця потенціалів на дуантах, кВ	75...80	75...80
Магнітна індукція поля, Тл	1,35	1,4
Частота прискорюючого поля, МГц	10,8	9,3
Напруга горіння дуги, В	130...150	130...150
Струм дуги, А	1...2	1...2
Швидкість напуску газу в обсяг джерела (витрата газу), $\text{см}^3/\text{хв}$	4...6	0.4...0.6
Напруга на дефлекторі, кВ	35...45	10...13
Внутрішній струм, мкА	10	5...10
Зовнішній струм, мкА	5	2...5
Струм обмоток фокусуєчих лінз, А	27...30 49...52	27...30 49...52
Струм обмоток поворотного магніту, А	39...41	39...41
Енергія прискорених частинок, МеВ	27,2	8,7
Енергія на нуклон, МеВ/нуклон	6,8	0,62

Для перебудови резонатора на робочу частоту при прискоренні іонів азоту його пластини було висунуто на відстань 150 см від положення для звичайного режиму.

У середині циклотрона на вході в систему, що відхиляє пучок, було отримано струм іонів $^{14}\text{N}^{++}$ 5 - 10 мкА. Струм на виході циклотрона після дефлектора складав 3 - 5 мкА. Далі пучок фокусувався квадрупольними лінзами й через поворотний магніт та систему коліматорів попадав у центр камери розсіяння. Струм на мішені вибирався, виходячи з умов експерименту, і становив 1 - 5 нА. При цьому завантаження детектуючої системи не перевищували 10^3 імп./с. Форма пучка на мішені була близька до кола з діаметром 3,5 мм.

Експеримент

Оскільки ядерні реакції на всіх елементах таблиці Менделєєва з виходом заряджених частинок під дією іонів азоту мають позитивну енергію реакції [3], то для реєстрації й ідентифікації пружно розсіяних частинок застосовувалась методика за часом прольоту [4]. У камері розсіяння на відстані 52 см від мішені було встановлено напівпровідниковий кремнієвий детектор завтовшки 300 мкм, власна роздільна здатність якого була 0,5 %. Діафрагма на детекторі була $\varnothing 3$ мм. Тілесний кут становив $\Omega = 2,6 \cdot 10^{-5}$ ср.

Сигнали від детектора подавалися на попередній підсилювач, який має як швидкий (Т), так й аналоговий енергетичний (Е) виходи. Сигнал зі швидкого виходу подавався на швидкий підсилювач і після швидкого формування був сигналом "старт" перетворювача "час - амплітуда". Для часової прив'язки та формування сигналу "стоп" використовувалися високочастотні імпульси напруги циклотрона У-120. З правого дуанта прискорювача через атенуатор високочастотна напруга подавалася на швидкий формувач. Сформовані імпульси через лінію затримки подавалися на вхід "стоп" перетворювача "час - амплітуда".

Перетворювач "час - амплітуда" формувал аналогові сигнали А з амплітудою, що пропорційна часу прольоту частинки від мішені до детектора

$$T = T_{\text{старт}} - (T_{\text{стоп}} + T_{\text{запр}}).$$

Важливо, що параметр Т не залежить від характеристик пучка прискорювача. Далі сигнал Т подавався на вхід кодувальника двомірного аналізатора, а на вхід лінійної схеми збігів подавався підсилений сигнал з виходу Е попереднього підсилювача.

Двовимірні спектри статистичної інформації накопичувалися системою MANY з використанням спектрометричного комплексу VLADO [5]. На отриманих двовимірних

спектрах вибиралися ділянки (локуси), що відповідають пружно й непружно розсіяним іонам азоту. За програмою [5] із двовірних спектрів будувалися енергетичні спектри: номер каналу – число подій, з яких було отримано енергетичні спектри зареєстрованих частинок.

Для визначення енергії іонів $^{14}\text{N}^{++}$ було отримано спектри РЗР на мішенях із чистих металів природного складу міді, срібла, вольфраму, золота та свинцю під кутами 120, 135 і 150°.

Значення енергій високоенергетичних країв спектрів або піків (для тонких мішеней) визначалися в порівнянні з каліброваним спектром α -частинок від джерела ^{226}Ra . За цими значеннями визначалася початкова енергія іонів азоту, яка з урахуванням розкиду енергії в пучку була $E^{14}\text{N}^{++} = 8,7 \pm 0,3 \text{ MeV}$.

Двовірний спектр іонів $^{14}\text{N}^{++}$, пружно розсіяних на мішені – тонкому шарі золота товщиною 300 Å, нанесеному на товстий кремній, наведено на рис. 1. Кут реєстрації 120°.

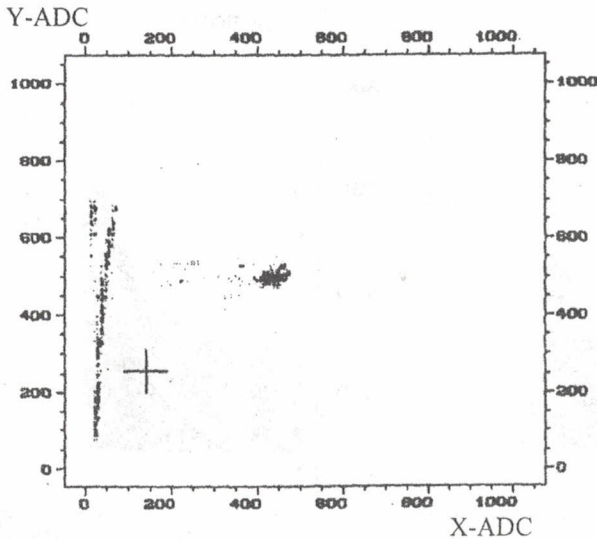


Рис. 1. Двовірний спектр пружного розсіяння іонів азоту на зразку кремнію (300 мкм) з напиленим шаром золота товщиною 300 Å. Вісь x – час прольоту T , вісь y – енергія E у каналах.

Енергетичний спектр $^{14}\text{N}^{++}$, отриманий із двовірного спектра рис. 1 виділенням локусу $^{14}\text{N}^{++}$ і проекцією його на енергетичну вісь, показано на рис. 2, *a* графік 1. На рис. 2, *б*, для порівняння, наведено спектр α -частинок із джерела ^{226}Ra . Напівширина піка $^{14}\text{N}^{++}$ для „тонкої” мішені 320 кеВ. З урахуванням втрат у мішені та детекторі енергетичний розкид пучка $^{14}\text{N}^{++}$ був 310 кеВ або 3,6 %. Роздільна здатність по часу визначалась проекцією локусу на часову вісь й становила 2,5 нс.

Стабільність роботи в часі прискорювача та спектрометричного тракту перевірялася порівнянням отриманих у різний термін енергетичних спектрів пружного розсіяння іонів азоту на ядрах золота. Як приклад, на рис. 2, *a* порівнюються енергетичні спектри пружно розсіяних іонів $^{14}\text{N}^{++}$

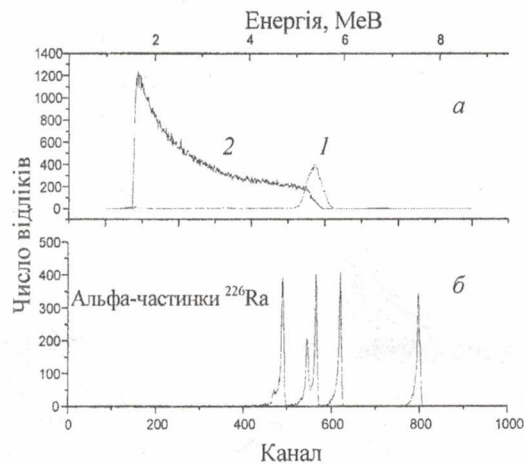


Рис. 2. Енергетичні спектри пружного розсіяння іонів азоту на „тонкому” (1) та „товстому” (2) золоті (*a*) і спектр α -частинок ^{226}Ra (*б*).

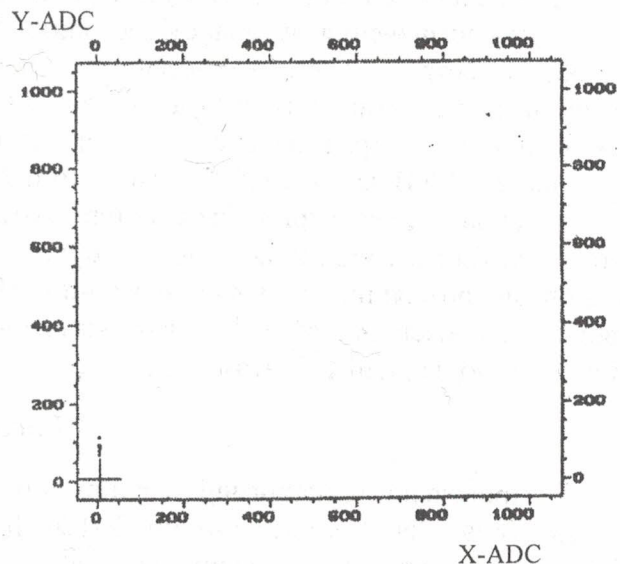


Рис. 3. Фон апаратури за 6 год експозиції. Вісь x – час прольоту T , вісь y – енергія E у каналах.

на кут $\Theta = 120^\circ$ на "тонкому" (товщиною 300Å) і "товстому" золоті відповідно, які було отримано з різницею в кілька днів. Параметри пучка - енергія пучка і повна енергетична роздільна здатність - не змінилися з часом, що говорить про стабільну роботу прискорювача й спектрометричного тракту.

Для визначення фонових і шумових характеристик методики було проведено шестигодинну експозицію на пучку без мішені. Отриманий двовимірний спектр показано на рис. 3.

Як приклад роботи методики, на рис. 4 наведено двовимірні спектри пружно розсіяних іонів азоту на кут 120° на зразках міді, срібла та золота з експозиціями 10, 4,5 і 4 год відповідно.

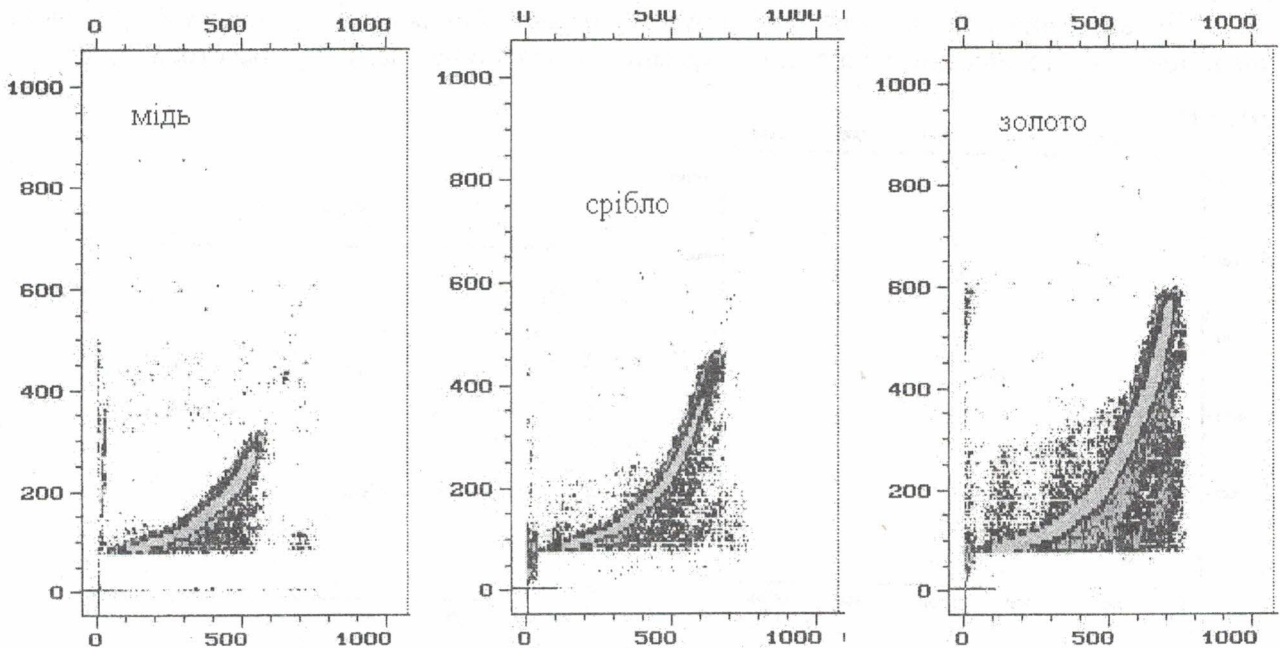


Рис. 4. Двовимірні спектри, отримані на зразках міді, срібла та золота. По осі x відображено енергію іонів, по осі y - час прольоту в каналах.

У межах отриманих локусів заряджених частинок досліджувались ділянки спектрів за високоенергетичним краєм, які відповідають розсіянню на атомах матеріалу зразків. На спектрах наявні події, що відповідають розсіянню на домішках елементів з масами ≤ 208 .

Для визначення чутливості методики було отримано спектри від зразка лавсанової плівки діаметром 2 см з внесеним у неї ^{238}Pu . Вміст ізотопу ^{238}Pu визначався за вимірюванням активності зразка (11 Бк) і становив 10^{11} атом./см 2 . На рис. 5 показано двовимірний спектр, а на рис. 6 - енергетичний спектр пружного розсіяння іонів $^{14}\text{N}^{++}$ з енергією 8,7 MeV на кут 130° . Час експозиції 7 год.

На даному спектрі добре спостерігаються піки від розсіяння іонів $^{14}\text{N}^{++}$ на елементах, що містяться в матриці плівки, до якої було внесено ^{238}Pu , та поодинокі відліки у ділянці, яка відповідає розсіянню на ядрах плутонію. Це демонструє можливість індикації методом зворотного розсіяння іонів $^{14}\text{N}^{++}$ важких елементів, які містяться на поверхні легкої матриці зі щільністю на рівні 10^{11} атом./см 2 .

Висновки

Проведено технологічні дослідження режиму прискорення й отримано виведений пучок іонів $^{14}\text{N}^{++}$ на циклотроні У-120 Інституту ядерних досліджень НАН України. Визначено енергію прискорених іонів $^{14}\text{N}^{++}$ - $E = 8,7 \pm 0,3$ MeV.

З використанням методики ідентифікації продуктів ядерних реакцій за часом прольоту методом РЗР проведено вимірювання спектрів іонів $^{14}\text{N}^{++}$ на „товстих” і „тонких” мішенях на кути $\Theta_{\text{л.с.}} > 120^\circ$. Показано принципову можливість використання даного пучка

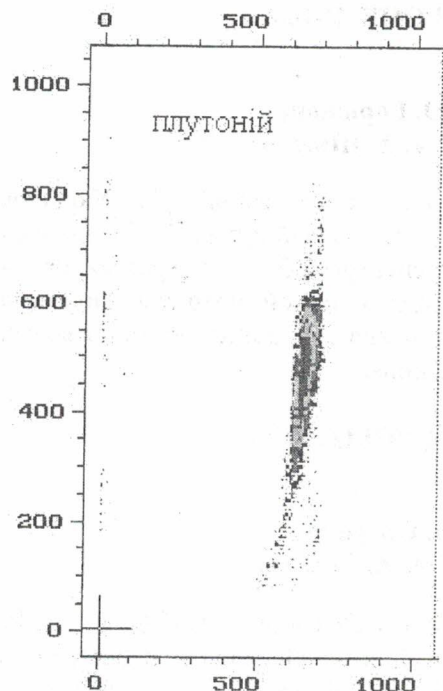


Рис. 5. Двомірний спектр зворотного розсіяння $^{14}\text{N}^{++}$ на зразку, що містить плутоній. По осі x відображено енергію іонів, по осі y – час прольоту в каналах.

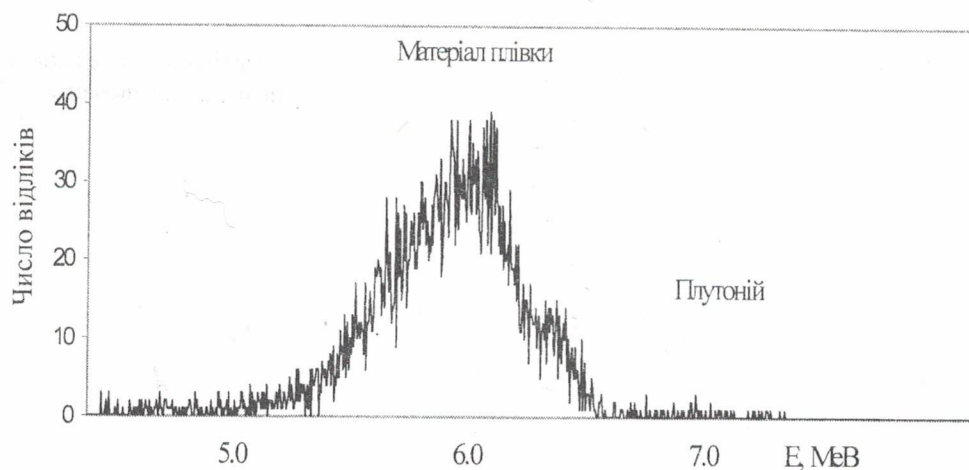


Рис. 6. Енергетичний спектр $^{14}\text{N}^{++}$, отриманий із двомірного спектра рис. 5.

для цілей елементного аналізу важких домішок у матриці з легких елементів. Методика дає змогу проводити індикацію важких домішок з концентрацією $> 10^{11}$ атом./ cm^2 на поверхні досліджуваних зразків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко А.Н., Гранцев В.И., Продуvalов Ю.С. и др. Ускорение ионов углерода на циклотроне У-120. - Киев, 1987. - 12 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исследований; КИЯИ-87-32).
2. Астрелин В.А., Сметанин Г.И. Реконструкция 120-сантиметрового циклотрона УПИ // Химия твердого тела. - Свердловск, 1984. - С.135 - 140.
3. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1 // Физика атомного ядра. - М.: Атомиздат, 1974. - 584 с.
4. Добриков В.Н., Шведов А.А., Барабаш Л.И. и др. Идентификация продуктов (d, H) и (α, H) реакций по методу времени пролета на циклотроне У-120. - Киев, 1990. - 30 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исследований; КИЯИ-90-3).
5. Зеркин В.В. MANY – программная система интерактивной обработки ядерно-физической экспериментальной информации. - Киев, 1990. - 18 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исследований; КИЯИ-90-7).

**УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ^{14}N НА ЦИКЛОТРОНЕ У-120.
ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

**С. В. Адаменко, А. Е. Борзаковский, О. Ю. Горюнов,
В. И. Куц, В. А. Рылошко, Н. Г. Толмачов, А. А. Шведов**

На циклотроне классического типа У-120 Института ядерных исследований НАН Украины освоен новый спектрометрический режим – получен выведенный интенсивный пучок $^{14}\text{N}^{++}$ с энергией 8,7 МэВ. С помощью методики по времени пролета получены спектры обратного рассеяния на различных образцах, содержащих тяжелые элементы на поверхности легкой матрицы. Показана возможность применения данного пучка для индикации содержания микроколичеств тяжелых элементов (10^{11} атом./см²), находящихся на поверхности легкой матрицы.

**ACCELERATION OF ^{14}N IONS ON U-120 CYCLOTRON.
FIRST RESULTS**

**S. V. Adamenko, A. E. Borzakovsky, O. Yu. Goryunov,
V. I. Kuts, V. A. Ryloshko, N. G. Tolmachov, A. A. Shvedov**

The new spectrometric regime - intensive beam of $^{14}\text{N}^{++}$ with 8,7 MeV energy was obtained on the classic U-120 cyclotron. Back-scattering spectra on different samples with heavy elements on a surface of a light matrix were obtained with the help of time-of-flight method. The feasibility of such beam use for indication of microquantities of heavy elements (10^{11} atoms /cm²), located on a surface of a light matrix is shown.

Надійшла до редакції 05.11.04,
після доопрацювання – 18.01.05.