

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО–ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Карпусь Степан Геннадійович



УДК 621.3.038.61

**ОТРИМАННЯ ПУЧКІВ БАГАТОЗАРЯДНИХ ІОНІВ ГАЗІВ НА
МАЛОГАБАРИТНОМУ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТИПУ**

01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико–математичних наук

Харків–2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник **Пістряк Віктор Михайлович**, начальник лабораторії, Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор **Куклін Володимир Михайлович**, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри штучного інтелекту та програмного забезпечення

доктор фізико-математичних наук, професор **Пономарьов Олександр Георгійович**, Інститут прикладної фізики НАН України, завідувач відділу фізики пучків заряджених частинок

Захист дисертації відбудеться «23» січня 2018 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01 Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1, конференц-зал.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

Автореферат розісланий « 4 » грудня 2017 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01



Мануйленко О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В 1983 році за ініціативою доктора фізико-математичних наук В.Ю. Сторіжка (нині академіка НАН України) в ННЦ ХФТІ було створено малогабаритну ядерно-фізичну установку на базі електростатичного прискорювача (ЕП) горизонтального типу «Сокіл»¹. Використання малогабаритних установок на базі ЕП для ядерно-фізичних методів аналізу (ЯФМА) на пучку газових іонів (гелій, водень) дозволяє вирішувати широке коло науково-практичних завдань², в тому числі й з контролю іонно-плазмових технологій отримання покриттів, оскільки застосування ЯФМА дозволяє проводити неруйнівний аналіз з визначенням товщини покриттів та їх ізотопного і елементного складу.

Для багатьох завдань, при застосуванні ЯФМА, виникає потреба в отриманні даних при енергіях прискорених іонів, що перевищують експлуатаційні. Оскільки енергія прискорених іонів для ЕП обмежена потенціалом на високовольтному електроді, то єдиним шляхом підвищення енергії пучка іонів, без суттєвих змін в конструкції ЕП, є прискорення багатозарядних іонів (БІ)³. Отримання багатозарядних іонів газів також розширює можливості ЕП як пристроїв для іонного опромінення матеріалів.

Для отримання пучків багатозарядних іонів газів на малогабаритних ЕП горизонтального типу необхідно створення компактних інжекторів на базі джерела багатозарядних іонів газів (ДБІ), які б відповідали вимогам експлуатації [1] на ЕП «Сокіл»:

- напуск робочого газу в ДБІ $<10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$ для забезпечення високого вакууму в трубці ЕП;
- споживана потужність $<150 \text{ Вт}$ та простота в керуванні;
- струм пучка іонів, що інжектуються в трубку ЕП має бути таким, щоб забезпечити стабільність його роботи, а також мати достатній вміст багатозарядних іонів;
- вага ДБІ – близько 4 кг, щоб не навантажувати трубку ЕП, та незначні габарити для розміщення під високовольтним електродом;
- ресурс роботи більше 150 годин.

З урахуванням вищезгаданих вимог, серед існуючих типів ДБІ було вибрано джерело типу Пеннінга з холодними катодами та аксіальною системою витягування іонів, як такого, що відповідає умовам експлуатації на ЕП «Сокіл».

¹ Вергунов А.Д., Левченко Ю.З., Новиков М.Т., Пистряк В.М., Сторіжка В.Е., Чеканов С.Я. Малогабаритный электростатический ускоритель на 2 МэВ горизонтального типа (проект) // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Общая и ядерная физика. 1983. № 3(24). С.13-15.

² Nastasi M., Mayer J.W., Wang Y. Ion beam analysis: fundamentals and applications. CRC Press, 2014. 472 P.

³ Bartha L. Positive-Ion Sources // Electrostatic accelerators: Fundamentals and Application / Ed. R Hellborg. Springer, 2005. 620 P.

Для прискорення багатозарядних іонів на ЕП «Сокіл» необхідно розробити інжектор на базі джерела іонів типу Пеннінга, що задовольняє вище згаданим умовам експлуатації, провести його випробування; розробити комплексну методику очищення прискорених іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ пучка від домішки іонів H_2^+ , що забезпечить використання пучку ${}^4\text{He}^{2+}$ для вирішення широкого кола науково-практичних задач з застосуванням ядерно-фізичних методів аналізу.

Проведення цих досліджень дозволяє забезпечити отримання пучків багатозарядних іонів на ЕП «Сокіл», саме цим обумовлено актуальність та доцільність цієї роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в лабораторії електрофізичної апаратури Інституту фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут». Результати, наведені в дисертації, отримано в рамках виконання планових бюджетних науково-дослідних робіт:

а) «Програма фундаментальних досліджень ННЦ ХФТІ з атомної науки і техніки до 2010р.», № д/р 80906UP0010 в рамках теми: «Дослідження радіаційних процесів, складу, властивостей, просторового розподілу елементів і ізотопів в матеріалах ядерної і космічної техніки та екологічних об'єктах, сертифікація матеріалів і виробів за допомогою ядерно-фізичних методів та створення обладнання нового покоління» (шифр теми III-9-06), ІФТТМТ ННЦ ХФТІ, (2006–2010р.). Виконувалась за Постановою засідання Бюро Відділення ядерної фізики та енергетики НАН України Протокол №16 від 13.06.2005р.

б) «Програма фундаментальних досліджень ННЦ ХФТІ з атомної науки і техніки до 2015р.», № д/р 0111U009716 в рамках теми: «Розробка нових іонно-пучкових аналітичних і інформаційних технологій для дослідження радіаційних процесів, розподілу елементів і ізотопів в наноструктурних, конструкційних матеріалах і виробих ядерної енергетики, оцінки впливу підприємств ЯПЦ на екологію та стан здоров'я людини» (шифр теми III-9-11), ІФТТМТ ННЦ ХФТІ, (2011–2015рр.). Виконувалась за Постановою Бюро ВЯФЕ НАН України від 07.10.10, протокол № 7 (76), п. 2.

Дисертант у даних роботах виступав виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є фізичне обґрунтування вибору системи отримання та транспортування пучків багатозарядних іонів для ЕП «Сокіл», що використовується для ЯФМА та іонного опромінення, яка б дозволила одержувати пучки прискорених багатозарядних іонів газів з енергіями більше 2 МеВ, а також її розробка, виготовлення, випробування та використання.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити **наступні задачі**:

1) провести фізичне обґрунтування вибору системи отримання та транспортування пучків багатозарядних іонів для ЕП «Сокіл», яка б дозволила одержувати пучки прискорених багатозарядних іонів газів з енергіями більше 2 МеВ;

2) розробити й виготовити експериментальний зразок компактного інжектора багатозарядних іонів газів на базі ДБІ типу Пеннінга, що відповідає вимогам експлуатації на ЕП «Сокіл»;

3) провести стендові випробування ДБІ типу Пеннінга з метою визначення основних характеристик пучка витягнутих іонів (вміст багатозарядних іонів газів в пучку, розподіл іонів за енергіями, кут розходження пучка іонів) в залежності від параметрів розряду: напуску робочого газу (He, Ne, Ar, $<10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$) та розрядної напруги (до 4,3 кВ);

4) розробити, обґрунтувати та реалізувати методику розділення прискорених пучків іонів $^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ на малогабаритній ядерно-фізичній установці з ЕП «Сокіл»;

5) показати переваги використання ядерно-фізичних методів аналізу на пучку двозарядних іонів гелію для ядерно-фізичної установки з ЕП «Сокіл» при визначенні товщини, стехіометрії та вмісту домішок в тонких покриттях широкого спектру використання;

Об'єктом дослідження є процес отримання та використання пучків багатозарядних іонів газів на ядерно-фізичній установці з малогабаритним ЕП горизонтального типу.

Предметом дослідження є аксіально-симетричні пучки іонів газів низької яскравості з вмістом різних мас та зарядових станів іонів, витягнутих з джерела типу Пеннінга з холодними катодами та аксіальною системою витягування іонів при високовольтній формі розряду.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети були використані стандартні методи фізики пучків заряджених частинок, а саме – методики вимірювання параметрів пучка іонів; числові методи дослідження траєкторій руху заряджених частинок в аксіально-симетричних електростатичних полях з постійним градієнтом поля; аналітичні методи розрахунку розділення пучків іонів за допомогою магнітного мас-аналізатора; числові методи розрахунку проходження високоенергетичних іонів через вільні вуглецеві плівки; обробку та порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних з результатами проведених теоретичних розрахунків.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в ній:

1) проведено фізичне обґрунтування вибору системи отримання та транспортування пучків багатозарядних іонів для електростатичного прискорювача «Сокіл», яка б дозволила одержувати пучки прискорених багатозарядних іонів газів з енергіями більше 2 МеВ;

2) розроблено конструкцію компактного інжектора багатозарядних іонів на базі джерела типу Пеннінга з холодними катодами та аксіальною системою витягування іонів, що відповідає вимогам експлуатації на електростатичному прискорювачі «Сокіл»;

3) експериментально досліджено залежність виходу багатозарядних іонів газів з джерела типу Пеннінга запропонованої конструкції від напуску робочих газів (He, Ne, Ar, $<10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$) та розрядної напруги (до 4,3 кВ); розрахунковим методом та експериментально підтверджено, що основним процесом утворення багатозарядних іонів газів в джерелі даного типу є одноступінчатий процес іонізації електронним ударом;

4) експериментально встановлено залежність розподілу іонів за енергією в високовольтному розряді розробленого джерела типу Пеннінга від напуску

робочого газу для He та Ne ($<10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$) та розрядної напруги до 4,3 кВ.; показано, що для первинної системи формування пучка іонів (близької до Пірса), максимальний кут розходження пучка іонів складає 0,12 рад, а середнє значення нормалізованої яскравості пучка іонів складає $\approx 3 \text{ мА} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$;

5) теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість отримання пучків іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ з низьким вмістом іонів H_2^+ на виході з електростатичного прискорювача «Сокіл» після магнітного мас-аналізатора;

б) розширено можливості малогабаритної установки на базі електростатичного прискорювача «Сокіл», як приладу для іонного опромінення за рахунок отримання багатозарядних іонів газів і показано переваги використання ядерно-фізичних методів аналізу на пучку двозарядних іонів гелію для ядерно-фізичної установки з електростатичним прискорювачем «Сокіл» при визначенні товщини, стехіометрії та вмісту домішок в тонких покриттях широкого спектру використання.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку фізики пучків заряджених частинок, фізичних та технологічних основ електростатичних прискорювачів та джерел багатозарядних іонів, розвинення методик на основі ядерно-фізичних методів аналізу з використанням малогабаритних ЕП, а саме:

- розроблена система отримання пучків багатозарядних іонів газів на малогабаритних ядерно-фізичних установках з електростатичним прискорювачем «Сокіл» може бути використана в науково-дослідних закладах та заводських лабораторіях, що значно розширює їх можливості як пристроїв для проведення досліджень за допомогою ядерно-фізичних методів аналізу, так і пристроїв для іонного опромінення матеріалів;

- розроблена методика розділення прискорених пучків іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ за допомогою мас-аналізаторів може бути також використана на ядерно-фізичних установках для доочищення пучків, що містять молекулярні іони, наприклад D_2^+ в пучку ${}^4\text{He}^+$ або H_2^+ в пучку D^+ .

- використання ядерно-фізичних методик на пучках іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ та ${}^3\text{He}^{2+}$ з енергією до 3,6 МеВ сприяло розв'язанню матеріалознавчих задач, пов'язаних з вдосконаленням технології виготовлення тонких покриттів широкого спектру застосування.

Особистий внесок здобувача представлено в усіх опублікованих роботах [1 -20] згідно з поставленими науковим керівником задачами, а саме: аналіз літературних даних; підготовка та проведення експериментів; проведення числових розрахунків; розробка, виготовлення, налаштування систем та вузлів і їх випробування; спільно з співавторами проведення аналізу отриманих результатів; підготовка результатів до друку, написання статей та тез доповідей на конференції за темою дисертації.

В роботах [1-3, 12-16] здобувач приймав безпосередню участь в розробці та випробуванні оригінальної конструкції джерела багатозарядних іонів газів типу Пеннінга з метою визначення параметрів режимів роботи для отримання пучків багатозарядних іонів; здобувачем розроблено креслення ДБІ та проведено удосконалення та налагодження вузлів випробувального стенду.

В роботах [4-6, 9-11, 17, 18] здобувач приймав безпосередню участь у розробці, налагодженні та випробуванні інжектора багатозарядних іонів; виконав розрахунки системи інжекції іонів в трубку ЕП, розробив креслення інжектора; виконав аналітичні розрахунки для визначення можливості розділення пучків іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ за допомогою існуючого магнітного мас-аналізатора (кут відхилення $\sim 26^\circ$) ядерно-фізичної установки та при використанні вільних вуглецевих плівок, що можуть бути встановлені перед магнітним мас-аналізатором. Приймав участь у розробці та налагодженні необхідних вузлів систем транспортування пучка.

В роботах [7, 8, 19, 20] здобувач приймав участь у плануванні, підготовці та проведенні експериментів, обробці отриманих результатів з визначення товщини, стехіометрії та складу тонких покриттів за допомогою ЯФМА при використанні пучків ${}^3\text{He}^{2+}$ та ${}^4\text{He}^{2+}$.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені й отримали позитивний відгук на міжнародних та національних конференціях та школах: XIX Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, г. Алушта, Крым, 2005 [9]; Міжнародна конференція «Актуальні проблеми ядерної фізики та атомної енергетики», Київ, 2006 [10]; Международное совещание по микро и нанотехнологии с использованием пучков ионов, ускоренных до малых и средних энергий, ГНЦ ФЭИ, г. Обнинск, РФ, 2007 [11]; XVIII Международная конференция «Физика радиационных явлений и радиационное материаловедение», г. Алушта, Крым, 2008 [12]; XVII Международная конференция «Электростатические ускорители и пучковые технологии», ГНЦ ФЭИ, г. Обнинск, РФ, 2008 [13]; XVIII Международная конференция «Электростатические ускорители и пучковые технологии», ГНЦ ФЭИ, г. Обнинск, РФ, 2010 [14]; XIX Международная конференция «Физика радиационных явлений и радиационное материаловедение», г. Алушта, Крым, 2010 [15]; «ІЕФ'2011» Конференція молодих вчених та аспірантів, м. Ужгород [16]; «ІЕФ'2015» Конференція молодих вчених та аспірантів, м. Ужгород [17]; XIII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, ННЦ ХФТИ, г. Харьков, 2015 [18, 19]; III Международная конференция «Высококачественные материалы: получение, применение, свойства», ННЦ ХФТИ, г. Харьков, 2015 [20].

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 6 статей в спеціалізованих фахових наукових виданнях України [1-3, 5, 6, 8], що задовольняють вимогам ДАК МОН України до публікацій, на яких ґрунтується дисертаційна робота і 2 статті у науково-технічних журналах [4, 7], що додатково характеризують дисертацію. З них: 5 статей [1-3, 5, 8] включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science і 2 статті опубліковано в спеціалізованих фахових наукових виданнях іноземних держав [6, 8]; 12 робіт в збірниках наукових праць, в матеріалах та тезах доповідей на наукових конференціях [9-20].

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів основного тексту з 78 рисунками та 13 таблицями, висновків та переліку використаних літературних джерел з 122 найменувань та додатку. Об'єм

дисертації складає 192 сторінки, з них список використаних літературних джерел займає 13 сторінок, 4 сторінки займає додаток.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми, визначено об'єкт та предмет дослідження, мету й завдання дисертації, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами та темами, визначено наукову новизну результатів і можливість їх практичного застосування, відображено особистий внесок здобувача в опублікованих, разом зі співавторами, наукових працях, представлено інформацію про апробацію результатів, описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

Перший розділ «Отримання багатозарядних іонів газів на електростатичних прискорювачах» є оглядом літературних даних з основних процесів утворення та втрати багатозарядних іонів, з урахуванням яких сформовано загальні вимоги до джерел багатозарядних іонів. Також розглянуто попередній досвід створення ДБІ для ЕП. На основі проведеного аналізу сформовано ряд специфічних вимог до ДБІ, що можуть використовуватися для ЕП «Сокіл» горизонтального типу. Розглянуто основні типи ДБІ, які використовувалися і можуть бути використані на ЕП для отримання багатозарядних іонів, такі як: лазерні, дуоплазмотрон, джерела з високочастотним (ВЧ) розрядом та розрядом надвисокої частоти (НВЧ), джерела з електронним пучком, джерела з електронно-циклотронним резонансом, джерела типу Пеннінга. З урахуванням специфічних вимог до ДБІ газів, пов'язаних з експлуатацією на ЕП «Сокіл», було вибрано джерело типу Пеннінга з холодними катодами та аксіальною системою витягування іонів.

Також представлено обґрунтування необхідності прискорення багатозарядних іонів газів для розширення аналітичних можливостей ЯФМА на малогабаритних ЕП та як пристроїв для іонного опромінення.

Сформульовано низку задач, які необхідно було розв'язати, і які були успішно вирішені у дисертаційному дослідженні.

Другий розділ «Експериментальне устаткування» містить опис: випробувального стенду ДБІ; ядерно-фізичної установки на базі малогабаритного ЕП «Сокіл» горизонтального типу; діагностичного обладнання, яке було використане при виконанні дисертаційної роботи.

Для дослідження основних характеристик розробленого ДБІ типу Пеннінга з холодними катодами було використано випробувальний стенд. На стенді проведено експерименти з визначення основних параметрів високовольтного розряду в ДБІ типу Пеннінга запропонованої конструкції.

Для реєстрації струму пучка заряджених частинок було використано циліндр Фарадея (ЦФ). Аналіз розподілу пучка іонів за масами забезпечувався за допомогою магнітного мас-аналізатору.

Для отримання енергетичних спектрів іонів газів в залежності від режимів роботи ДБІ використовувався електростатичний сітковий енергоаналізатор.

Для вимірювання профілів струму іонів пучка був використаний рухомий циліндр Фарадея з механічною системою, що забезпечувала проведення

сканування пучка іонів у двох площинах на відстані 125 та 274 мм від отвору емісії ДБІ.

Для експериментів з аналізу розподілу пучка, прискорених іонів на ЕП «Сокил» з інжектором багатозарядних іонів, за масами та для оцінки геометричних розмірів пучка на мішені, був використаний вихід «Канал опромінення» [9, 11]. Експерименти з розділення пучків іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ та використання пучка ${}^3\text{He}^{2+}$ та ${}^4\text{He}^{2+}$ для ЯФМА проводились на виході «Універсальна камера» [10].

Основна частина матеріалів цього розділу була опублікована в роботах [1, 2] та була представлена на конференціях [9-11].

У третьому розділі «Експериментальні дослідження основних характеристик джерела багатозарядних іонів» представлено опис конструкційних особливостей розробленого ДБІ (рис. 1) типу Пеннінга, а також результати стендових випробувань, метою яких було визначення таких параметрів пучка, як вихід багатозарядних іонів газів, розкид за енергією іонів та кута розходження пучка іонів з ДБІ.

Важливою вимогою для ДБІ є ресурс роботи. Для збільшення часу безперервної роботи ДБІ (для Ne – близько 200 годин, а для He – близько 1000 годин) було вжито ряд заходів, а саме:

- матеріалом катодів був вибраний тантал, як такий, що має найменший коефіцієнт розпилення (втрати при розпиленні $1,47 \cdot 10^{-16}$ ат/(А·с) для H_2) та відносно високий потенціал підпалу розряду в джерелі (до 1700 В);
- використано циліндричну вставку з кварцу (8), у якій внутрішня поверхня проходила механічну обробку, що забезпечило високу адгезію покриття утвореного розпиленням матеріала катодів;
- утворення рівномірного розподілу магнітної індукції ($\approx 0,123$ Тл) на осі ДБІ.
- в катодах (7) та у верхньому катодному фланці (4) зроблено отвори $\varnothing 1$ мм, що відповідає експериментально визначеному діаметру плазмового шура на осі ДБІ, що суттєво зменшило розпилення катодів;

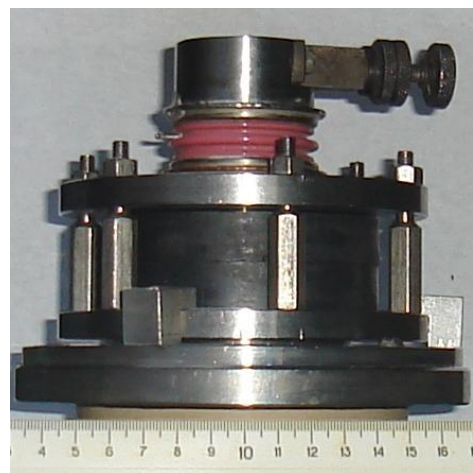
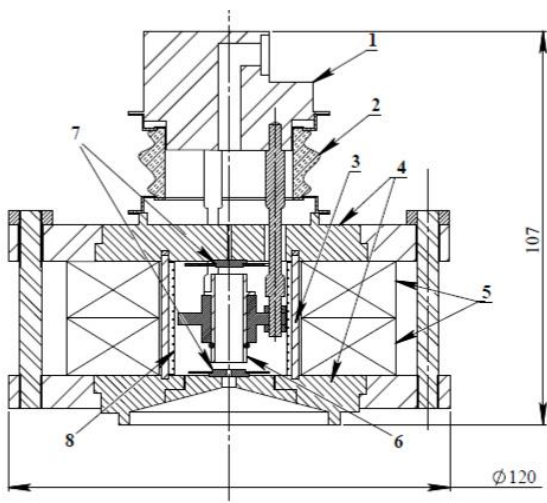


Рис. 1. Схема та зовнішній вигляд ДБІ типу Пеннінга для ЕП «Сокил».
1 – фланець анодний, 2 – ізолятор, 3 – циліндрична вставка (сталь 12X18H10T), 4 – фланці катодні (сталь-10), 5 – магніти постійні (ферити), 6 – анод циліндричний, 7 – катоди, 8 – циліндрична вставка з кварцу

Для отримання рівномірного розподілу магнітної індукції на осі в ДБІ розроблено магнітну систему, що складається з постійних магнітів (5) та катодних фланців (4) – магнітопроводів. Оптимальне значення діаметру фланців (4) визначено експериментально і складає 68 мм. На рис. 2 показано залежність індукції магнітного поля від діаметру фланців (4), а також розподіл магнітної індукції вздовж осі ДБІ.

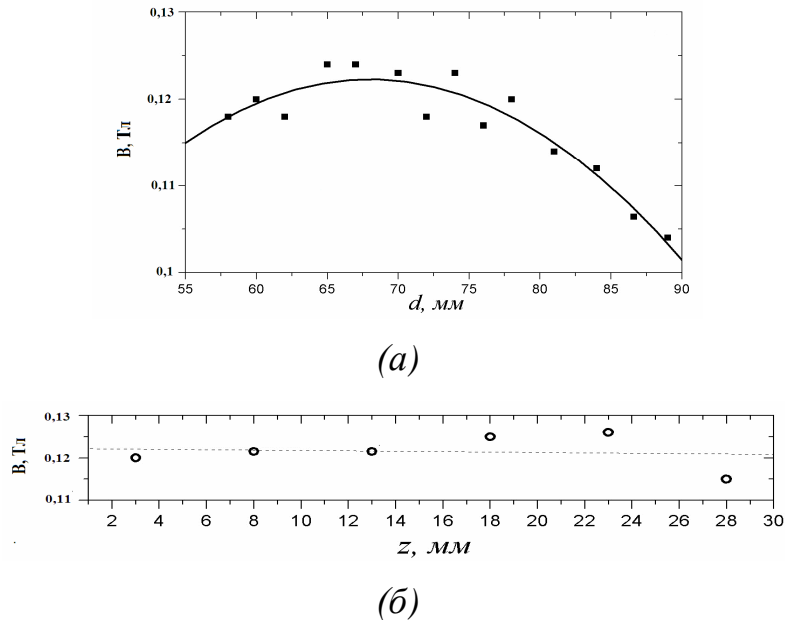


Рис. 2. (а) - залежність індукції магнітного поля від діаметру фланців (4),
(б) - розподіл магнітної індукції вздовж осі ДБІ

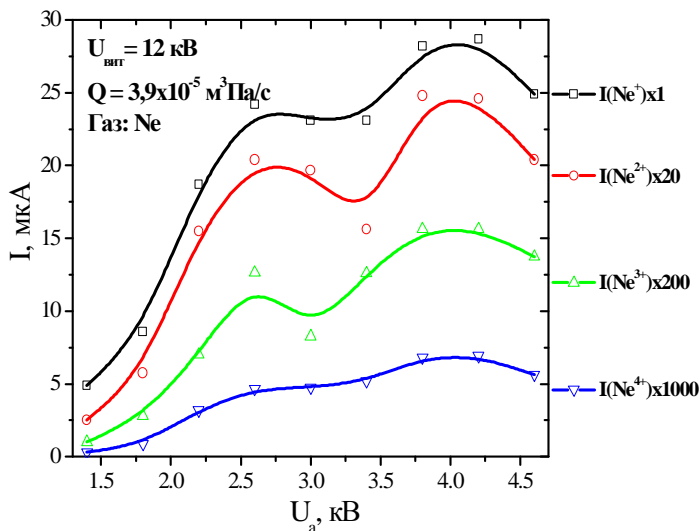


Рис. 3. Залежність виходу багатозарядних іонів Ne від розрядної напруги U_a

Під час стендових випробувань експериментально отримано залежності струму багатозарядних іонів Ne від розрядної напруги. Визначено залежності виходу багатозарядних іонів газів для Ne та Ar в діапазоні напусків робочих газів ($Q < 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$) та розрядної напруги до 5 кВ. Залежність виходу багатозарядних іонів Ne від розрядної напруги представлено на рис. 3.

Аналіз виходу багатозарядних іонів при роботі ДБІ з неоном та аргоном показав, що основним процесом утворення іонів в джерелі є одноступінчата іонізація (рис. 4). Порівняння даних по співвідношенням виходу багатозарядних іонів для подібних джерел типу Пеннінга, показав, що використання запропонованої конструкції джерела, що відповідає вимогам експлуатації на малогабаритному електростатичному прискорювачі «Сокіл»,

забезпечує отримання пучків багатозарядних іонів газів, на відміну від раніше розроблених джерел даного типу.

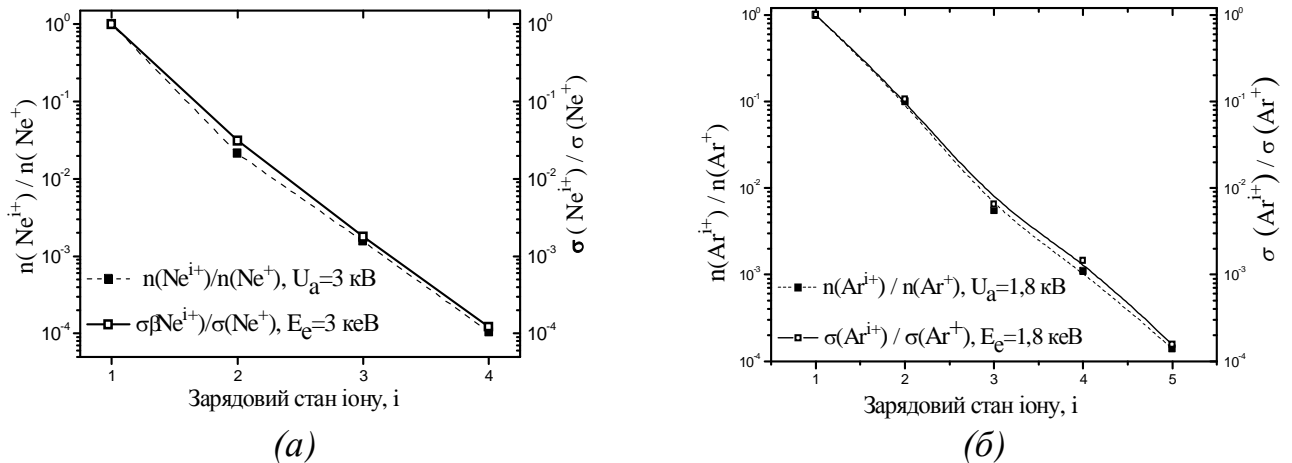


Рис. 4. Порівняння вимірних співвідношень виходу багатозарядних іонів неону (а) та аргону (б) з співвідношення відповідних перерізів іонізації неону та аргону при одноступінчатому процесі⁴

Важливою характеристикою витягнутого з джерела пучка іонів є розкид за енергією іонів $\Delta I/\Delta E$, оскільки від нього залежить ефективність транспортування пучка на ЕП «Сокіл».

Досліджено залежності енергетичного спектру іонів, витягнутих з ДБІ, для робочих газів Ne та Ne в діапазоні напуску $<10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ та в залежності від розрядної напруги. На рис. 5 показано енергетичні спектри іонів Ne та Ne для різних режимів роботи ДБІ.

Встановлено, що загальний розподіл іонів за енергією має два максимуми (1) і в загальному вигляді являє собою суму двох розподілів, а саме:

$$\frac{\Delta I}{\Delta E}(E) = \left(\frac{\Delta I}{\Delta E} \right)_{\max 1} \cdot e^{-\frac{(E-E_{\max 1})^2 2\ln(4)}{\Delta E_1^2}} + \left(\frac{\Delta I}{\Delta E} \right)_{\max 2} \cdot e^{-\frac{(E-E_{\max 2})^2 2\ln(4)}{\Delta E_2^2}}, \quad (1)$$

де E – енергія іонів, $E_{\max 1}$ та $E_{\max 2}$ – енергія іонів в максимумах розподілу.

З представлених енергетичних спектрів видно, що при зменшенні напуску робочого газу в ДБІ від $8,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ до $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ енергетичний спектр іонів Ne та Ne змінюється, а саме залишається лише один максимум. Значення ширини на половині висоти складає: для іонів Ne – $\approx 104 \text{ еВ}$, для іонів Ne – $\approx 80 \text{ еВ}$ (при напуску газів $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$), що задовольняє вимогам при транспортуванні пучка іонів на ЕП «Сокіл».

⁴ Schram B.L. Voerboom A.J.H., Kistemaker J. Partial ionization cross sections of noble gases for electrons with energy 0.5–16 keV: I. Helium and Neon; II. Argon, Krypton and Xenon // Physica. 1966. Vol. 32, №1. P. 185-196, 197-208.

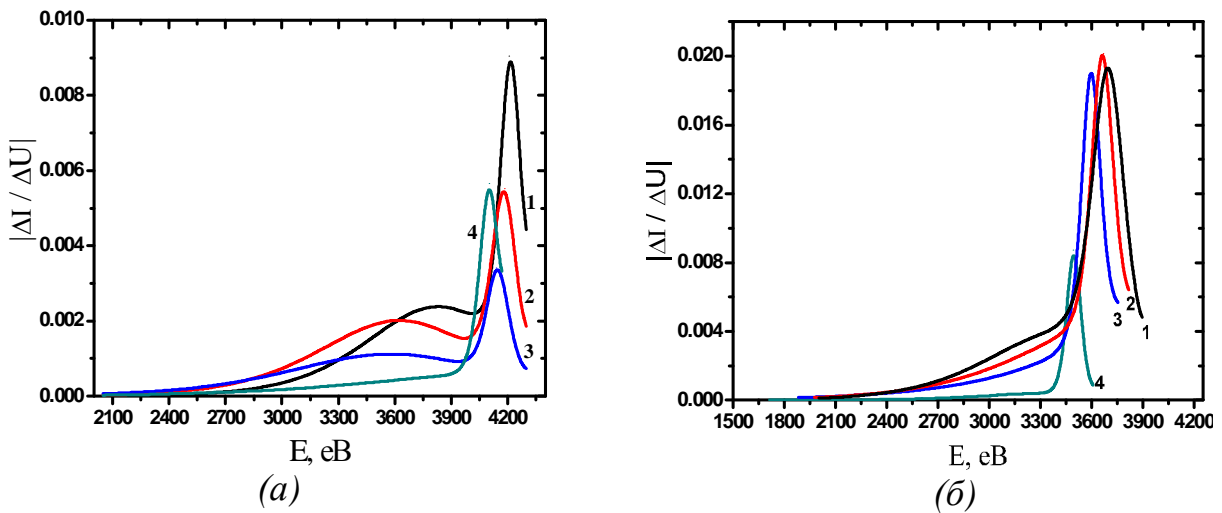


Рис. 5. Енергетичні спектри іонів:

(а) – робочий газ Ne, $U_a=4,3$ кВ. Напуск робочого газу Q :

1 – $8,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, $I_p=1,6$ мА; 2 – $7,24 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, $I_p=1,2$ мА;

3 – $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, $I_p=0,6$ мА; 4 – $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, $I_p=0,3$ мА;

(б) – робочий газ He $U_a=4,3$ кВ. Напуск робочого газу Q :

1 – $8,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, $I_p=2,8$ мА; 2 – $7,24 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, $I_p=2,2$ мА;

3 – $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, $I_p=1,2$ мА; 4 – $2,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, $I_p=0,6$ мА

Для того, щоб оцінити кут розходження пучка іонів було досліджено профілі струму пучка витягнутих іонів неону на відстані 125 та 274 мм від отвору емісії в залежності від геометричних параметрів первинної системи формування (відстань між електродами, діаметри отворів в електродах, наявність експандеру) для діапазону потенціалу витягування від 0 до 16 кВ.

На рис. 6, (а) представлена схема системи первинного формування пучка, що близька до систем типу Пірса, первеанс пучка іонів якої складає $\approx 2,2$ мкА/кВ^{3/2}, а нормалізована яскравість – $3 \text{ мА} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$. На рис. 6 (б) представлено відповідно профілі пучка іонів неону для системи, що зображена на рис. 6, а. З профілів було отримано залежність половинного кута розходження пучка іонів від радіуса пучка, що представлена на рис. 7.

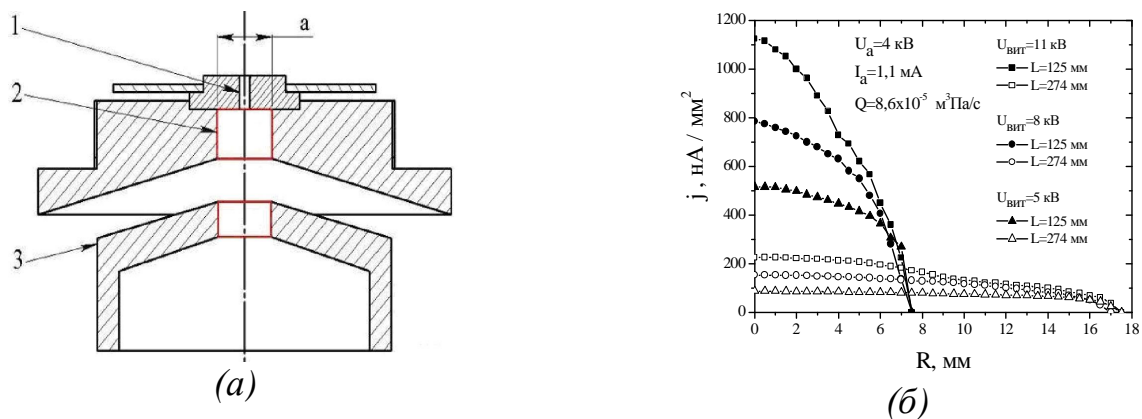


Рис. 6. (а) – система первинного формування пучка ДБІ: 1 – отвір емісії $\varnothing 1$ мм; 2 – довжина циліндричного експандеру 3,5 мм і $\varnothing 4$; 3 – електрод витягування іонів з отвором $\varnothing 4$, відстань від електроду до отвору емісії – 7,5 мм; (б) – профілі пучка іонів неону, отримані за допомогою ЦФ з вхідним отвором $\varnothing 1$

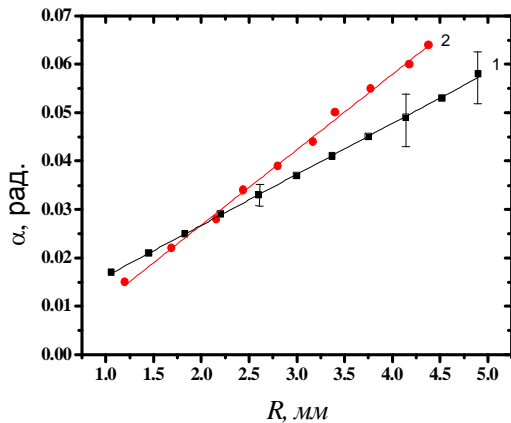


Рис. 7. Залежність половинного кута розходження пучка іонів Ne від радіуса пучка, 1 – експериментальні дані, 2 – розрахунок за допомогою програми IBSIMU

Матеріали цього розділу були опубліковані в роботі [3] та представлені на конференціях [13-16].

Четвертий розділ «Отримання пучків багатозарядних іонів газів у ядерно-фізичній установці електростатичного прискорювача «Сокіл» присвячено розробці та випробуванню інжектора багатозарядних іонів газів для ЕП «Сокіл».

На основі даних з розрахунку за допомогою програми IBSIMU та стендових випробувань ДБІ, розроблено інжектор багатозарядних іонів (рис. 8), що задовольняє вимогам експлуатації на ЕП «Сокіл». Інжектор складається з ДБІ типу Пеннінга, двох імерсійних лінз та систем живлення та керування. На рис. 9 показано фотографію інжектора, встановленого на ЕП «Сокіл».

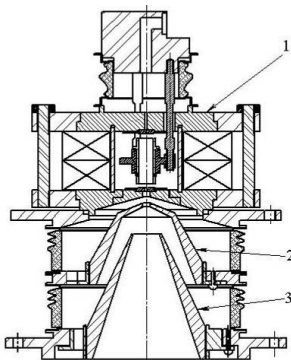


Рис. 8. Схема інжектора багатозарядних іонів для ЕП «Сокіл». 1 – ДБІ типу Пеннінга, 2,3 – електроди витягування і фокусування іонів

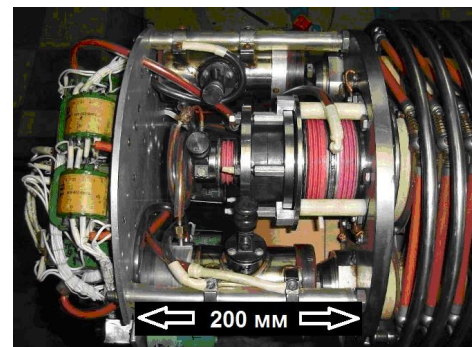


Рис. 9. Інжектор багатозарядних іонів під високоевольтним електродом ЕП «Сокіл» з системою керування та живлення

⁵Kalvas T., Tarvainen O., Ropponen T. et al. IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics // Review of Scientific Instruments. 2010. Vol.81, №2. P.02B703.

В таблиці 1 представлені основні параметри розробленого інжектора багатозарядних іонів для ЕП «Сокіл».

Таблиця 1.

Параметри інжектора багатозарядних іонів для ЕП «Сокіл»

Параметр	Значення
Розрядна напруга	до 5 кВ
Розрядний струм	до 5 мА
Потенціал електрода витягування іонів	до 18 кВ
Потенціал електрода фокусування іонів	до 18 кВ
Індукція магнітного поля на осі джерела	$\approx 0,123$ Тл
Діапазон напуску робочого газу	до 10^{-4} м ³ ·Па/с
Газова економічність	≈ 10 %
Нормалізована яскравість пучка іонів	$3 \text{ мА} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{еВ}^{-1}$
Споживана потужність	< 150 Вт
Габарити	Ø120x170 мм
Вага	4,5 кг

Як результат випробування інжектора на ЕП «Сокіл» були отримані пучки багатозарядних іонів аргону, неону та двохзарядного гелію (таблиця 2) та зроблено оцінку розміру пучка іонів (рис. 9).

Таблиця 2.

Струм багатозарядних іонів, отриманих на ЦФ після мас-аналізатора

Струм іонів\газ	Ar	Ne	He
1 ⁺	2 мкА	2 мкА	2 мкА
2 ⁺	180 нА	200 нА	15 нА
3 ⁺	16 нА	2 нА	-



Рис. 9. Пучок іонів Ne^+ в камері каналу опромінення на кварці, сітка 5x5 мм

На рис. 9 показано пучок іонів Ne^+ з енергією 1,5 МеВ на кварці в камері «Канала опромінення». Діаметр пучка складає близько 3 мм.

Також, були теоретично обґрунтовані та реалізовані методики розділення пучків іонів $^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ на виході з ЕП «Сокіл» з використанням:

- існуючого мас-аналізатора та електростатичного аналізатора (ЕА);
- вільних вуглецевих плівок з товщиною 79 та 300 нм.

Згідно результату розрахунків в одночастковому приближенні при використанні мас-аналізатора в загальному пучку іони $^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ розділяються. Дані представлені в таблиці 3, де Δ - відстань між траєкторіями іонів H_2^+ і $^4\text{He}^{2+}$ в залежності від відстані L від мас-аналізатора.

Результати розрахунку з розділення іонів H_2^+ і $^4He^{2+}$

Вузли виходу «Універсальна камера» (рис. 10, кут повороту пучка - 26^0)	L , м	Δ , м
Щілинний прилад (3)	0,47	$0,961 \cdot 10^{-3}$
Електростатичний аналізатор (ЕА) (5)	0,635	$1,252 \cdot 10^{-3}$
Вхідна щілина камери мішеней (6)	2,54	$4,25 \cdot 10^{-3}$
ЦФ або Та мішень (7)	2,8	$4,663 \cdot 10^{-3}$

Для перевірки розрахунків були проведені експерименти з розділення іонів H_2^+ і $^4He^{2+}$ на експериментальному виході «Універсальна камера». Загальна схема представлена на рис. 10. Отримано наступні результати розділення пучків іонів H_2^+ та $^4He^{2+}$ за допомогою мас-аналізатора (2) та ЕА (5). На рис. 11 зображено профілі пучків іонів H_2^+ та $^4He^{2+}$, що були отримані на ЦФ (7). Відстань між вершинами піків складає $\approx 4,5$ мм, що близько до розрахункового значення.

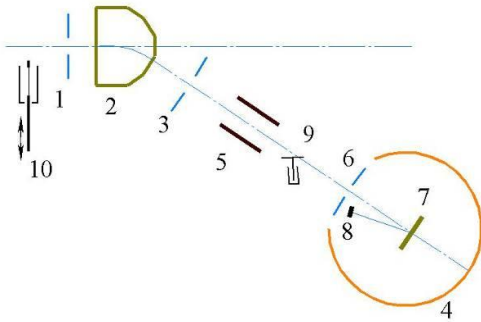


Рис. 10. Схема експерименту з розділення іонів H_2^+ та $^4He^{2+}$.

1 – діафрагма $\varnothing 5$ мм, 2 – мас-аналізатор, 3 – щілинний прилад системи стабілізації пучка за енергією, 4 – камера мішеней, 5 – електро-статичний аналізатор (ЕА), 6 – щілина $0,9 \times 9$ мм, 7 – циліндр Фарадея або мішень Та, 8 – поверхнево-бар'єрний детектор, 9 – монітор пучка, 10 – пристрій з вільними вуглецевими плівками

сіювання (ЗРР). Суть методики полягає в реєстрації зворотно-розсіяних (ЗР) іонів з мішеней Та суміші іонів $^4He^{2+}$ та H_2^+ в пучку та оцінки їх співвідношення $N_{0p}/N_{0\alpha}$. Розрахунок співвідношення потоків $^4He^{2+}$ та H^+ проводився за формулою (2):

$$\frac{N_{0p}}{N_{0\alpha}} = \frac{Y_p}{Y_\alpha} \cdot \frac{\Delta E_\alpha}{\Delta E_p} \cdot \frac{\sigma_\alpha(E_{0\alpha})}{\sigma_p(E_{0p})} \cdot \frac{k_p S_p(E_{0p}) + S_p(k_p E_{0p}) / |\cos \theta|}{k_\alpha S_\alpha(E_{0\alpha}) + S_\alpha(k_\alpha E_{0\alpha}) / |\cos \theta|}, \quad (2)$$

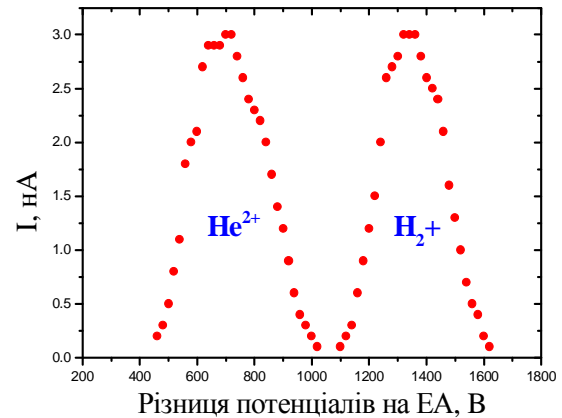


Рис. 11. Профілі пучків $^4He^{2+}$ та H_2^+ отримані за допомогою ЕА (5)

Оскільки отримані дані на ЦФ не дають змоги дати оцінку вмісту іонів H_2^+ в пучку іонів $^4He^{2+}$, то в експериментах з розділення іонів $^4He^{2+}$ та H_2^+ для більш точного аналізу вмісту H_2^+ в пучку $^4He^{2+}$, була використана методика одноразового зворотного резерфордівського роз-

де індексами p та α позначено змінні, що відносяться до протонів та іонів гелію відповідно. Перший дріб в правій частині формули (2) Y_p/Y_α – відношення виходів зворотнього розсіювання (ЗР); другий $\Delta E_\alpha/\Delta E_p$ – відношення енергетичних ширин каналів в спектрах ЗР; третій $\sigma_\alpha(E_{0\alpha})/\sigma_p(E_{0p})$ – відношення диференціальних перерізів розсіювання на ядрах Та протонів і іонів гелію при заданій енергії в первинному пучку; четвертий – відношення факторів, що визначені гальмівними властивостями іонів, k - кінематичний фактор, $S(E_0)$ - гальмівні властивості падаючої частинки, $S(kE_0)$ - гальмівні властивості ЗР частинки, θ - кут реєстрації ЗР частинок.

Таким чином, встановлено, що при розділенні пучків іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ за допомогою мас-аналізатора та електростатичного аналізатора співвідношення ${}^4\text{He}^{2+}$ до H_2^+ згідно отриманих даних отриманих методикою ЗР складає близько 27 (рис. 12, 13).

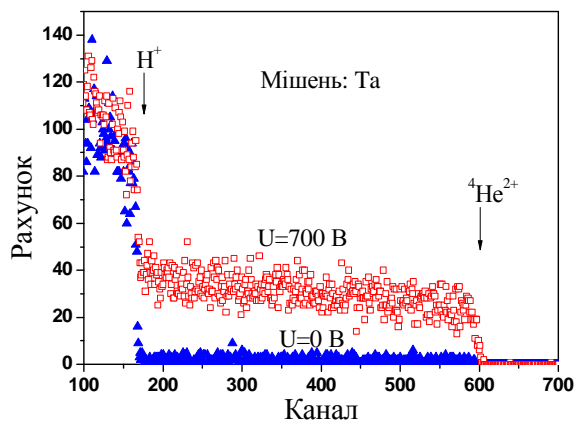


Рис. 12. Спектри ЗР протонів та альфа-частинок від Та (7), що отримані при потенціалах на ЕА 0 В та 700 В, що відповідає максимуму розподілу альфа-частинок на рис. 11

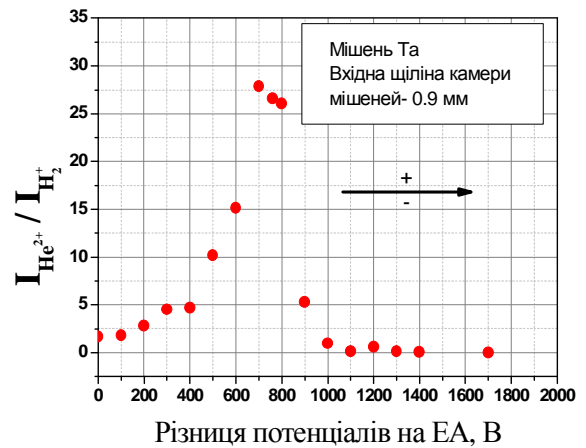


Рис. 13. Співвідношення струмів ${}^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ згідно методики ЗР

Відомо, що при проходженні іонами H_2^+ вільних вуглецевих плівок відбувається їх дисоціація⁶, а при проходженні іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ з енергією > 2 МеВ, втрати іонів на перезаряджанні⁷ складають менше 5%. Виходячи з цього в експериментах по розділенню ${}^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ були використані вільні вуглецеві плівки, що були встановлені перед мас-аналізатором, з товщиною 79 та 300 нм.

⁶Cue N., de Castro Faria N.V. et al. Electron loss and capture cross sections of 800 KeV amu^{-1} H and He species in carbon foils // Nuclear Instruments and Methods. 1980. Vol. 170, № 1-3. P. 67-72.

⁷Armstrong J.C., Mullendore J.V., Harris W.R., Marion J.B. Equilibrium charge-state fractions of 0.2 to 6.5 MeV helium ions in carbon // Proceeding of the Physical Society. 1965. Vol. 86. P. 1283.

Для оцінки вмісту іонів H_2^+ в пучку ${}^4\text{He}^{2+}$ була також використана методика ЗРР. На рис. 14 представлено спектри ЗРР від танталу. При використанні плівки товщиною 79 нм співвідношення ${}^4\text{He}^{2+}/\text{H}_2^+$ складає 52, а для плівки товщиною 300 нм – 88 відповідно, згідно розрахунків проведених за формулою (2).

Запропонована методика розділення ${}^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ дозволяє отримати пучок ${}^4\text{He}^{2+}$ з низьким вмістом іонів H_2^+ , а також може бути використана для розділення прискорених пучків D_2^+ та ${}^4\text{He}^+$, D^+ та H_2^+ на установках для ядерно-фізичного аналізу з ЕП.

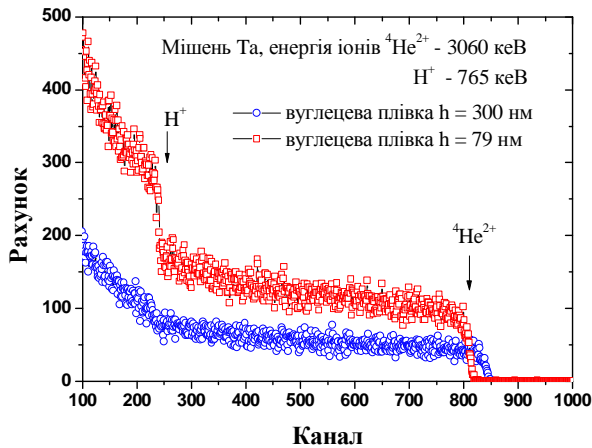


Рис. 14. Порівняння спектрів ЗРР, отриманих від Та з використанням вуглецевих плівок з товщиною 300 нм та 79 нм

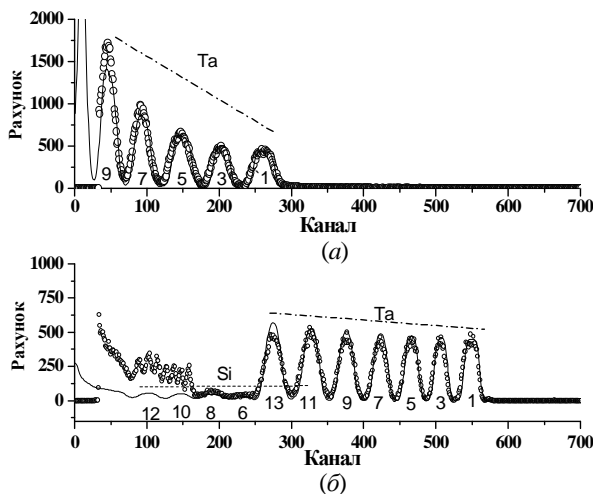


Рис. 15. Порівняння спектрів ЗРР іонів гелію від багатошарового покриття $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\dots/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$.
(а) - $E=1,5 \text{ MeV}$, (б) - $E=3 \text{ MeV}$

Отримано розрахункові значення товщини шарів для Ta_2O_5 в діапазоні $(1,0\dots1,2)\times 10^{18} \text{ ат/см}^2$, а для SiO_2 – $(1,6\dots1,8)\times 10^{18} \text{ ат/см}^2$. Такого типу покриття широко використовуються в лазерній оптиці (оптичні фільтри, інтерферометри). Контроль технології отримання яких є важливою науково-практичною задачею.

На основі отриманих експериментальних даних проведено порівняння двох методик з розділення іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ .

Матеріали цього розділу були опубліковані в роботах [4-6] та представлені на конференціях [17, 18].

П'ятий розділ «Експериментальне дослідження розподілу елементів в твердотільних шаруватих структурах за допомогою пучків іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ та ${}^3\text{He}^{2+}$ » присвячено демонстрації розширених можливостей ЯФМА на пучках ${}^3\text{He}^{2+}$ та ${}^4\text{He}^{2+}$, що отримані на ядерно-фізичній установці «Сокіл» з використанням розробленого інжектора багатозарядних іонів, для визначення товщини, стехіометрії та складу покриттів широкого спектру застосування.

Використання пучка ${}^4\text{He}^{2+}$ з енергією 3 MeV дозволило провести аналіз за допомогою методики ЗРР по всій глибині багатошарового (13 шарів) покриття з оксиду танталу та оксиду кремнію (рис. 15), що по чергово наносилися на основу з кварцу за допомогою лазерного розпилення в високовакуумній камері.

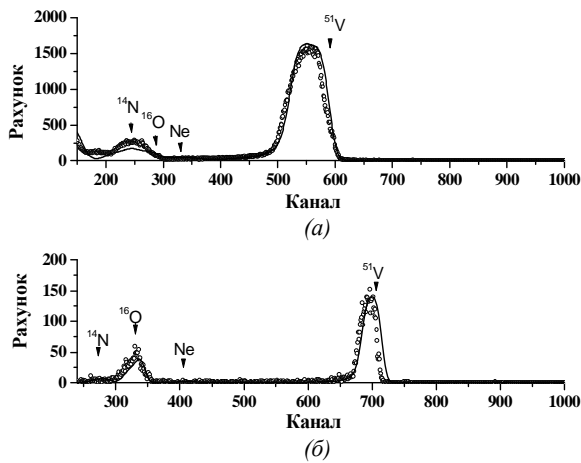


Рис. 16. Спектри ЗРР іонів гелію від плівки з пористого VN.
а – $E=1,5$ MeV, б - $E=3,05$ MeV

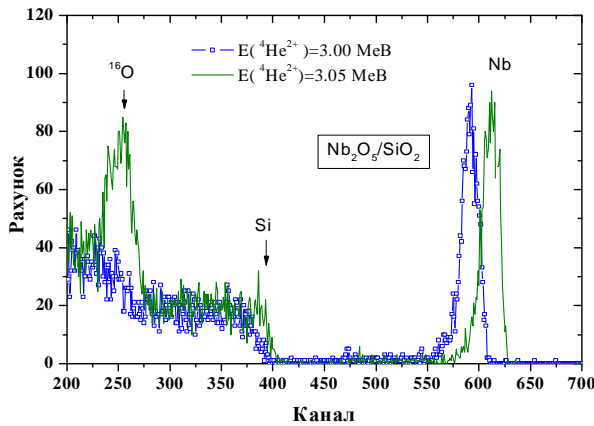


Рис. 17. Спектри зворотного розсіяння іонів гелію від плівки Nb_2O_5 на основі з SiO_2

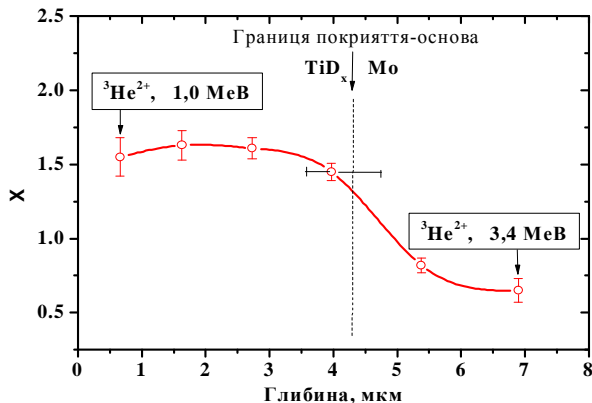


Рис. 18. Профіль дейтерію по глибині покриття TiD_x на Мо. Вісь ординат - стехіометричний параметр x . Вертикальні «вуса» демонструють лише статистичну середньоквадратичну похибку

Отриманий пучок $^4He^{2+}$ з енергією до 3,6 MeV при потенціалі на високовольтному електроді ЕП «Сокіл» 1,8 МВ дозволяє використовувати резонанс пружного розсіювання альфа-частинок на ядрах кисню ($^{16}O(\alpha, \alpha)^{16}O$, $E_{рез}=3,037$ MeV, $\Gamma=15$ кеВ). Даний резонанс було використано для контролю вмісту кисню в двох типах зразків.

Перший зразок являв собою пористе покриття з нітриду ванадію, що було отримано за допомогою іонно-стимульованого осадження (рис. 16). Визначено, що товщина VN покриття складає $1,1 \cdot 10^{18}$ ат/см² з стехіометрією $V_{0,5}N_{0,24}O_{0,26}$. Такого типу покриття розглядаються як перспективні для зберігання водню.

Другий зразок – скло для лазерної оптики, що представляє собою тонке покриття з оксиду ніобію, нанесеного на основу з кварцу. Визначено стехіометрію та товщину покриття, що складає $Nb_2O_{5,1}$ та 10^{18} ат/см² відповідно (рис. 17).

Окрім пучка $^4He^{2+}$ на ЕП «Сокіл» було отримано пучок іонів $^3He^{2+}$ з енергією до 3,4 MeV. Використання резонансної ядерної реакції $D(^3He, p)^4He$ дозволило отримати профіль розподілу дейтерію (рис. 18) в дейтериті титану (товщина $\approx 4,28$ мкм) на основі з молібдену на глибину до 7 мкм. Такого типу покриття використовуються для генерації потоків нейтронів за допомогою реакції $D(d, n)^3He$. Визначене середнє значення стехіометричного па-

раметра вмісту дейтерію в покритті TiD і складає 1,6 (TiD_{1,6}). Актуальність таких досліджень зумовлена необхідністю проведення контролю з розподілу дейтерію в матеріалах першої стінки термоядерних установок.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах [7, 8] та були представлені на конференціях [19, 20].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливе наукове завдання з отримання багатозарядних іонів газів на ядерно-фізичній установці на базі малогабаритного ЕП «Сокіл» горизонтального типу, що використовується для ЯФМА та іонного опромінення. Зокрема, виконано фізичне обґрунтування вибору системи отримання та транспортування пучків багатозарядних іонів для ЕП «Сокіл», яка дозволяє одержувати пучки прискорених багатозарядних іонів газів з енергією більше 2 МеВ, а також розроблено, виготовлено, випробувано та використано зазначену систему для розв'язання низки прикладних задач.

Основні **результати** та **висновки**, що їх отримано в дисертаційній роботі, полягають в наступному.

1. Розроблено конструкцію компактного інжектора багатозарядних іонів на базі джерела типу Пеннінга з холодними катодами та аксіальною системою витягування іонів, що відповідає вимогам експлуатації на ЕП «Сокіл». При випробуванні інжектора на ЕП «Сокіл» вперше отримано прискорені пучки багатозарядних іонів на виході з прискорювача після мас-аналізатора: ${}^3\text{He}^{2+}$, ${}^4\text{He}^{2+}$, ${}^{40}\text{Ar}^{2+}$, ${}^{40}\text{Ar}^{3+}$, ${}^{20}\text{Ne}^{2+}$, ${}^{20}\text{Ne}^{3+}$. Діаметр пучка іонів на вхідній діафрагмі розподільного магніту складає ≈ 4 мм.

2. Експериментально досліджено залежність виходу багатозарядних іонів газів з джерела типу Пеннінга запропонованої конструкції від напуску робочих газів (He, Ne, Ar, $<10^{-4}$ м³·Па/с) та розрядної напруги (до 4,3 кВ). Розрахунковим методом та експериментально підтверджено, що основним процесом утворення багатозарядних іонів газів в джерелі даного типу є одноступінчатий процес іонізації електронним ударом.

3. Вперше експериментально отримано залежність розподілу іонів за енергією в високовольтному розряді розробленого джерела типу Пеннінга від напуску робочого газу для He та Ne ($<10^{-4}$ м³·Па/с) та розрядної напруги до 4,3 кВ. Максимальне значення розкиду за енергією для іонів неону (ширина на половині висоти) складає ≈ 94 еВ, а для іонів гелію ≈ 125 еВ. Показано, що для первинної системи формування пучка іонів (близької до Пірса) максимальний кут розходження пучка іонів складає 0,12 рад, а середнє значення нормалізованої яскравості пучка іонів складає ≈ 3 мА·м⁻²·рад⁻²·еВ⁻¹.

4. Вперше теоретично обґрунтована та реалізована комплексна методика розділення пучків ${}^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ на малогабаритній ядерно-фізичній установці на базі ЕП «Сокіл», при використанні існуючого мас-аналізатора та електростатичного аналізатора, а також вільних вуглецевих плівок, встановлених перед мас-аналізатором, що дозволило отримати пучки іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ з низьким вмістом іонів H_2^+ . При використанні мас-аналізатора відношення струмів ${}^4\text{He}^{2+}$ до

H_2^+ складає 27, а при використанні вільних вуглецевих плівок: 88 для плівки товщиною 300 нм, а для плівки товщиною 79 нм – 52.

Запропонована методика дозволяє розділити прискорені пучки D_2^+ та $^4\text{He}^+$, D^+ та H_2^+ на установках для ядерно-фізичних методів аналізу.

5. Розширено можливості малогабаритної установки на базі ЕП «Сокіл», як приладу для іонного опромінення за рахунок отримання багатозарядних іонів газів. Показано переваги використання ядерно-фізичних методів аналізу на пучку двозарядних іонів гелію для ядерно-фізичної установки з ЕП «Сокіл» при визначенні товщини, стехіометрії та вмісту домішок в тонких покриттях широкого спектру використання.

Вперше на ЕП «Сокіл» реалізовано можливості експериментальних методик ЯФМА з використанням пучків іонів $^4\text{He}^{2+}$ та $^3\text{He}^{2+}$. Проведено аналіз покриттів широкого спектру застосування з визначення їх товщини, стехіометрії та складу, а саме:

- отримано дані по товщині шарів в багат шаровому покритті $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\dots/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ на основі з кварцу (оптичні фільтри). Використання пучка іонів $^4\text{He}^{2+}$ ($E=3$ МеВ) в методиці ЗРР дозволило отримати дані по товщині всіх 13 шарів, що необхідно для проведення контролю в технології отримання даного типу покриттів;
- використання резонансу пружного розсіювання $^{16}\text{O}(\alpha,\alpha)^{16}\text{O}$, $E_{\text{рез}}=3,037$ МеВ дозволило визначити вміст кисню в пористих VN покриттях та оптичному покритті Nb_2O_5 на основі з SiO_2 . Дана методика забезпечує проведення аналізу вмісту кисню при контролі технології отримання покриттів широкого спектру застосування;
- реалізовано методику отримання профілю розподілу дейтерію в TiD_x на Мо з використанням реакції $\text{D}(^3\text{He},\text{p})^4\text{He}$ (енергія іонів $^3\text{He}^{2+}$ до 3,6 МеВ). Дана методика дає змогу визначити профіль розподілу дейтерію в матеріалах атомних реакторів та першої стінки термоядерних установок.

На даний час прискорювачі серії «Сокіл», що розроблена в ХФТІ, успішно використовуються і в інших науково-дослідних центрах, а саме, в НДІ прикладної фізики ТашДУ, Узбекистан (м. Ташкент); в Інституті проблем технології мікроелектроніки та особливо чистих матеріалів РАН (м. Чорноголовка); в Інституті прикладної фізики НАН України (м. Суми) та в Високотехнологічному науково-дослідному інституті неорганічних матеріалів імені А.А. Бочвара, (м. Москва). Отриманий досвід модернізації ядерно-фізичної установки «Сокіл» ННЦ ХФТІ з прискорення та використання пучків багатозарядних іонів може бути також корисним і для вищезгаданих центрів.

Результати, здобуті в дисертаційній роботі, дають можливість проектувати та виготовляти більш ефективні системи отримання та транспортування іонів малогабаритних ЕП, що використовуються для ЯФМА та іонного опромінення.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Карпусь С.Г. Источник многозарядных ионов для установки «СОКОЛ» (*стендовые испытания*) // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (93). 2009. № 2(60). С.198–201.
2. Глазунов Л.С., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Пистряк В.М. Первичные характеристики пучка источника многозарядных ионов для ЭСУ «Сокол» // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (96). 2010. № 5(69). С. 130–134.
3. Glazunov L.S., Zats A.V., Karpus S.G., Kuz'menko V.V., Pistryak V.M. Multi-charged ion source // Problems of atomic science and technology. Ser.: Nuclear Physics Investigations (55). 2011. № 3(73). P.68–74.
4. Карпусь С.Г. Система питания и управления инжектора многозарядных ионов ЭСУ «СОКОЛ» // Вісник НТУ «ХП». Сер.: Техніка та електрофізика високих напруг (1092). 2014. № 50. С. 85–90.
5. Karpus S.G., Goncharov A.V., Pistryak V.M. et al. ${}^4\text{He}^{2+}$ and H_2^+ ion beam separation on "SOKOL" IBA facility // Problems of atomic science and technology. Ser.: Nuclear Physics Investigations (64). 2015. № 3(97). P.95–98.
6. Бондаренко В.Н., Глазунов Л.С., Гончаров А.В., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Пистряк В.М., Сухоставец В.И. Получение пучков двухзарядных ионов ${}^4\text{He}$ на малогабаритном электростатическом ускорителе «СОКОЛ» // Вестник БГУ. Сер. 1: Физика, Математика, Информатика. 2015. № 3. С. 58–62.
7. Karpus S.G., Bondarenko V.N., Goncharov A.V. et al. Application of ${}^4\text{He}^{2+}$ and ${}^3\text{He}^{2+}$ beams of the compact accelerator «SOKOL» for ion beam analysis // East European Journal of Physics. 2015. Vol. 2, № 2. P.90–98.
8. Василенко Р.Л., Гончаров А.В., Гугля А.Г., Карпусь С.Г., Литвиненко М.Л. О механизме формирования V–N покрытий в условиях бомбардировки ионами азота. Поверхность. Рентгеновские синхротронные исследования, 2008. №11. С. 81–87.
9. Глазунов Л.С., Гончаров А.В., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Левенец В.В., Пистряк В.М., Сухоставец В.И. Канал ионного облучения материалов на ускорителе «Сокол» // XIX Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, 12-18 сентября 2005г., г. Алушта: тезисы докладов / ННЦ ХФТИ. Харьков, 2005. С.153-154.
10. Бондаренко В.Н., Глазунов Л.С., Гончаров А.В., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Левенец В.В., Омельник А.П., Пистряк В.М., Сухоставец В.И., Усиков Н.П., Щур А.А. Аналитический ядерно-физический комплекс ННЦ ХФТИ «Сокол» // Международная конференция «Актуальные проблемы ядерной физики и атомной энергетики», 29 мая – 29 июня, 2006г.: тезисы докладов / ИЯИ НАН Украины. Киев, 2006. С. 163.
11. Глазунов Л.С., Гончаров А.В., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Пистряк В.М., Сухоставец В.И. Система ионного облучения материалов аналитической установки «Сокол» // Международное совещание микро- и

нанотехнологии с использованием пучков ионов, ускоренных до малых и средних энергий, 16-18 октября 2007г.: тезисы докладов / ГНЦ ФЭИ. Обнинск, 2007. С.60-62.

12. Карпусь С.Г. Источник многозарядных ионов для установки «СОКОЛ» (стендовые испытания) // XVIII Международная конференция «Физика радиационных явлений и радиационное материаловедение», 8-13 сентября 2008г., г. Алушта: труды / ННЦ ХФТИ. Харьков, 2008. С. 371.

13. Карпусь С.Г., Глазунов Л.С., Зац А.В., Кузьменко В.В., Пистряк В.М. Стендовые испытания источника многозарядных ионов для установки «Сокол» (предварительные результаты) // XVII Международная конференция «Электро-статические ускорители и пучковые технологии», 21-23 октября 2008г.: труды / ГНЦ ФЭИ. Обнинск, 2008. С. 102-107.

14. Глазунов Л.С., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Пистряк В.М. Первичные характеристики пучка источника многозарядных ионов для ЭСУ «Сокол» // XIX Международная конференция «Физика радиационных явлений и радиационное материаловедение», 6-11 сентября 2010г., г. Алушта: труды / ННЦ ХФТИ. Харьков, 2010. С. 460-461.

15. Глазунов Л.С., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Пистряк В.М. Источник многозарядных ионов // IX Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 21-25 февраля 2011г.: тезисы докладов / ННЦ ХФТИ. Харьков, 2011. С. 44.

16. Глазунов Л.С., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Пистряк В.М. Компактный источник многозарядных ионов // IEP-2011 International Conference of young scientists and post-graduates, 24-27 May 2011: Programme and abstracts. Uzhhorod, 2011. P. 60.

17. Глазунов Л.С., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Пистряк В.М. Инжектор многозарядных ионов аналитической ядерно-физической установки «Сокол» // IEP-2015 International Conference of young scientists and post-graduates, 18-22 May 2015: Proceeding of conference. Uzhhorod, 2015. P. 137.

18. Карпусь С.Г., Гончаров А.В., Пистряк В.М. и др. Разделение пучков ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H^{2+} на АЯФК «Сокол» // XIII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 16-20 марта 2015г.: тезисы докладов / ННЦ ХФТИ. Харьков, 2015. С. 101.

19. Бондаренко В.Н., Глазунов Л.С., Гончаров А.В., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Пистряк В.М., Сухоставец В.И. Применение двухзарядных пучков ионов гелия на ускорителе «Сокол» // XIII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 16-20 марта 2015г.: тезисы докладов / ННЦ ХФТИ. Харьков, 2015. С. 101-102.

20. Бондаренко В.Н., Глазунов Л.С., Гончаров А.В., Зац А.В., Карпусь С.Г., Кузьменко В.В., Пистряк В.М., Сухоставец В.И. Определение содержания кислорода в тонких оксидных слоях методом резонансного упругого рассеяния альфа-частиц // III Международная конференция «Высокочистые материалы: получение, применение, свойства», 15-18 сентября 2015г.: материалы докладов / ННЦ ХФТИ. Харьков, 2015. С. 36.

АНОТАЦІЯ

Карпусь С.Г. «Отримання пучків багатозарядних іонів газів на малогабаритному електростатичному прискорювачі горизонтального типу». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико–математичних наук зі спеціальності 01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок. – Національний науковий центр «Харківський фізико–технічний інститут». – Харків, 2017.

В дисертації представлені результати дослідження з отримання багатозарядних іонів газів на малогабаритному електростатичному прискорювачі «Сокил» горизонтального типу, що використовується для проведення аналізу тонких покриттів за допомогою ядерно-фізичних методів.

Фізичне обґрунтування вибору системи утворення та транспортування багатозарядних іонів газів на малогабаритному ЕП «Сокил» горизонтального типу, розділення пучків іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ та H_2^+ на виході з прискорювача після мас-аналізатора, дозволило спроектувати і розробити експериментальний зразок інжектора БІ газів оригінальної конструкції, що задовольняє вимогам експлуатації. Отримання пучків ${}^4\text{He}^{2+}$ і ${}^3\text{He}^{2+}$ забезпечило розширення можливостей ЯФМА для вирішення широкого кола завдань з визначення товщини та стехіометрії тонких покриттів широкого спектру застосування.

Розроблено конструкцію інжектора багатозарядних іонів газів на базі джерела типу Пеннінга з холодними катодами і аксіальної системою витягування іонів, яка задовольняє вимогам експлуатації ЕП «Сокил».

Проведено дослідження з розділення пучків іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ і H_2^+ на виході з прискорювача «Сокил» і демонстрацію розширених можливостей методик ядерно-фізичного аналізу при використанні пучків ${}^4\text{He}^{2+}$ і ${}^3\text{He}^{2+}$, для визначення товщини та стехіометрії тонких покриттів широкого спектра застосування.

Ключові слова: іонні пучки, джерело типу Пеннінга, електростатичний прискорювач Ван де Граафа, багатозарядні іони, розділення пучків іонів, ядерно-фізичні методи аналізу.

АННОТАЦИЯ

Карпусь С.Г. «Получение пучков многозарядных ионов газов на малогабаритном электростатическом ускорителе горизонтального типа». – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико–математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц. – Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, 2017.

В диссертационном исследовании была решена важная научная задача – получение многозарядных ионов газов на малогабаритной ядерно-физической установке на базе ЭСУ «Сокол» горизонтального типа.

Физическое обоснование выбора системы получения и транспортировки многозарядных ионов газов на малогабаритном ЭСУ «Сокол» горизонтального типа, разделения пучков ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ на выходе из ускорителя после масс-анализатора, позволило спроектировать и разработать экспериментальный

образец инжектора МИ газов оригинальной конструкции, удовлетворяющего требованиям эксплуатации.

Получение пучков ${}^4\text{He}^{2+}$ и ${}^3\text{He}^{2+}$ обеспечило расширение возможностей ЯФМА для решения задач по определению толщины и стехиометрии тонких покрытий широкого спектра применения.

Представлено описание ИМИ газов типа Пеннинга оригинальной конструкции, который удовлетворяет требованиям эксплуатации на малогабаритном ЭСУ «Сокол». Разработана конструкция магнитной системы с однородным распределением магнитной индукции на оси ИМИ, значение которой составляет 0,123 Тл.

Определены рабочие параметры источника ионов и его основные характеристики, а именно:

- пределы изменения разрядного напряжения (0...5) кВ;
- величина напуска рабочего газа: $(1,4...8,9) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ в зависимости от рода рабочего газа и величины извлекаемого тока ионов;
- ток разряда: 0...5 мА;

Установлено, что основной вклад в образование многозарядных ионов вносит одноступенчатый процесс ионизации атомов электронным ударом. Газовая экономичность составляет порядка 10%.

Определены первичные характеристики пучка ионов, а именно – максимальный угол расходимости и разброс ионов по энергии. Показано, что для первичной системы формирования, близкой к системе Пирса, максимальный угол расходимости составляет порядка 0,12 радиан. Среднее значение нормализованной яркости пучка ионов составляет $\approx 3 \text{ мА} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$.

Показано также, что распределение ионов пучка по энергии зависит от анодного напряжения, рода рабочего газа, разрядного тока. Максимальное значение разброса составляет для ионов неона (ширина на полувысоте) порядка 94 эВ, а для ионов гелия – 125 эВ.

Представлено описание инжектора МИ, который удовлетворяет требованиям эксплуатации ЭСУ «Сокол», и результаты его испытания. Получены пучки многозарядных ионов на выходе из ЭСУ «Сокол» после масс-анализатора: ${}^3\text{He}^{2+}$, ${}^4\text{He}^{2+}$, ${}^{40}\text{Ar}^{2+}$, ${}^{40}\text{Ar}^{3+}$, ${}^{20}\text{Ne}^{2+}$, ${}^{20}\text{Ne}^{3+}$.

Обоснована и реализована методика по разделению пучков ${}^4\text{He}^{2+}$ и H_2^+ на малогабаритной ядерно-физической установке, при использовании существующего масс-анализатора и свободных углеродных пленок, что позволило получать пучки ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ с низким содержанием ионов H_2^+ . При использовании масс-анализатора отношение токов ${}^4\text{He}^{2+}$ к H_2^+ составило 27, а при использовании свободной углеродной фольги: 88 и 52 для толщины 300 нм и 79 нм соответственно.

Представлены результаты применения методик ЯФМА на пучке ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ и ${}^3\text{He}^{2+}$. Проведены следующие эксперименты по исследованию толщины и стехиометрии тонких покрытий, а именно:

- получены данные по толщине слоев в многослойном покрытии $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2/\dots/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ на подложке из кварца, использование пучка ${}^4\text{He}^{2+}$ ($E=3 \text{ МэВ}$) в методике POP позволило получить информацию о всех 13 слоях;

- с помощью резонанса упругого рассеяния $^{16}\text{O}(\alpha,\alpha)^{16}\text{O}$, $E_{\text{res}}=3,037$ МэВ установлено наличие кислорода в пористых VN покрытиях, также определена стехиометрия тонкого покрытия Nb_2O_5 на подложке из SiO_2 ;

- реализована методика получения профиля распределения дейтерия в покрытии TiD_x на подложке из Mo с использованием реакции $\text{D}(^3\text{He},\text{p})^4\text{He}$ на пучке $^3\text{He}^{2+}$ с энергией до 3,4 МэВ на глубину до 7 мкм.

Ключевые слова: ионные пучки, источник типа Пеннинга, электростатический ускоритель Ван де Грааффа, многозарядные ионы, разделение пучков ионов, ядро–физические методы анализа.

ABSTRACT

Karpus S.G. «Multi-charged gaseous ion beam production for compact horizontal type electrostatic accelerator». – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences by specialty 01.04.20 – physics of charged particle beams. – National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology», Kharkiv, 2017.

In this thesis the important scientific task has been solved – multiply charged ion beam of gases production for compact «Sokol» Ion Beam Facility with the horizontal type electrostatic Van De Graaff accelerator.

Physical substantiation of system for production of multiply charged ions of gases, ion beam extraction and beam transportation in the accelerating tube of «Sokol» accelerator, $^4\text{He}^{2+}$ and H^{2+} beams separation at the output beam line of the accelerator after the mass analyzer has allowed to design and develop an experimental model of multiply charged ions injector with original design. $^3\text{He}^{2+}$ and $^4\text{He}^{2+}$ beams production for «Sokol» Ion Beam Facility provided enhanced capabilities for determine the thickness and the thin coatings stoichiometry for a wide range of applications.

Keywords: ion beam, Penning ion source, Van de Graaff electrostatic accelerator, multicharged ions, ion beam separation, ion beam analysis.