

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

(повне найменування вищого навчального закладу)

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

(назва факультету)

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ ТА ФІЗИКИ ПЛАЗМИ

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

До дипломного проекту (роботи)

МАГІСТРА

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему

укр. КОРПУСКУЛЯРНІ ДІАГНОСТИКИ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОЇ ПЛАЗМИ

англ. CORPUSCULAR DIAGNOSTICS FOR THERMONUCLEAR PLASMA

Виконав: студент 2 курсу навчання

за ОНП магістр

спеціальності 105 Прикладна фізика та
наноматеріали

освітня програма: Експериментальна ядерна
фізика та фізика плазми

Матлак Я.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Керівник к.ф.-м.н., ст.н.с. Козачек А.С.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

д.ф.-м.н., професор Гаркуща І.Є.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Рецензент к.ф.-м.н., ст.н.с. Юнаков М.М.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Харків - 2024 рік

АНОТАЦІЯ

Матлак Ярослав. – Корпускулярні діагностики для термоядерної плазми. Дипломна робота магістра за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» – Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків, 2023.

48 с., 22 рис., 23 джерел

В роботі розглянуті корпускулярні діагностики плазми, а саме діагностика плазми пучком важких іонів та діагностика плазми пучком нейтральних атомів, та вклад ІФТ ННЦ ХФТІ у їх розвиток. У випадку із діагностикою плазми пучком важких іонів було розглянуто основи методу, склад діагностичного комплексу, інжектора іонів, енергетичного аналізатору та його принципи роботи, вимірювання параметрів плазми, зокрема потенціал плазми і профіль її густини, описані склад й програмне забезпечення діагностики. Зібрані типові сигнали профілю щільності та потенціалу отримані за допомогою ЗППВІ на стелараторі TJ-II і розглянуті можливості розширення можливостей діагностичного комплексу ЗППВІ. Для випадку діагностики пучком нейтральних атомів було розглянуто Пучково-Емісійну Спектроскопію плазми на термоядерних пристроях а також склад діагностичного комплексу ПЕС, інжектор пучка атомів і його принципи роботи. Приділено увагу Сучасній ПЕС діагностиці на токамаці COMPASS. Описано вклад ІФП ННЦ ХФТІ у розвиток корпускулярних діагностик, розглянуто діагностичний комплекс ЗППВІ на стелараторі Ураган-2М та інжектор атомарного пучка натрію для діагностичного комплексу ПЕС. Знайдено густину струму іонів для цезію, натрію та літію в залежності від напруги, і відстаней емітером й екстрактором.

ABSTRACT

Matlak Yaroslav. – Corpuscular diagnostics for thermonuclear plasma. Master's thesis in specialty 105 "Applied physics and nanomaterials" - Kharkiv National University named after V. N. Karazina, Kharkiv, 2023.

48 pages, 22 pictures, 23 sources

The work deals with corpuscular diagnostics of plasma, namely diagnostics plasma with a beam of heavy ions and diagnosis of plasma with a beam of neutrals atoms, and the contribution of the IFT of the NSC KhFTI to their development. In the case of diagnostics of plasma with a beam of heavy ions, the basics of the method, composition were considered diagnostic complex, ion injector, energy analyzer and its principles of operation, measurement of plasma parameters, in particular potential plasma and its density profile, the composition and software are described diagnostics. Typical density and potential profile signals are collected obtained with the help of HIBP on the TJ-II stellarator and considered possibilities expanding the capabilities of the HIBP diagnostic complex. For in the case of diagnosis by a beam of neutral atoms, the Puchkovo-Plasma Emission Spectroscopy on thermonuclear devices, as well as the composition of the PES diagnostic complex, atom beam injector and its principles of operation. Attention is paid to modern PES diagnostics on the COMPASS tokamak. The contribution of the IFP of the NSC of the Khfti Institute to the development of corpuscular diagnostics is described, the HIBP diagnostic complex on the Uragan-2M stellarator and the sodium atomic beam injector for the PES diagnostic complex are considered. The ion current density for cesium, sodium, and lithium was found depending on the voltage and the distance between the emitter and the extractor.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
Розділ 1	10
Зондування плазми пучком важких іонів	10
1.1. Основи методу зондування плазми пучком важких іонів. Фізичні принципи діагностики.	10
1.2. Склад діагностичного комплексу.....	12
1.3. Інжектор ЗППВІ.....	17
1.4. Енергетичний аналізатор.....	19
1.5. Принцип роботи енергетичного аналізатора ЗПТТІ.....	20
1.6. Вимірювання параметрів плазми за допомогою ЗПТТІ. Визначення потенціалу плазми.....	21
1.7. Вимірювання профілю густини плазми	22
1.8. Вимірювання флуктуацій.....	22
1.9. Склад та програмне забезпечення діагностики ЗПТТІ.....	22
1.10. Типові сигнали профілю щільності та потенціалу отримані за допомогою ЗППВІ на стелараторі ТЈ-II.....	23
1.11. Розширення можливостей діагностичного комплексу ЗППВІ.	26
Розділ 2	27
Діагностика на пучках нейтральних атомів	27
2.1. Пучково-Емісійна Спектроскопія плазми на термоядерних пристроях.....	27
2.2. Склад діагностичного комплексу ПЕС. Інжектор пучка атомів.....	28
2.3. Принцип роботи інжектора атомів.	29
2.4 Сучасна ПЕС діагностика на токамаці COMPASS.....	32
Розділ 3	36
Корпускулярні діагностики у ІФП ННЦ ХФТІ.....	36
3.1. Розвиток корпускулярних діагностик у ІФП ННЦ ХФТІ	36
3.2. Діагностичний комплекс ЗППВІ на стелараторі Ураган-2М.....	37
3.3. Інжектор атомарного пучка натрію для діагностичного комплексу ПЕС.....	41
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	46

Вступ

Термоядерний синтез є важливим та актуальним напрямом сучасних наукових досліджень, оскільки він може дозволити отримати велику кількість дешевої енергії. Це дозволить вирішити або сильно наблизитися до вирішення проблеми залежності людства від корисних копалин.

Перспективною основою термоядерного синтезу є термоядерна плазма у токамаках та стелараторах. У ній досить високі температури, і як наслідок, досить високі енергії, що дозволяє атомам подолати кулонівський бар'єр і перейти в зону роботи сил сильної взаємодії. Це призводить до цілого ряду реакцій залежно від речовини та виділення величезної кількості енергії.

Термоядерна плазма утримується за допомогою магнітних полів, так відбувається, наприклад, у токамаках і стелараторах. Однак на даному етапі технологічного розвитку потрібні глибокі дослідження стану плазми, її параметрів. Саме тому необхідно вивчати термоядерну плазму, яка утримується магнітним полем, за допомогою широкого набору діагностик – і корпускулярні діагностики є унікально перспективними.

Діагностика плазми це знаходження локальних та миттєвих значень її основних параметрів: концентрацій електронів, атомів та молекул, функцій розподілу різних компонентів плазми за енергіями, що характеризують її стан. Оскільки плазма в загальному випадку є багатокомпонентною, нерівноважною і неоднорідною системою з широким спектром різноманітних значень параметрів, її діагностика стикається з великими технічними труднощами. Особливо складно проводити діагностику в екстремальних умовах (при максимальних температурах, густині та швидкості процесів).

Існує кілька напрямків діагностики плазми – спектроскопічна діагностика, зондування плазми надвисокими частотами (НВЧ), зондові методи діагностики, лазерні методи діагностики та корпускулярна діагностика.

Спектроскопічна діагностика плазми має на увазі в основному реєстрацію та аналіз характеристик спектрів електромагнітного

випромінювання плазми. За інтервалом частот її ділять на НВЧ, оптичну і рентгенівську. За допомогою спектрів можна знайти просторово-часові розподіли практично всіх параметрів плазми у найширших діапазонах їх значень. Недоліками методу є складний зв'язок параметрів плазми з інтенсивністю, що безпосередньо вимірюються, і суттєва залежність від видів статистичних розподілів частинок і випромінювання, які заздалегідь не відомі. Тому спектроскопічні дослідження проводяться у три етапи: спочатку встановлюють модель стану плазми та вибирають методи діагностики плазми, допустимі в рамках цієї моделі, далі ці методи реалізують, а потім інтерпретують отримані результати вимірювань та контролюють адекватність прийнятої моделі. Інформація, необхідна для вирішення завдань першого етапу, може бути отримана з аналізу спектрального складу випромінювання плазми, який дозволяє визначити основні компоненти іонного та хімічного складу плазми. Зазвичай вимірюють інтенсивності, інтегральні вздовж променя спостереження. Локальні значення, пов'язані безпосередньо з параметрами плазми, слід обчислювати за допомогою інтегрального перетворення.

Зондування плазми НВЧ засноване на тому, що плазму вважають макроскопічним середовищем, що впливає на поширення електромагнітних хвиль. Цей метод дає можливість визначити частоту зіткнення електронів з важкими частинками, а в оптичному діапазоні і концентрацію нейтральних атомів. Методика ґрунтується на залежності діелектричної проникності плазми від частоти.

Зондові методи діагностики мають серйозний недолік - вразливість зондів до високої температури плазми, через що вони обмежені областю вимірювання - далекою периферією плазми, також дуже утруднена інтерпретація даних за наявності зіткнень і магнітних полів.

Лазерні методи діагностики плазми засновані на реєстрації змін зондувального випромінювання, що виникають під час проходження електромагнітної хвилі через плазму. Для вимірювання електронної густини

плазми найчастіше використовується метод інтерферометрії, фізичною основою якого є зміна фази зондувальної хвилі.

Корпускулярна діагностика може бути як пасивною, і активною. При пасивній корпускулярній досліджуються енергетичні спектри та потоки нейтральних атомів, які утворилися внаслідок перезаряджання в області плазми. Даним методом вимірюють температуру іонного складу плазми у квазістаціонарних термоядерних установках.

На відміну від перерахованих вище методів діагностик, особливе місце займають унікальні за можливостями – активні корпускулярні діагностики. Активні корпускулярні діагностики на важкому (іонному) та нейтральному (атомарному) пучку дуже гарні тим, що можуть проводити радіальні вимірювання параметрів плазми. За допомогою таких діагностик можна визначати радіальний профіль концентрації електронів, його флуктуації, а також розподіл і флуктуації потенціалу плазми.

Діагностика на пучках важких іонів (Зондування Плазми Пучком Важких Іонів - ЗППВІ) – це унікальний інструмент для дослідження плазми в термоядерних установках. Він заснований на інжектуванні потоків однозарядних позитивних іонів (від натрію до талію) в плазму та реєстрації двозарядних іонів, що виходять з неї. На даний момент ЗППВІ успішно використовується в серії установок з магнітним утриманням плазми - це стеларатори та токамаки.

Даний метод корпускулярної активної діагностики дозволяє знайти електричний потенціал Φ_{pl} , електронну густину n_e , та їх флуктуації; складову полоїдального магнітного поля B_p .

Важливою особливістю діагностики плазми пучком важких іонів є те, що ЗППВІ діагностика вимагає унікального набору апаратних засобів, що залежать від топографії, напруженості, конфігурації магнітного поля, типу і розміру термоядерної установки. Також встановлення такого типу діагностики потребує попереднього моделювання, розрахунків та наявності високоточної та дорогої апаратури.

Діагностика на пучках нейтральних атомів (зазвичай використовується літій - Li, тому в літературі більш поширена назва Li-Beam Emission Spectroscopy (Li-BES), в українській транскрипції використовується частіше ПЕС – (Пучково-Емісійна Спектроскопія) також є унікальним інструментом для дослідження периферійної плазми у термоядерних установках. ПЕС заснована на інжектуванні нейтральних атомів (Li, рідше натрію - Na) в плазму і реєстрації вихідних фотонів, що утворилися в результаті збудження атомів пучка електронним ударом. На даний момент ПЕС діагностика успішно реалізована в серії установок з магнітним утриманням плазми та дає інформацію про електричний потенціал Φ_{pl} , електронну щільність n_e , полоїдальну складову магнітного поля B_p та електронну температуру T_e . Істотною відмінністю від діагностики пучком важких іонів є те, що дана система більш гнучка, і не вимагає таких складних маніпуляцій при встановленні на нові пристрої. Основною відмінністю та важливою перевагою даної діагностики є можливість знаходження радіального розподілу параметрів плазми.

У дипломі буде проведено опис двох основних корпускулярних діагностик ЗППВІ та ПЕС. І діагностика на нейтральному пучку, і діагностика на важкому пучку дозволяє знайти профілі розподілу густини електронів, зміни магнітних полів, розподіл потенціалу та електронну температуру. Обидва методи засновані на інжекції пучків частинок - іонів чи атомів. Діагностика ЗППВІ використовує іонний пучок, тоді як ПЕС діагностика використовує атомарний пучок. У ЗППВІ діагностиці реєструються іони, що зазнали дворазової іонізації в результаті електронного удару, у той час як у діагностиці на нейтральному пучку фіксується випромінювання, що утворилося внаслідок збудження атомів пучка. Істотною відмінністю є зручність їхньої адаптації під конкретну установку. Діагностика на нейтральному пучку тут сильно виграє, тому що їй не потрібні складні розрахунки для визначення геометричного розташування термоядерної установки. Також магнітні поля установки не впливають на нейтральний

пучок, роблячи його зручнішим інструментом дослідження радіальних розподілів параметрів. Остання глава диплома буде присвячена розвитку ЗППВІ та ПЕС діагностик в Інституті Фізики Плазми ННЦ «ХФТІ».

РОЗДІЛ 1

ЗОНДУВАННЯ ПЛАЗМИ ПУЧКОМ ВАЖКИХ ІОНІВ

Метод зондування плазми пучком важких іонів дозволяє визначити потенціал, профіль густини та їх флуктуації по радіусу плазмового шнура. Перевагою методу є локальність вимірювань, що проводяться, і висока часова роздільна здатність.

Унікальність ЗППТІ діагностики визначається її застосуванням на ряді термоядерних установок, наприклад, LHD, TJ-II, WEGA, Ураган-2М [1-4].

1.1 Основи методу зондування плазми пучком важких іонів. Фізичні принципи діагностики

Метод ЗППТІ діагностики ґрунтується на інжектуванні однозарядних позитивних іонів та реєстрації параметрів двозарядних іонів. Схема, що ілюструє метод зондування плазми пучком важких іонів, показана на Рис. 1.1. [5].

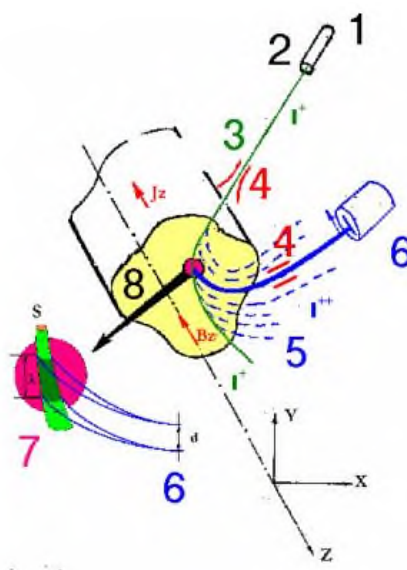


Рис.1.1. Блок схема принципу зондування плазми пучком важких іонів.

1 - джерело іонів; 2 – багатоелектродна прискорювальна трубка; 3 - пучок первинних іонів; 4 – корегуючі пластини; 5 –пучок вторинних іонів; 6 – аналізатор; 7 - область вимірювань, S – переріз первинного пучка, λ -

елементарний об'єм (simple volume); δ – частина плазмового шнура; Γ^+ -
однозарядні іони; Γ^{++} – двозарядні іони; B_z - магнітне поле.

Щоб траєкторія зондувального пучка пройшла крізь плазму установки, головна складова вектора швидкості первинного пучка повинна перебувати в полоїдальній площині. Іони первинного пучка зіштовхуються з частинками плазми вздовж траєкторії свого руху. Під час зіткнень відбуваються різні атомні процеси: збудження електронних оболонок іону, іонізація різної кратності, перезарядки на іонах плазми та на атомах і частинках домішок. Найчастішим процесом із зміною заряду іона в плазмі сучасних тороїдальних магнітних пасток є одноразова іонізація електронним ударом $\Gamma^+ \rightarrow \Gamma^{++}$. При одноразовій іонізації в кожній точці траєкторії утворюються дворазово заряджені іони. Їхні траєкторії мають іншу кривизну в магнітному полі, що призводить до сепарації траєкторій двозарядних іонів і траєкторій первинного пучка. Траєкторії двозарядних іонів утворюють "віяло" вздовж траєкторії первинного пучка (рис. 1.1). На розрахунковій відстані від плазми на шляху віяла вторинних іонів встановлюється енергетичний аналізатор. Таким чином, з віяла вторинних іонів сепаруються частинки, що потрапляють до діафрагми детектора. Частина віяла двозарядних іонів є вторинним пучком іонів, який попадає на колектори. Область, де утворився вторинний пучок іонів, є областю виміру ЗППВІ діагностики або, так званою, детекторною областю. Геометричні параметри детекторної області залежать від параметрів первинного пучка іонів, розмірів вхідної щілини детектора та деформації траєкторій вторинного іонного пучка магнітним полем установки.

Вимірюючи параметри вторинного пучка іонів і параметри первинного, можна визначити параметри плазми, такі як локальний потенціал плазми, електронна густина, електронна температура, магнітне поле, а також їх флуктуації [6-10]. При заданому рівні магнітного поля, а також типу іонів, розміщені інжектора і детектора, положення детекторної області визначається енергією первинного пучка іонів та кутами його вльоту в плазму, що впливає

з рівняння руху частинки в електромагнітному полі. Стабільність перерахованих факторів, дає можливість вимірювання залежностей потенціалу та інших параметрів плазми від часу у фіксованій області плазми. Кути вльоту первинного пучка іонів у плазму можна змінювати механічно або відхиляти пучок іонів електростатичним полем корегуючих пластини первинного іонопроводу (рис.1.1). Час відхилення пучка електростатичними пластинами можна встановити менше характерного часу зміни основних параметрів термоядерної плазми. Як наслідок, це дає можливість вимірювання просторових розподілів параметрів плазми за один робочий цикл плазмової установки при швидкій зміні кутів вльоту пучка відхиляючими пластинами.

1.2 Склад діагностичного комплексу

Схема діагностичного комплексу стелатора TJ-II (параметри установки Таблиця 1), що використовує електростатичний аналізатор, показана на рис.1.2. Комплекс складається з наступних частин: інжектора первинних іонів цезію, електростатичного аналізатору, системи управління комплексом, системи вимірювання, системи контролю параметрів комплексу та системи знімання та обробки даних. Інжектор пучка первинних іонів складається з: джерела однозарядних іонів цезію, прискорювальної трубки, первинного іонопроводу,

Таблиця 1.1.

Параметри стеларатора TJ-II

Параметри	Значення
Великий радіус вакуумної	1,5 м
Малий радіус	0,2 м
Магнітне поле	1 Тл
Довжина імпульсу плазми	0,2 с
Нагрів плазми	0,2 МВт

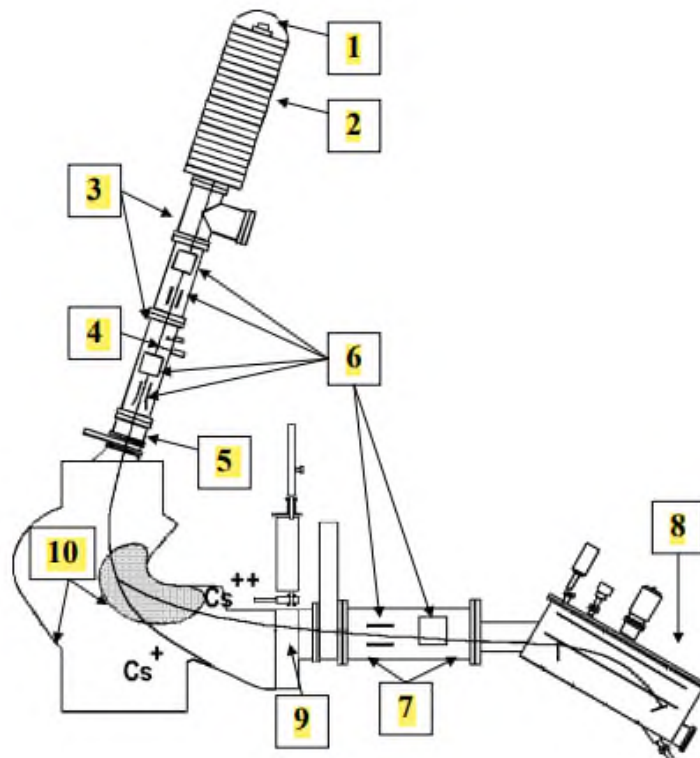


Рис.1. 2. Схематичний вигляд діагностичного комплексу ЗППВІ на стелараторі ТЈ-II: 1 – блок джерела іонів Cs^+ ; 2 – прискорювальна трубка; 3 – первинний іонопровід з блоками пластин; 4 – система циліндра Фарадея; 5 – дротяний датчик; 6 – блоки корегуючих пластин первинного та вторинного іонопроводів; 7 – вторинний іонопровід; 8 – електростатичний аналізатор енергії; 9 – багатосекційний датчик; 10 – переріз камери стеларатора з контуром плазми.

розташованого між прискорювальною трубкою та вхідним патрубком стеларатора ТЈ-II; високовольтних джерел прискорюючої і фокусуючої напруги, блоку розігріву спіралі джерела іонів. Джерело іонів базується на твердотільному термоемітері іонів цезію. Іони лужного металу Cs^+ емітуються при нагріванні емітера та подачі напруги екстракції. Такі джерела [11,12] мають ряд переваг, з яких слід зазначити: малий розкид енергії іонів, що визначається температурою нагріву $900 - 1250\text{ }^\circ\text{C}$ і при енергії первинного іонного пучка до 200 keV можливе отримання пучків з густиною струму іонів до $1,5\text{ mA/cm}^2$ у стаціонарному режимі роботи.

Від рівня первинного струму іонів залежить один із основних параметрів корпускулярних діагностичних комплексів, це рівень співвідношення сигнал/шум. Чим вище рівень струму діагностичного пучка – тим вище співвідношення і, як наслідок, можливість проводити більш точні вимірювання параметрів плазми. Для оцінки максимально можливих рівнів струму іонів різних типів емітерів застосовується спрощена формула Чайлд-Ленгмюра (1), це максимально можлива густина струму іонів для плоско-паралельного діода з поверхні 1 см^2 .

$$J = 5,54 \cdot 10^{-8} \frac{U^{3/2}}{\sqrt{A} \cdot d^2} \quad (1.1.)$$

де U – напруга між твердотільним емітером та екстрактором (В), A – а.м. іона, d – відстань між емітером та екстракторним електродом (см).

На рис.1.3 показана вольт-амперна характеристика твердотільного термоемітера іонів цезію для різних рівнів потужності нагріву та для оцінки наведена розрахункова крива за формулою закону Чайлд-Ленгмюра для плоского випадку. На рис.1.4 показано фото емітерів іонів цезію, після виготовлення та після відбору струму іонів 0,5 мА·год. На рис.1.5 показані елементи вузла нагріву. Установка або заміна твердотільного термоемітера дуже проста – емітер викладається на циліндричний корпус нагрівача. Фіксація емітера проводиться за допомогою танталового дроту або упором Пірсового електроду на матеріал емітера.

Прискорення та остаточне формування первинного пучка іонів цезію здійснюється у багатоелектродній прискорювальній трубці. Для фокусування пучка використовується нерівномірний розподіл потенціалів, що задається резистивним дільником і джерелом фокусної напруги. Первинний іонопровід містить набір чотирьох пар електростатичних пластин, що корегують положення первинного пучка іонів. Вони задають положення та кути вльоту пучка у вхідний патрубок стеларатора ТІ-ІІ. Первинний іонопровід містить систему контролю величини струму пучка та його профілю. Величина струму пучка вимірюється за допомогою циліндра Фарадея. Профіль первинного

пучка іонів визначається шляхом вимірювання сигналів з дротяного датчика при скануванні пучка відхиляючими пластинами поперек пари вертикальних або горизонтальних дротів. Детектуюча система двозарядних іонів включає в себе:

- вторинний іонопровід;
- плоскопаралельний електростатичний аналізатор енергії;
- багатоколекторний датчик струму вторинних іонів;
- підсилювач колекторних сигналів;
- високовольтне джерело живлення аналізатора.

Вторинний іонопровід містить 2 пари пластин, які служать для корекції кутів вльоту вторинного іонного пучка в аналізатор. Як аналізатор енергії вторинних іонів використовується електростатичний аналізатор. Багатоколекторний датчик являє собою набір колекторних пластин. Сигнали з яких (сотні нА) подаються на підсилювач з коефіцієнтом $10^6 - 10^7$.

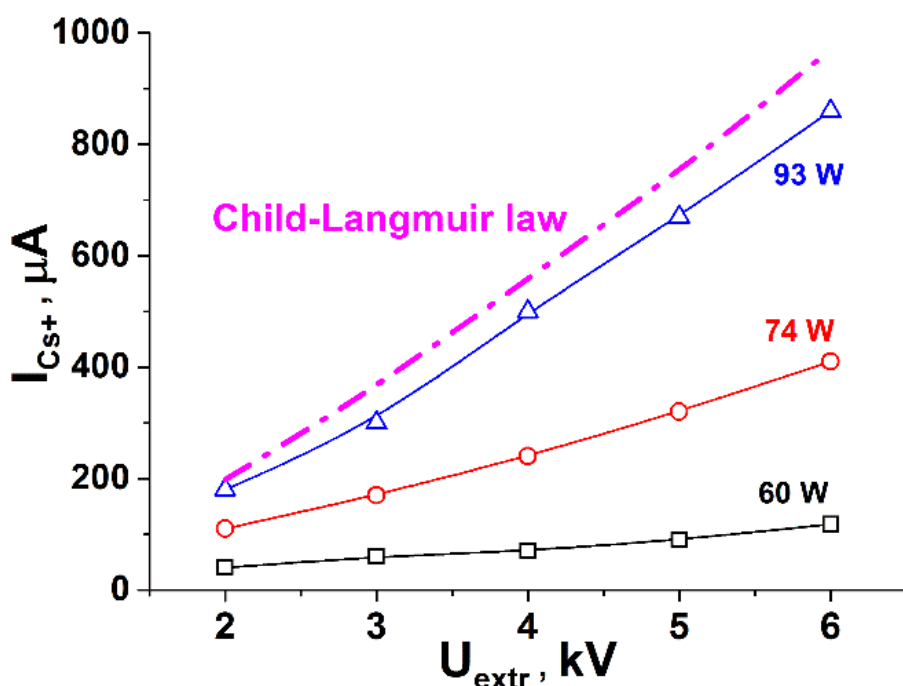


Рис. 1.3. Залежність струму однозарядних іонів цезію від величини екстракторної напруги при різних потужностях нагрівання емітера: відстань емітер-екстрактор 10 мм, площа поверхні емітера $0,5 \text{ см}^2$.



Рис. 1.4. Фото твердотільних термомітерів іонів цезію, після виготовлення (верхній) та після відбору струму іонів 0,5 мА·год (нижній): діаметр емісійної поверхні емітера 8 мм, основа емітера - танталова фольга товщиною 0,2 мм.

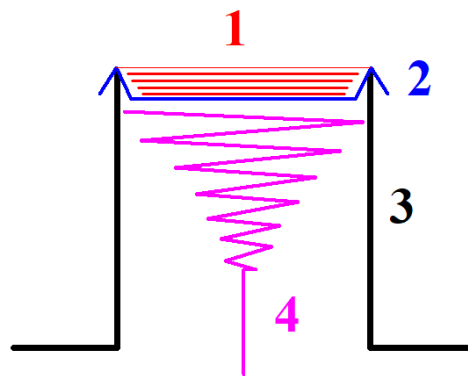


Рис. 1.5. Вузол нагріву з твердотільним термомітером:
 1 – матеріал емітера; 2 – основа емітера з танталової фольги 0,2 мм;
 3 – циліндричний корпус нагрівача з танталової фольги 0,3 мм;
 4 – нагрівна спіраль з вольфрамової проволочки діаметром 0,5 мм.

1.3 Інжектор ЗППВІ

Інжектори пучків важких однозарядних іонів лужних металів активно застосовуються для діагностичних комплексів зондування плазми (ЗППВІ) на тороїдальних магнітних термоядерних установках для визначення локальних

параметрів плазми по перерізу плазмового шнура. Така безконтактна, не збуджуюча плазму, діагностика дозволяє проводити вимірювання просторових розподілів профілів густини плазми, потенціалу плазми, полоїдальної складової магнітного поля плазми та їх флуктуацій. Виходячи з розмірів, величин магнітних полів та геометричних параметрів вхідних та вихідних патрубків на різних термоядерних установках використовуються зондуючі пучки важких іонів різної маси та енергії (іони натрію, калію, цезію, талію та золота) з енергіями від 20 кеВ до декількох. Основними вимогами до інжекторів важких іонів для цієї діагностики є:

- 1) велика фокусна відстань (відстань емітер/область бачення в плазмі близько 3-5 м) при діаметрі первинного пучка іонів у фокусі 1-2 см,
- 2) надійна робота прискорювача при заданих параметрах енергії та первинного струму пучка,
- 3) забезпечення надійної реєстрації струму вторинних іонів як за малої густини плазми (периферія плазми), так і при більшій густині (центральні області плазми), як правило застосовуються підсилювачі з коефіцієнтом 10^6 - 10^7 .

Інжектори важких іонів базуються на багатоелектродних прискорювальних трубках, які складаються з металевих електродів і керамічних кілець-ізоляторів. Розподіл прискорюючого електричного потенціалу в цих трубках задається резистивним дільником, резистори якого підключені до металевих електродів. Джерелом іонів є емітерно-екстракторний блок, який включає нагрівач з вольфрамовою конічною спіраллю, термоіонний алюмосилікатний емітер лужних іонів і Пірсовий електрод, необхідний для початкового формування пучка.

Конструкція нагрівача базується на тонкостінному танталовому циліндрі зі спіраллю нагріву, з тепловим екраном. Вона дозволяє досягати робочих температур емітерів (до $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$) за досить малої потужності, близько 50...250 Вт. Це особливо важливо при живленні від акумуляторів системи нагрівання твердотілого термоемітера. Екстракторний електрод

розташовується в 10 -15 мм від поверхні емітера і служить для екстракції іонів і первинного формування іонного пучка перед його прискоренням та формуванням у прискорювальній трубці рис.1.6.

На інжекторах стелараторів ТТ-II та Ураган-2М застосовується модульна конструкція емітерно-екстракторного блоку, яка крім нагрівального вузла включає і екстракторну систему. Емітерно-екстракторний блок зібраний в окремому корпусі, який пристиковується до верхнього фланця прискорювальної трубки і знаходиться під високим позитивним потенціалом, що визначає енергію іонів.

Оптимізація попереднього формування пучка важких іонів перед введенням його в прискорювальну трубку інжектора відпрацьовано та перевірено на установках Ураган-2М та ТТ-II. Для попереднього формування іонного пучка була використана система 3-електродної лінзи, де в якості першого електрода використовується Пірсовий електрод, другий електрод (екстрактор) з діаметром отвору 18...20 мм (відстань екстрактор-емітер 10...15 мм). Як 3-й електрод використовується корпус джерела іонів разом з першим кільцем прискорювальної трубки. 3 електрод – це друге, третє та четверте кільця прискорювальної трубки.

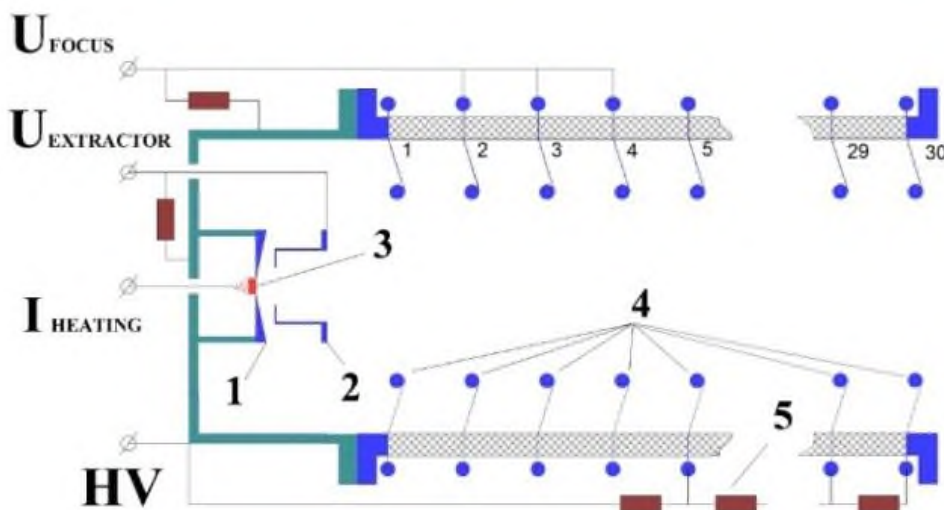


Рис.1.6. Система початкового формування первинного іонного пучка:
 1 – Пірсовий електрод, 2 – екстракторний електрод, 3 – твердотільний термоемітер, 4 – електроди прискорювальної трубки, 5 – резистори омичного дільника прискорювальної трубки.

1.4 Енергетичний аналізатор

Як зазначалося вище, вимірювання абсолютних значень електричного потенціалу плазми є проблемою, тісно пов'язаною з вимірюванням енергії вторинних іонів з відносною точністю не гірше 10^{-4} . Аналізатором енергій, що використовується в ЗПТТІ, є 30° аналізатор типу плоске дзеркало з роздільним детектування струму вторинних іонів на колекторних пластинах [13-15] (рис.1.7.)

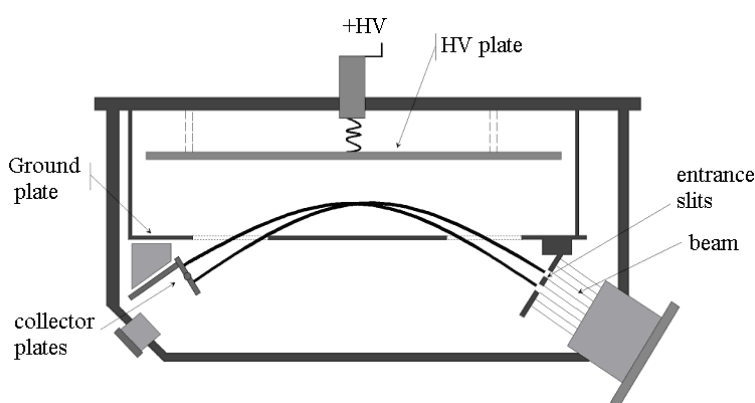


Рис.1.7. Схема плоскопаралельного електростатичного аналізатора енергії пучка заряджених частинок. Аналізатор енергії Proca-Green.

1.5 Принцип роботи енергетичного аналізатора ЗПТТІ

Вторинний пучок іонів відхиляється, потрапляючи в область електростатичного поля аналізатора, яке створюється напругою, прикладеною між високовольтною та заземленою пластинами. Компонента швидкості, спрямована паралельно електростатичному полю, змінює знак, і пучок по симетричній відносно точки повороту траєкторії потрапляє в область колекторних пластин. Залежно від величини потенціалу, що відхиляє, змінюється вертикальне зміщення пучка при фіксованій горизонтальній довжині його шляху в аналізаторі. Знаючи вертикальне зміщення, що відхиляє напругу та кути вльоту пучка в аналізатор, можна визначити енергію пучка.

Таким чином, вимірювання енергії зводиться до визначення величини зсуву пучка полем аналізатора. Якщо пучок має однорідну густину струму, то визначити зміщення пучка можливо через пари колекторних пластин, рознесених в напрямку, паралельному електростатичному полю. Для зручності називатимемо цей напрям полоїдальним, що відповідає паралельності цього напрямку площині полоїдального перерізу досліджуваної установки. Якщо весь пучок потрапляє на пластини, то відношення зміщення пучка від центру щілини між пластинами, Δr , до ширини пучка, що визначається шириною вхідної діафрагми аналізатора w , визначається формулою:

$$\Delta r/w = (r_1 - r_2)/w = (j r_1 - j r_2) / (j w) = (i_1 - i_2) / (i_1 + i_2) = \delta i, \quad (1.2)$$

де r_1 та r_2 зміщення країв пучка щодо центру пластин, j – щільність струму пучка, i_1 та i_2 струми на колекторні пластини.

Для визначення зміщення пучка в напрямку, перпендикулярному полю, що відхиляє, використовуються не 2 а 4 пластини, розташовані як показано на рис.1.7 Тоді, за аналогічною формулою, можна визначити зміщення пучка в цьому напрямку. Надалі називатимемо цей напрямок тороїдальним. При проектуванні, виготовленні та експлуатації енергетичного аналізатора необхідно враховувати вплив його механічних параметрів на точність вимірювання та контролювати їх вплив за допомогою стендової та газової калібровки.

1.6 Вимірювання параметрів плазми за допомогою ЗПТТІ. Визначення потенціалу плазми

Метод вимірювання потенціалу з допомогою діагностики ЗПТТІ заснований на тому, що при проходженні зарядженої частинки крізь «потенційну яму» її потенційна енергія не змінюється. У «потенційній ямі» при різних додаткових впливах на частинку, наприклад зіткненнях, відбувається зміна енергії частинки, що вилітає. Зміна дорівнює енергії цієї

додаткової взаємодії. При зміні заряду частинки в деякій точці всередині потенційної ями, енергія частинки, що вилітає, змінюється на добуток електричного потенціалу в цій точці і зміну заряду. Отримуємо наступну формулу для знаходження потенціалу в точці зміни заряду частинки:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = E_i + ek\phi - (em\phi + E_i) = e(k-m)\phi \quad (1.3)$$

$$\phi = \Delta E / (e(k-m)) \quad (1.4)$$

де ΔE – зміна енергії частинки; E_1, E_2 - енергії частинки в точці іонізації до і після іонізації; E_i - енергія інжекції; ϕ - потенціал у точці зміни заряду частинки; m, k - число електронів, що відсутні, до зміни заряду і після нього; e – заряд електрона.

1.7 Вимірювання профілю густини плазми

Принцип, що лежить в основі визначення густини плазми, досить простий. Іони, первинного пучка у плазмі, відчують зіткнення з частинками плазми. Зміна струму пучка, що інjektується, пропорційна густині плазми. За відношенням інтенсивності пучка, що влітає в плазму, і його інтенсивності при вильоті з плазми можна оцінити середню густину плазми. Важкі однозарядні іони мають переріз однократної іонізації електронним ударом на кілька порядків величини вище за інші іонізаційні процеси. Отже, за інтенсивністю зондувального пучка ЗППТІ діагностики можна зробити висновки про електронну щільність плазми. Реєструючи струм вторинного пучка колекторами енергетичного аналізатора можна оцінювати електронну густину плазми.

1.8 Вимірювання флуктуацій

Розрахунковий переріз іонізації слабо залежить від електронної температури вище 150 eV, тому основний внесок у флуктуації струму колекторів (сума чотирьох колекторних струмів енергетичного аналізатора) вносять флуктуації електронної густини плазми, а не електронної температури.

Таким чином, флуктуації повного струму пучка вторинних іонів містять інформацію про флуктуації електронної густини плазми як у детекторній ділянці так і вздовж траєкторії пучка.

1.9 Склад та програмне забезпечення діагностики ЗППТІ

Діагностичний комплекс ЗППТІ має не тільки складну комплектацію, а й широкий набір програм управління, корекції та обробки. Стандартна апаратура комплексу ЗППТІ включає:

- високовольтні джерела живлення інжектора та аналізатора;
- високовольтні джерела живлення відхиляючих пластин;
- високовольтні вимірювальні дільники;
- підсилювачі для реєстрації струмів пучка з колекторних пластин електростатичного аналізатора та багатоколекторного датчика;
- набір перетворювачів аналогових сигналів в цифрові (АЦП), цифрових в аналогові (ЦАП);
- систему захисту обслуговуючого персоналу від високої напруги.

Приклад програмного забезпечення сучасного ЗППВІ комплексу:

- програма розрахунку магнітних полів та траєкторій первинного і вторинного зондувальних пучків;
- програми управління діагностичним комплексом та збором експериментальних даних;
- програми обробки та аналізу експериментальних даних.

Комплекс програм управління діагностикою і збором експериментальних даних включає управління джерелами живлення інжектора і аналізатора, управління джерелами живлення корегуючих пластин і реєстрацію даних діагностики.

Програма для реєстрації даних призначена для реєстрації та зберігання даних:

- струмів з колекторних пластин енергетичного аналізатора;

- величин напруг на пластинах, що коректують пучок іонів.

Програми обробки та аналізу експериментальних даних включають програму обробки струмів з колекторних пластин, а також програми для порівняння результатів ЗППВІ з даними інших діагностик.

Як результат, програми обробки дозволяють отримувати дані:

- приведений струм, що відображає поведінку потенціалу;
- потенціал за розрахунковою формулою;
- потенціал з урахуванням газового калібрування.

Також програми дозволяють розраховувати повний струм або повний струм, нормований на розмір області вимірювання і розраховувати тороїдальне зміщення пучка.

1.10 Типові сигнали профілю щільності та потенціалу, отримані за допомогою ЗППВІ на стелараторі TJ-II

На рис. 1.8 – 1.9 показані типові сигнали ЗППВІ у сканувальному режимі вимірювань та в режимі вимірювань у заданій точці приведенного радіусу плазми.

В залежності від густини плазми, до $0,75 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, сигнал потенціалу має позитивну величину, яка стає негативною при більшому рівні густини плазми. При збільшенні густини також спостерігається зменшення рівня сигналу профілю густини, особливо в центрі плазми – центр сигналів потенціалу і профілю густини плазми. Тривалість сканування 10 мс, ЗППВІ вимірювання проводиться по всьому перерізі плазми через її центр. При зміні енергії первинного пучка іонів можна проводити вимірювання параметрів плазми за перерізом плазми у форматі 2D.

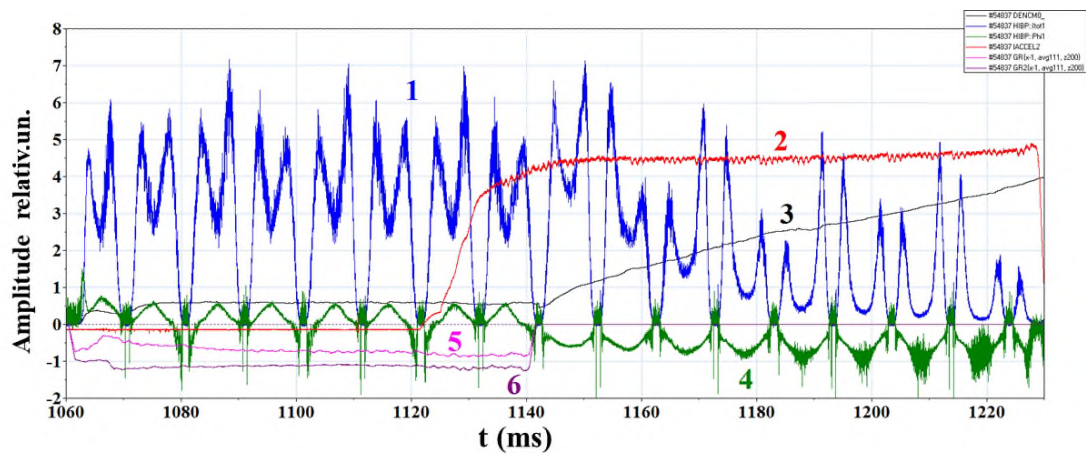


Рис.1.8. Залежність сигналів профілю густини та потенціалу плазми від методів нагріву та густини плазми в режимі сканування первинним іонним пучком.

1 – сигнали профілю густини (ЗППВІ); 2 – сигнал системи інжекції нейтрального пучка водню (система нагріву плазми); 3 – сигнал густини плазми; 4 – сигнал потенціалу плазми (ЗППВІ); 5 та 6 – сигнали системи нагріву плазми за допомогою електронно-циклотронного резонансу.

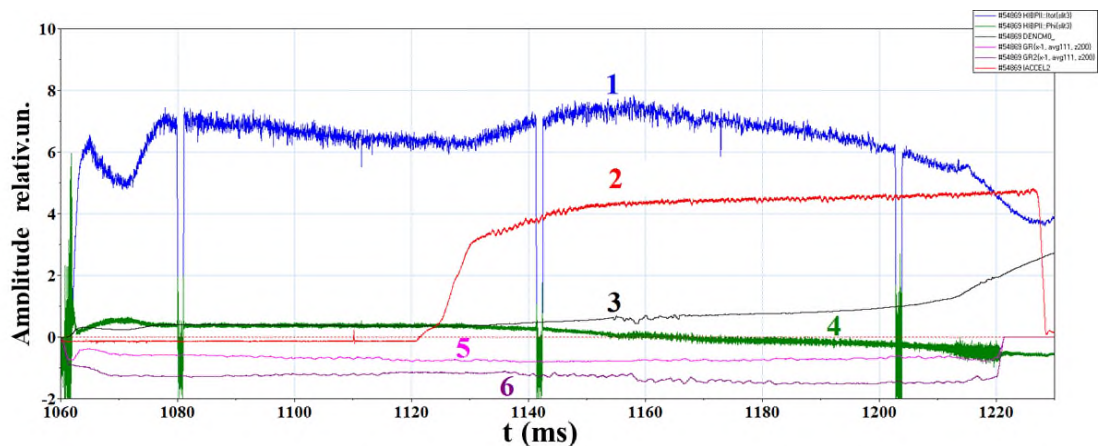


Рис. 1.9. Залежність сигналів профілю густини та потенціалу плазми від методів нагріву та густини плазми в режимі вимірів у вибраній точці радіусу плазми:

1 – сигнали профілю густини (ЗППВІ), 2 – сигнал системи інжекції нейтрального пучка водню (система нагріву плазми), 3 – сигнал плазми; 4 – сигнал потенціалу плазми (ЗППВІ); 5 та 6 – сигнали системи нагріву плазми за допомогою електронно-циклотронного резонансу.

На рис.1.10 наведені дані щодо локалізації флуктуацій сигналу профілю густини від наведеного радіусу плазми. Рівень флуктуацій має практично 100% когерентність із даними, які отримані за допомогою мирнівських зондів, але мирнівські зонди дають інтегральний сигнал флуктуацій без можливості мати радіальний розподіл.

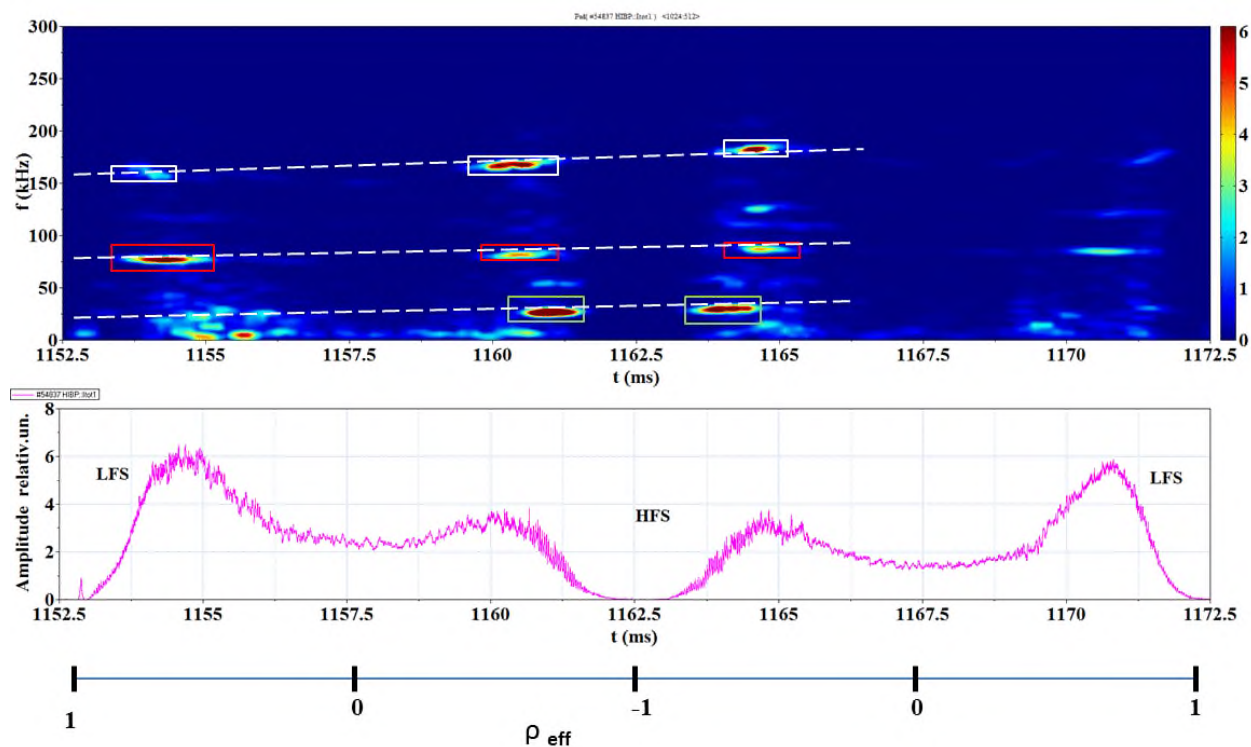


Рис.1.10. Залежність локальності флуктуацій сигналу профілю густини від приведенного радіусу плазми (ρ_{eff}) для трьох частотних рівнів 150 кГц, 75 кГц та 25 кГц, периферія плазми зі сторони сильного магнітного поля $\rho_{\text{eff}} = -1$, периферія плазми зі сторони слабого магнітного поля $\rho_{\text{eff}} = 1$ та центр $\rho_{\text{eff}} = 0$.

1.11 Розширення можливостей діагностичного комплексу ЗППВІ

На рис.1.11 показано дві складові подвійного діагностичного комплексу ЗППВІ на стелараторі TJ-II - це діагностичні комплекси ЗППВІ 1 та ЗППВІ 2. Таке розміщення гарантує однакову конфігурацію магнітного поля в січеннях вимірювання обох діагностичних комплексів. Використання подвійної ЗППВІ діагностики відкриває шлях для дослідження довго-масштабних кореляцій

(LRC) електричного потенціалу, профілю густини, полоїдального магнітного поля, полоїдальної та тороїдальної структури турбулентності плазми та різних типів нестійкості у центральній та периферійній плазмі.

Подвійний діагностичний комплекс має широкий діапазон схем експериментів щодо вимірювань параметрів плазми – це робота обох комплексів у режимі скануванні; у режимі вимірювання в заданих точках, як у однакових так і в різних (по перерізу плазми у форматі 2D); у змішаних режимах – режим сканування на одному комплексі та режим вимірювання у заданій точці на іншому.

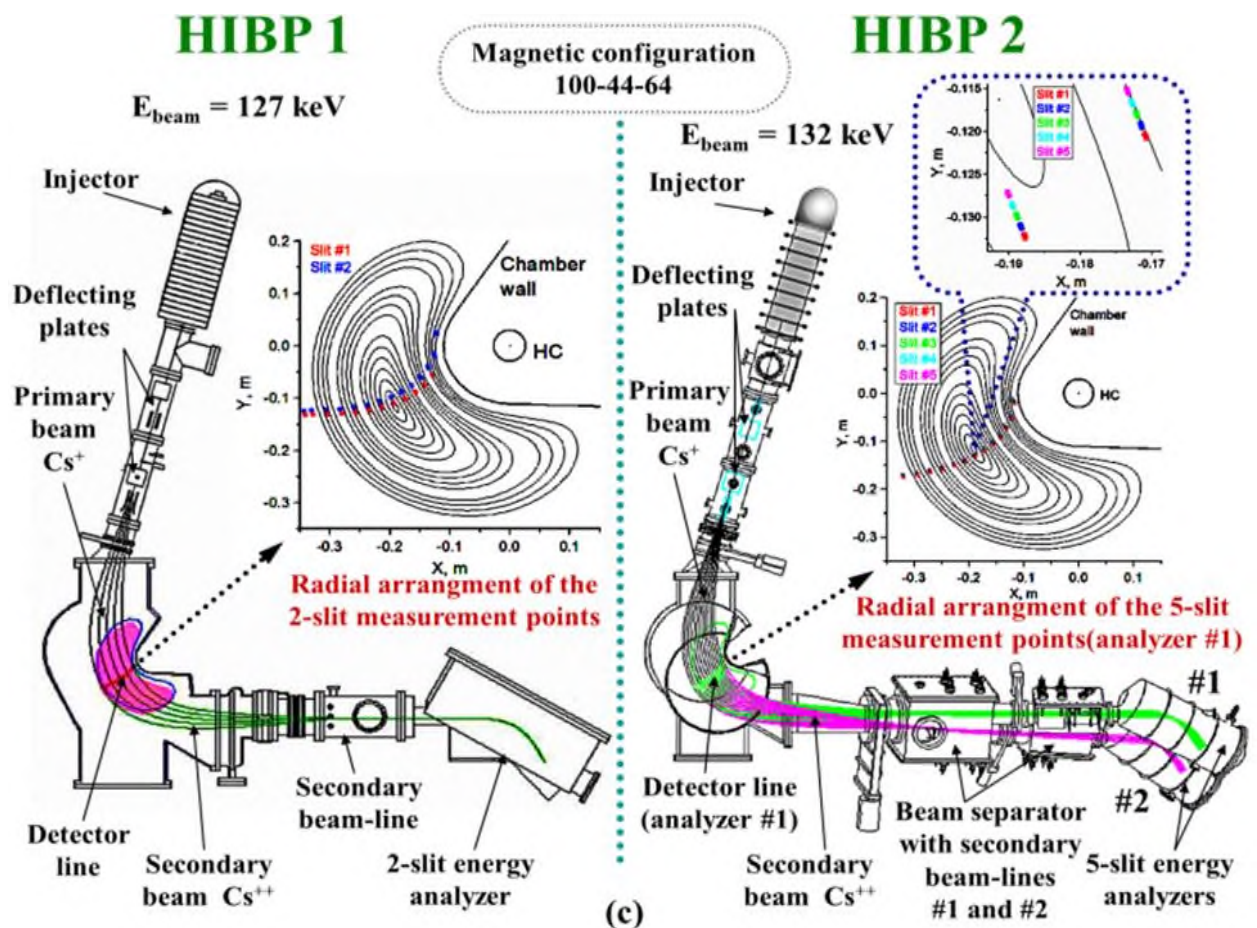


Рис. 1.11. Комплектація двох діагностичних комплексів ЗППВІ (НІВР 1 та НІВР 2) на стелараторі ТІ-ІІ.

РОЗДІЛ 2

ДІАГНОСТИКА НА ПУЧКАХ НЕЙТРАЛЬНИХ АТОМІВ

2.1 Пучково-Емісійна Спектроскопія плазми на термоядерних пристроях

Пучково-Емісійна Спектроскопія (ПЕС) плазми, це також розповсюджений корпускулярний метод вимірювання параметрів плазми. Цей метод базується на пучках атомів легких лужних металів, таких як літій або натрій. За допомогою ПЕС діагностики можна отримувати дані просторового розподілу густини плазми та домішкових іонів у периферійній області термоядерних пристроїв, також є потенційна можливість вимірювання просторового розподілу полоїдального та тороїдального магнітних полів [16-18]. ПЕС діагностика достатньо розповсюджена, вона застосовується на наступних термоядерних пристроях: стеларатор W7-X, токамак ASDEX Upgrade, токамак JET, токамак LHD, токамак COMPASS.

На відміну від ЗППВІ діагностики (реєстрація двозарядних іонів), ПЕС діагностика основана на реєстрації спектральних характеристик випромінювання атомарних зондувальних пучків. Атоми нейтрального пучка збуджуються при взаємодії з плазмою і за інтенсивністю збудження можна оцінити концентрацію електронів плазми, а за кутом повороту площини поляризації випромінювання можна оцінити напруженість магнітного поля термоядерної установки.

ПЕС діагностичні комплекси складаються з двох головних частин, це інжектор пучка атомів та реєструвальна апаратура оптичного сигналу з плазми. Інжектор комплексу комплектується з прискорювача легких однозарядних іонів, нейтралізатору та системи транспортування зондувального пучка до плазми. Нейтралізатор перетворює пучок легких іонів у пучок атомів, які збуджуються при взаємодії з електронами, іонами плазми та нейтральним газом.

Багатоканальна апаратура, що реєструє випромінювання атомарного пучка, оснащена відповідними оптичними лінзами, світлодіодами, світлофільтрами та фото-помножувачами. Реєструючий блок розташований на вертикальному порту установки вздовж траєкторії нейтрального пучка, що входить до плазми. Відстань між оптичними каналами визначає просторову роздільну здатність цієї діагностики.

2.2 Склад діагностичного комплексу ПЕС. Інжектор пучка атомів

Як зазначалось вище, ПЕС діагностичні комплекси складаються з двох головних частин, це інжектор пучка атомів та реєструвальна апаратура оптичного сигналу з плазми. На рис. 2.1 схематично показано класичний інжектор пучка атомів літію, який застосовувався на токамаці ASDEX у дев'яностих роках [1].

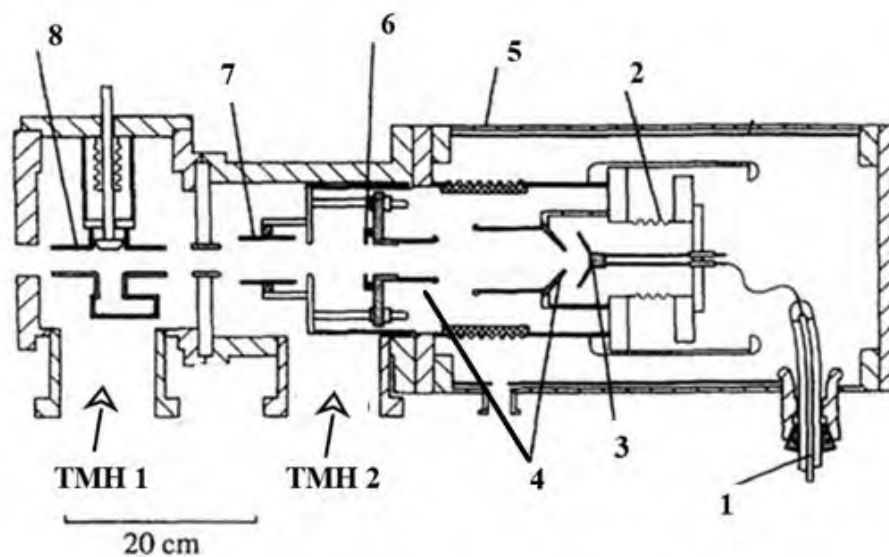


Рис.2.1. Класична схема інжектора пучка атомів літію:

1 – ввід високої напруги, 2 – сильфон для корекції відстані емітер-екстрактор, 3 – термоемітер з Пірсовим електродом, 4 – другий електрод (екстрактор) та третій електрод системи фокусування іонного пучка, форма електродів циліндрична, 5 – корпус іонного прискорювача, 6 – вихідна апертура іонного прискорювача, 7 – блок відхиляючих пластин, 8 – вузол нейтралізатора.

2.3 Принцип роботи інжектора атомів

ПЕС діагностика у основному застосовується для аналізу периферії плазми термоядерних установок. Конструкція вузла твердотілого термоемітера іонів (3), традиційно – це іони літію, має декілька елементів. По перше це сам емітер, основою якого є диск пористого вольфраму з нанесеним на поверхню емісійним матеріалом. По друге - спіраль нагріву емітера і завершальний елемент – перший електрод фокусної системи прискорювача іонів - Пірсовий електрод. Емітер дозволяє отримати густину струму іонів літію від 1 до 2,5 мА/см², при температурах матеріалу емітера до 1300 °С, напрузі екстракції у декілька кіловольт та відстані емітер-екстрактор 15 мм. Матеріалом твердотілого термоемітера традиційно є синтетичний алюмосилікат літію (Li₂O) (Al₂O₃) 2(SiO₂).

Іонний пучок (однозарядний літій) за допомогою фокусувальної системи - електроди (4) і Пірсовий електрод (так звана трьох-електродна система), фокусується у області нейтралізатора (8) з діаметром до 30 мм та, в ідеалі, з вельми малим кутом розходження. Малий кут розходження пучка іонів (малий еміттанс) у нейтралізаторі - це гарантія, що пучок атомів літію у плазмі буде практично паралельним, що важливо для реєструвальної апаратури. У конструкції цього інжектора атомів використовувався цікавий елемент (2) – це сильфон, за допомогою якого можна змінювати відстань емітер-екстрактор. Змінюючи відстань емітер-екстрактор можна керувати рівнем емісії іонів.

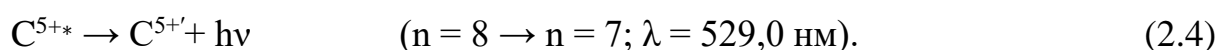
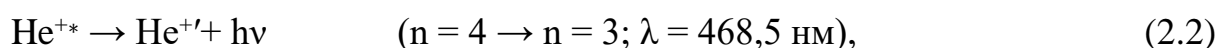
Фокусування пучка іонів у області нейтралізатора за допомогою 3 - електродної системи потребує підтримки жорсткого співвідношення між енергією пучка та екстракторною напругою. Існування цього співвідношення при зміні струму пучка та при фіксованій енергії приводить до «дефокусування» пучка іонів у нейтралізаторі і, як наслідок, – до «дефокусування» атомарного пучка у плазмі.

Відхиляючі пластини (7) виконують важливу функцію – керують положенням іонного пучка у просторі або дозволяють модулювати

діагностичний пучок у плазмі. Конструкція нейтралізатора (8) досить проста – у нижній частині розміщена ємність з металічним натрієм та нагрівачем цієї ємності, зверху розміщена система з клапаном, яка може перекривати ємність з натрієм коли це потрібно. При температурах 250 – 300 °С, металічний натрій розплавляється і починає випаровуватися. Ламінарний потік пари натрію виступає у ролі мішені для перезарядки іонів літію. Від енергії іонного пучка залежить коефіцієнт перезарядки, при енергії 25 кеВ коефіцієнт практично 100%, при 40 кеВ вже не більш 80%, при 70 кеВ може бути менше 60%. Ця важлива характеристика рівня перезарядки спонукає обирати компроміс між величиною струму іонів та їх енергією. Після нейтралізатора, пучок атомів літію сягає плазми і атоми літію внаслідок зіткнень з частками плазми мають декілька збуджених станів. Серед збуджених станів Li: 2p, 3s, 3p, 3d ... і так далі, найбільший переріз має Li(2p), який випромінює характерний фотон через радіаційне дезбудження з $\lambda = 671.5 \pm 1.5$ нм. Далі, за допомогою спектроскопії ударного збудження реєструється перехід Li(2p) \rightarrow Li(2s) для вимірювання електронної густини плазми.

Реєструюча апаратура розміщена на нижньому горизонтальному порту камери установки під траєкторією пучка атомів. Традиційно застосовується декілька десятків каналів з фільтрами та помножувачами. Застосування CCD камери забезпечує високу якість зображення, особливо для динамічних та дрібних об'єктів.

Крім вимірювання електронної густини, ПЕС діагностику застосовують і для вимірювання температур іонів вуглецю та гелію. Такі вимірювання базуються на реакціях обміну зарядом:



Реєструюча апаратура також може бути розміщена на верхньому або нижньому горизонтальному порту камери установки над/під траєкторією пучка атомів. Також застосовується декілька десятків каналів з фільтрами для $\lambda = 468,5$ нм, $\lambda = 529$, нм та помножувачами.

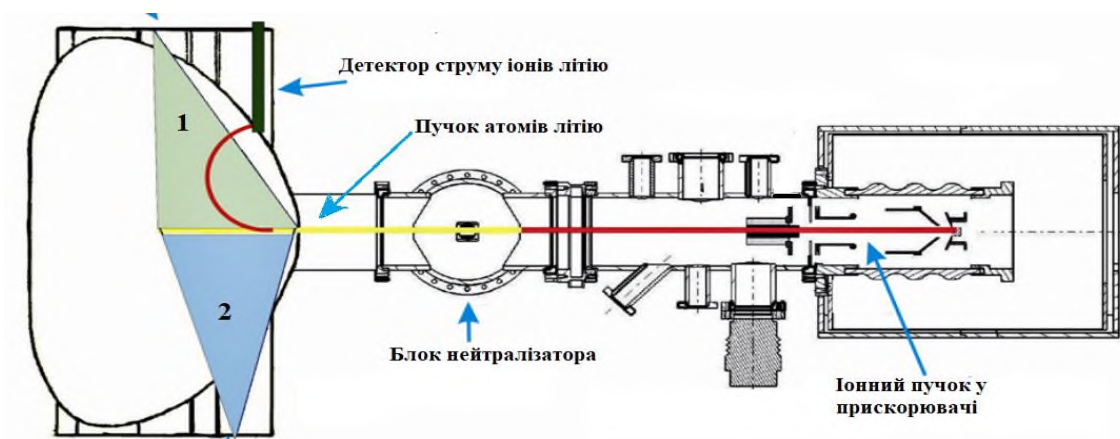


Рис. 2.2. Схема ПЕС діагностики на токамаці COMPASS.

- 1 – область бачення атомарного пучка літію ССД камерою,
2 – область бачення пучка блоком фотодіодів.

При роботі нейтралізатора, пари натрію можуть осідати як на конструкції інжектора так і у камері термоядерної установки. Найбільш негативний наслідок цього ефекту - це нестабільна робота іонного прискорювача, аж до електричних пробів між електродами. Для боротьби з цим ефектом використовується додаткове відкачування області нейтралізатора двома тутбомолекулярними насосами (ТМН), рис.2.2.

2.4 Сучасна ПЕС діагностика на токамаці COMPASS

Токамак COMPASS (параметри у Таблиці 2.1) за своїми розмірами відноситься до малих токамаків, здатних працювати в Н-режимі (режим утримання плазми), що є еталонною операцією («стандартний сценарій») для токамака ІТЕР (Таблиця 2.2). Розмір та форма плазми токамака COMPASS відповідає одній десятій (у лінійному масштабі) плазми токамака ІТЕР. ІТЕР

(ITER — англійська, International Thermonuclear Experimental Reactor, Міжнародний експериментальний термоядерний реактор) — проект міжнародного експериментального термоядерного реактора типу токамак.

Таблиця 2.1.

Параметри токамака COMPASS

Параметри	Значення
Великий радіус вакуумної камери (тор)	0,56 м
Малий радіус вакуумної камери	0,23 м
Струм плазми	360 кА
Магнітне поле	0,9 – 2,1 Тл
Довжина імпульсу плазми	0,5 с
Нагрів плазми NBI 40 кеВ	2*0,3 МВт

Таблиця 2.2

Параметри токамака ITER

Параметри	Значення
Великий радіус вакуумної	6,2 м
Малий радіус	2 м
Струм плазми	15 МА
Магнітне поле	5,3 Тл
Довжина імпульсу плазми	> 400 с
Нагрів плазми	73 МВт

На рис.2.3 показаний сучасний інжектор атомів літію комплексу ПЕС, який встановлено на токамаці COMPASS [19]. Комплектація інжектора ідентична першим інжекторам комплексу ПЕС, але розміщення елементів та їх дизайн суттєво відрізняються. По-перше між прискорювачем іонів та нейтралізатором встановлено вакуумний клапан, який за потреби може ізолювати камеру прискорювача іонів від нейтралізатора. Це важливо при первинному розігріві металічного натрію у нейтралізаторі і при «охолодженні»

камери розігрітого натрію, коли клапан оберігає елементи конструкції прискорювача від осідання парів натрію. Також застосовано суттєве технічне рішення по захисту персоналу від високої напруги – це захисні коробки для прискорювача та високовольтних ввідів. Завдяки розвитку технологій, такі елементи як термоемітер іонів літію (рис.2.3) та нейтралізатор (рис.2.4) виконані на сучасному високому технологічному рівні.



Рис. 2.3. Конструкція інжектора атомів літію діагностичного комплексу ПЕС на токамакі COMPASS.

На рис. 2.4 схематично показано конструкцію термоемісійного джерела іонів літію, у порівнянні з джерелом іонів (рис. 1.5), який розроблено у ННЦ ХФТІ – це набагато складніший та дорогий вироб.

Пористий диск (3) у вакуумі покривають або екріптитом ($Li_2O + Al_2O_3 + 2SiO_2$) або сподуменом ($Li_2O + Al_2O_3 + 4SiO_2$). Конструкція джерела іонів дозволяє мати температури матеріалу емітера більше $1300^{\circ}C$ та струм іонів літію до 5 мА з емісійної поверхні діаметром 19 мм (1,8 мА з 1 см^2).

У попередніх конструкціях нейтралізатора, ємність з натрієм нагрівалася до $280^{\circ}C$ та мала відсічний клапан. Безпосередньо перед плазмовим розрядом клапан відкривається і пари натрію досягають трубки, через яку проходить пучок іонів. У трубці, яка заповнена парою натрію, пучок іонів літію при зіткненні з парою, нейтралізується завдяки процесам перезарядки. Втрати пари натрію можуть бути достатньо великими, бо вони

прямо пропорційні довжині імпульсу плазми, а також пропорційні часу розігріву ємності з натрієм до необхідної температури випарування натрію.

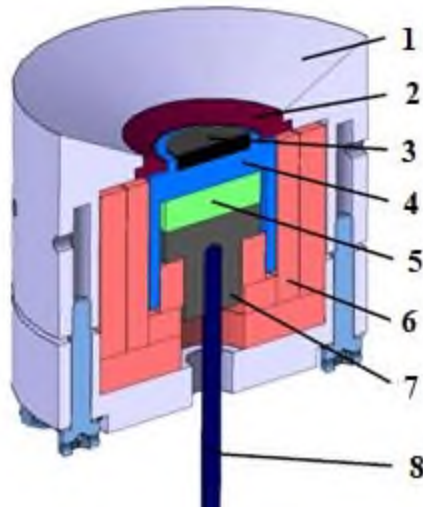


Рис. 2.4. Конструкція термемісійного джерела іонів літію для токамака COMPASS:

1- Пірсовий електрод; 2 – вставка з ніобію, 3 – молибденовий диск з емісійним матеріалом; 4 – вставка з молибдену; 5 – дисковий нагрівач; 6 – теплові екрани з алюмінію; 7, 8 – струмові провідники.

Сучасний дизайн нейтралізатора (рис. 2.5) замість циліндричної форми має конічну форму [18,19].

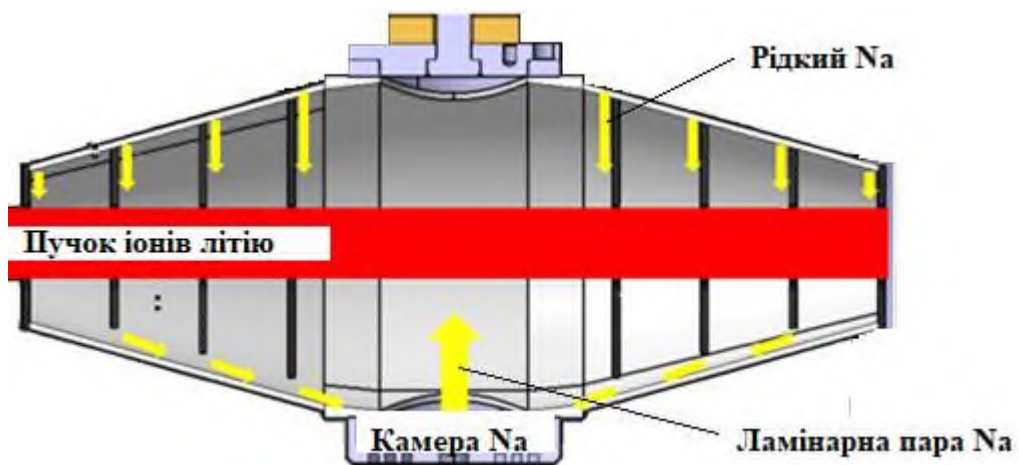


Рис. 2.5. Сучасний вигляд нейтралізатора на токамаці COMPASS.

Температуру конусної конструкції підтримують на рівні 160 °С, завдяки чому натрій конденсується на поверхні та стікає у камеру з натрієм. Безпосередньо перед вимірюваннями ємність з натрієм розігрівають, а після вимірів охолоджують. Таким чином зменшуються втрати натрію і можливо автоматизовано та циклічно проводити експеримент без суттєвих втрат натрію.

Сучасний діагностичний комплекс ПЕС на токамакі COMPASS, окрім високотехнологічної модернізації елементів має і суттєво ширший діапазон вимірювань параметрів плазми. У комплекс входять додаткові системи вимірювання: матриця лавинних фотодіодів для швидких вимірювань коливань густини електронів плазми; CCD камера для повільних вимірювань профілю густини електронів та положення пучка атомів у плазмі; зонд атомного пучка для вимірювання флуктуації струму плазми (Рис. 2.1., детектор струму іонів літію).

РОЗДІЛ 3

КОРПУСКУЛЯРНІ ДІАГНОСТИКИ У ІФП ННЦ ХФТІ.

3.1 Розвиток корпускулярних діагностик у ІФП ННЦ ХФТІ.

Перші роботи по корпускулярним методам діагностики плазми у ІФП ННЦ ХФТІ були зроблені більш ніж 50 років тому, ведучим науковим співробітником Крупнік Л.І.. На даний час, наукова група під керівництвом Крупнік Л.І. є світовим лідером у області корпускулярної діагностики. Під її керівництвом була встановлена та введена у дію діагностика ЗППВІ на шести термоядерних установках у 4 країнах світу.

У ІФП ННЦ ХФТІ діагностичний комплекс ЗППВІ встановлено на стелараторі Ураган-2М у 2014 році, перші результати опубліковані у 2015 році [20]. Виготовлено та проведено випробування інжектора атомів натрію для діагностичного комплексу ПЕС. ПЕС діагностику планувалося встановити на стеларатор Ураган-2М у 2024 році, встановлення відкладено у зв'язку з війною. На рис.3.1 показано розміщення діагностичних комплексів на стелараторі Ураган-2М. Параметри стеларатора Ураган-2М приведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Параметри стеларатора Ураган-2М.

Параметри	Значення
Великий радіус вакуумної камери (тор)	1,7 м
Малий радіус вакуумної камери	0,34 м
Магнітне поле	0,5 Тл

3.2 Діагностичний комплекс ЗППВІ на стелараторі Ураган-2М

Розроблений та виготовлений у ІФП ННЦ ХФТІ діагностичний комплекс зробив суттєвий вклад у розвиток аналогічних діагностик:

Для оцінки максимально можливих рівнів струму іонів різних типів емітерів застосовується спрощена формула Чайлд-Ленгмюра (9), це максимально можлива густина струму іонів для плоскопаралельного діода з поверхні 1 см².

$$J = 5,54 \cdot 10^{-8} \frac{U^{3/2}}{\sqrt{A} \cdot d^2} \quad (3.1)$$

U – напруга між твердотільним містером та екстрактором (В), A – а.м. іона, d – відстань між емітером та екстракторним електродом (см).

У таблиці 3.1 приведені розрахункові дані для різної напруги екстракції - U, маси іонів – літія, натрія и цезія та відстані між емітером та екстрактором - d₁, d₂.

Таблиця 3.1.

Залежність густини струму іонів від екстракторної напруги 3000 В, 5000 В, 7000 В, їх атомної маси та відстані емітер-екстрактор.

Тип іонів, а.м.	U, V	d ₁ , см	J, мА/см ²	d ₂ , см	J, мА/см ²
Cs ⁺ 133	3000	1	0,789	0,5	3,157
	5000	1	1,698	0,5	6,794
	7000	1	2,813	0,5	11,253
Na ⁺ 23	3000	1	1,898	0,5	7,593
	5000	1	4,084	0,5	16,337
	7000	1	6,765	0,5	27,062
Li ⁺ 7	3000	1	3,441	0,5	13,763
	5000	1	7,403	0,5	29,613
	7000	1	12,263	0,5	49,053

На рис.3.2-3.4 наведено залежності густини струму іонів трьох типів від напруги між емітером та екстракторним електродом, при відстанях між емітером та екстрактором 1 см та 0,5 см.

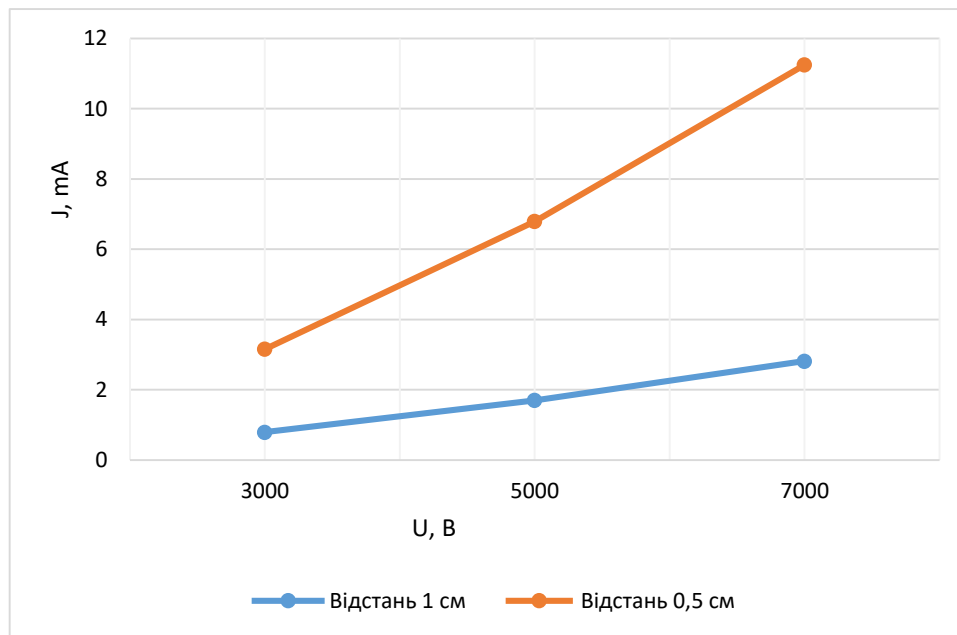


Рис.3.2. Графік залежності густини струму іонів Cs від напруги між емітером та екстракторним електродом, при відстанях між емітером та екстрактором 1 см та 0,5 см

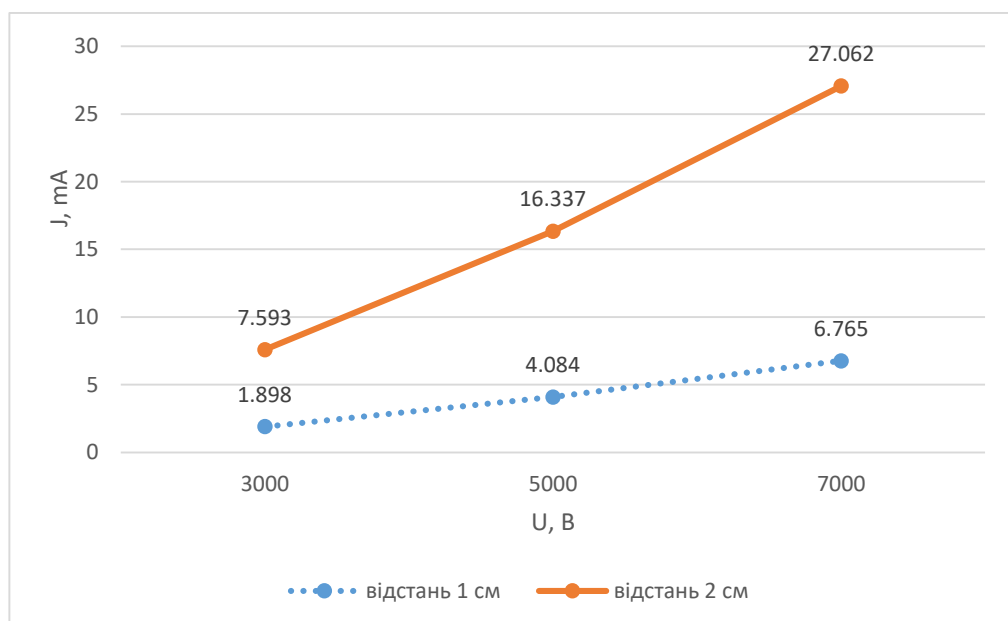


Рис.3.3. Графік залежності густини струму іонів Na від напруги між емітером та екстракторним електродом, при відстанях між емітером та екстрактором 1 см та 0,5 см

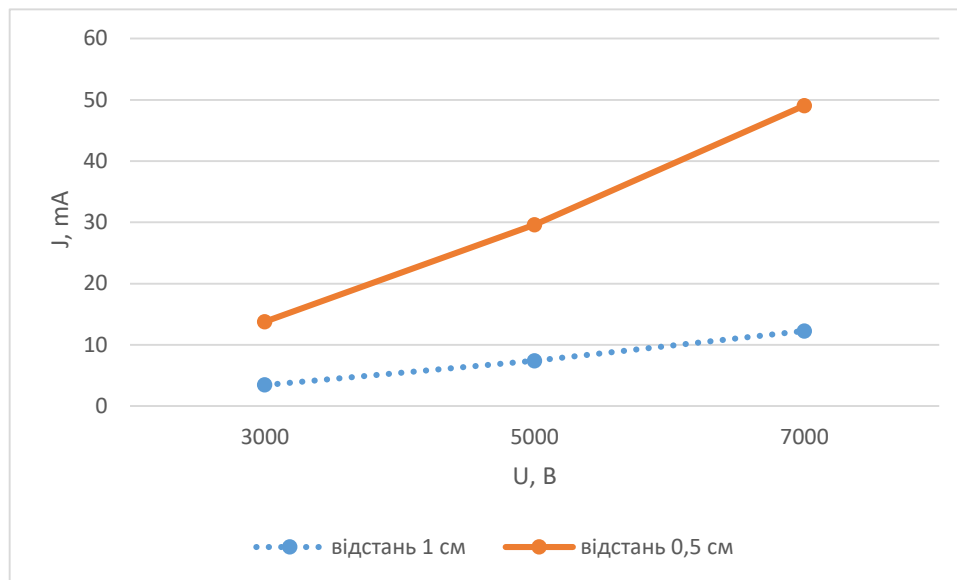


Рис.3.4. Графік залежності густини струму іонів Li від напруги між емітером та екстракторним електродом, при відстанях між емітером та екстрактором 1 см та 0,5 см

Твердотільні термоемітери, розроблені у ІФП ННЦ ХФТІ, мають рівень густини струму іонів Cs⁺, Na⁺ та Li⁺ близький до розрахункового по закону Чайд-Ленгмюра (9).

За допомогою ЗППВІ проведено вимірювання потенціалу плазми на стелараторі Ураган-2М. Вимірювання проводилися при магнітному полі стеларатора $B_T = 0,39$ Тл, енергії первинного пучка іонів $E_{\text{пучка}} = 70$ кеВ і струмі пучка іонів $I_{\text{пучка}} = (55 \dots 65)$ мкА. Потенціал плазми, порахований за струмами на детекторні пластини енергетичного аналізатора, для сигналу першого максимуму склав $\phi = -195$ В та для другого максимуму $\phi = -80$ В.

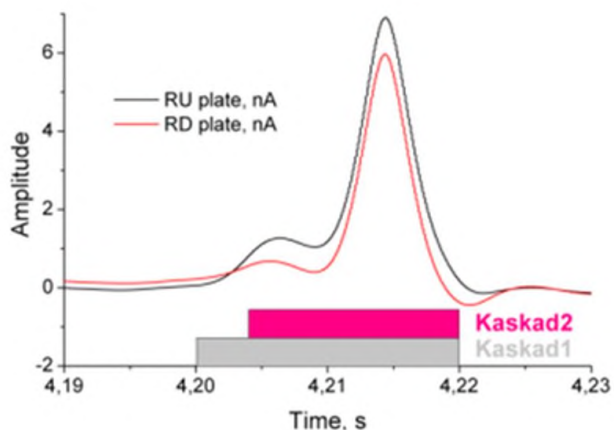


Рис. 3.5. Сигнали з колекторів енергетичного аналізатора у розряді плазми.

На рис.3.5 приведені струми вторинного іонного пучка цезію на колектори аналізатора за час імпульсу плазми. Для нагріву плазми застосовувалися два генератори КАСКАД. Отримані результати мають достатню кореляцію з даними зондів Ленгмюра та з густиною плазми по даним інтерферометру ($1,25 \dots 2,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^3$).

3.3 Інжектор атомарного пучка натрію для діагностичного комплексу ПЕС

На рис.3.6 приведена компоновка стендового варіанту інжектора атомів натрію з енергією до 70 кеВ та струмом іонів до 3 мА (діаметр емітера 15 мм). Стендовий варіант інжектора, у зрівнянні з інжектором діагностики ПЕС, має більшу кількість діагностичних пристроїв для вимірювання струму та профілю пучка іонів натрію.

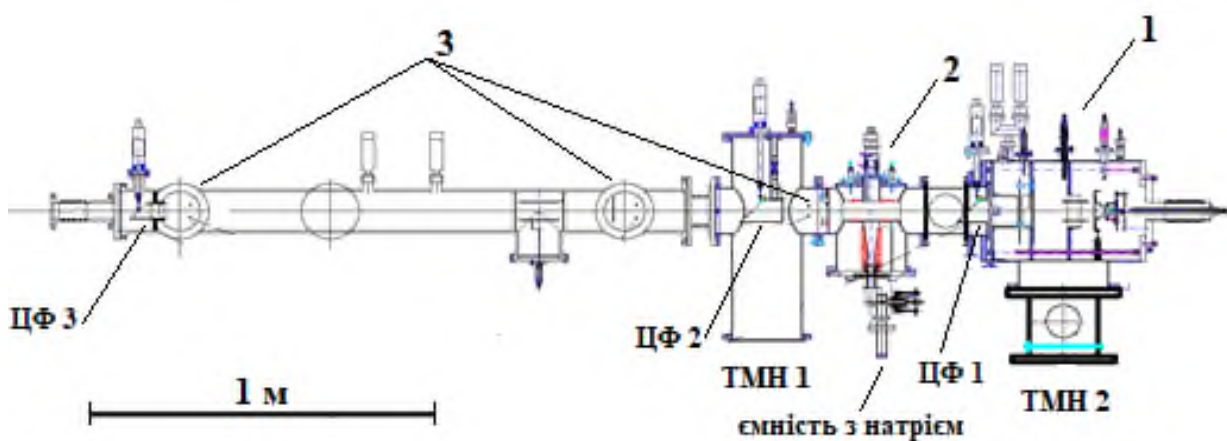


Рис.3.6. Інжектор атомарного пучка натрію, стендовий варіант.

1 – інжектор іонів натрію; 2 – нейтралізатор на парах натрію; 3 – дровові датчики профілю пучка; ЦФ 1, ЦФ 2, ЦФ 3 - циліндри Фарадея; ТМН 1, ТМН 2 - турбомолекулярні насоси.

Це пов'язано з вибором оптимальних параметрів як пучка іонів так і пучків атомів натрію, наприклад, на стенді застосовувалося три дровові датчики (3) та три циліндри Фарадея (ЦФ 1, ЦФ 2, ЦФ 3). Також стендовий варіант інжектора має два прозорих фланці у області прискорювача іонів та

області нейтралізації, що дає змогу візуально контролювати нештатні ситуації у прискорювачі (високовольтні пробої) і бачити діаметр пучка у області нейтралізації (рис.3.7).

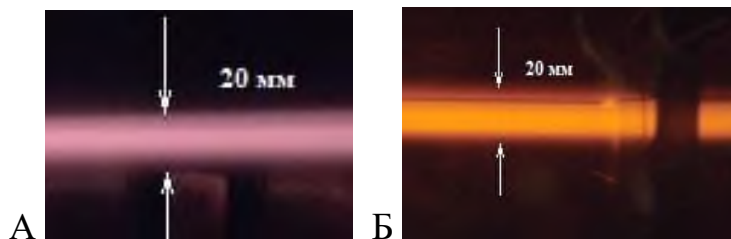


Рис.3.7. Фото пучка іонів та атомів натрію через прозорий фланець.

А – пучок іонів натрію у області нейтралізації,

Б – пучок атомів натрію після нейтралізатора.

Як видно з рис. 3.7 (А), діаметр іонного пучка у області нейтралізатора має практично паралельну структуру, що гарантує, при його нейтралізації, такий же паралельний атомарний пучок натрію. І це припущення підтверджується отриманими даними на рис.3.7 (Б). Параметри прискорювача іонів натрію для обох вимірювань практично однакові – енергія пучка 25 кеВ, струм іонів приблизно 1,5 мА. Це були перші унікальні результати по формуванню оптимальної структури нейтрального пучка натрію, наступні роботи – це збільшення енергії та струму іонів.

При розробці інжектора пучка атомів натрію були задіяні наступні особливості:

- Іонно-оптична система, яка базується на 5-ти електродній системі. Застосування додаткових фокусних електродів дозволяє фокусувати іонний пучок незалежно від енергії та струму іонів [21], що неможливо при застосуванні стандартної 3-х електродної системи [17]. Розрахунки п'яти-електродної конфігурації проводилися за допомогою програми SIMION 3D з енергією пучка до 70 кеВ та струмом до 10 мА.

- Конструкція нейтралізатора (рис.3.8) включає в себе клапан для перекриття ємності з натрієм. Це забезпечує практичну відсутність осадження

парів натрію при розігріві та охолодженні ємності з натрієм. Ємність з натрієм має фланцеве з'єднання з корпусом нейтралізатора, що дає можливість застосовувати різні конструкції ємностей. Наприклад, конструкцію не з ламінарним випаруванням натрію, а з надзвуковим струменем – яка суттєво зменшить «забруднення» конструкції парами натрію з інжектора при процесі нейтралізації. Це досягається за рахунок того, що при ламінарному потоці пари натрію будуть виходити з нейтралізатора в обидві сторони, а при надзвуковому струмені пари можуть конденсуватись на клапані з системою охолодження.

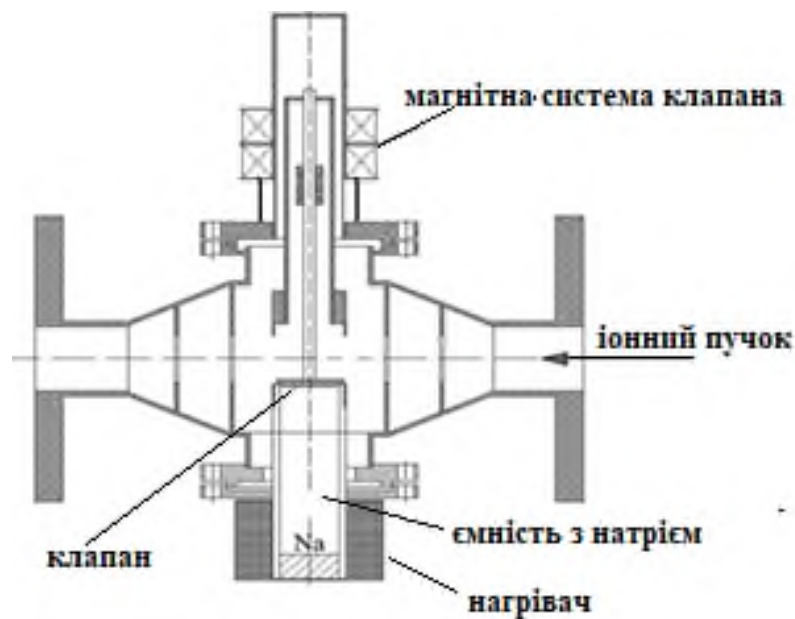


Рис.3.8. Конструкція нейтралізатора розроблена у ІФП ННЦ «ХФТІ».

ВИСНОВКИ

В роботі було розглянуто дві корпускулярні діагностики та вклад ІФП ННЦ ХФТІ у їх розвиток. Діагностика пучком важких іонів дозволяє отримати просторові розподіли профілів густини плазми, потенціалу плазми, полоїдальної складової магнітного поля плазми та їх флуктуацій. Особливою перевагою ЗППВІ при цьому є можливість проводити вимірювання потенціалу і густини по всьому перерізу плазми, а також те, що, на відміну від більшості діагностик, вона не збуджує плазму. В якості розширення ЗППВІ діагностики можна поставити не один блок, а два. Використання подвійної ЗППВІ діагностики відкриває шлях для дослідження довго-масштабних кореляцій (LRC) електричного потенціалу, профілю густини, полоїдального магнітного поля, полоїдальної та тороїдальної структури турбулентності плазми та різних типів нестійкості у центральній та периферійній плазмі.

За допомогою ПЕС діагностики можна отримувати дані просторового розподілу густини плазми та домішкових іонів у периферійній області термоядерних пристроїв, також вона має потенційну можливість вимірювання просторового розподілу полоїдального та тороїдального магнітних полів.

Виявлено що ІФП ННЦ «ХФТІ» вніс суттєвий внесок у розвиток корпускулярних діагностик, зокрема, у ньому виготовлено та проведено випробування інжектора атомів натрію для діагностичного комплексу ПЕС. Також саме в ньому оптимізовано конструкцію, що покращило основний параметр діагностики - співвідношення сигнал/шум. Розроблено й виготовлено джерело живлення на основі акумуляторів з підвищеним коефіцієнтом корисної дії та часом роботи. Розроблена технологія виготовлення високоемісійних твердотільних термоемітерів з довгим терміном життя.

Встановлено, що густини струму іонів в залежності від напруги між емітером та екстракторним електродом зростають.

Виявлено що густини струму іонів при зменшенні відстані між емітером та екстрактором зростають.

Встановлено що твердотільні термоемітери, розроблені у ІФП ННЦ ХФТІ, мають рівень густини струму іонів Cs^+ , Na^+ та Li^+ близький до розрахункового за законом Чайд-Ленгмюра. Були проведені перші унікальні роботи по формуванню оптимальної структури нейтрального пучка натрію, наступні роботи – це збільшення енергії та струму іонів. Також оптимізовані будова нейтралізатора та іонно-оптична система.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Recent diagnostic developments on LHD / [S. Sudo, Y. Nagayama, B. J. Peterson та ін.]. // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2003. – №45. – С. 1127–1142.
2. Installation of the advanced heavy ion beam probing diagnostic on the TJ-II stellarator / [I. S. Bondarenko, A. A. Chmyga, N. B. Dreval та ін.]. // Review of Scientific Instruments-January. – 2000. – №72. – С. 583–585.
3. Installation of the advanced heavy ion beam probing diagnostic on the TJ-II stellarator / [I. S. Bondarenko, A. A. Chmyga, N. B. Dreval та ін.]. // Czechoslovak Journal of Physics. – 2000. – №50. – С. 1397–1412.
4. The first operation of the advanced heavy ion beam probing diagnostic on the TJ-II flexible heliac / [L. I. Krupnik, I. S. Bondarenko, A. A. Chmyga та ін.]. // ELSEVIER. – 2001. – №56. – С. 935–939.
5. ДРЕВАЛЬ М.Б. Розвиток методів зондування плазми пучком важких іонів і його реалізація на стелараторі TJ-II : дис. канд. фіз.-мат. наук : УДК 533.9 / Древаль Микола Борисович – Харків, 2005.
6. Hickok R. L. Plasma Density Measurement by Molecular Ion Breakup / Hickok. // Review of Scientific Instruments. – 1967. – №38. – С. 142–143.
7. Study of density and potential fluctuations in the TEXT tokamak with a heavy ion beam probe / J. C.Forster, P. M. Schoch, R. L. Hickok, W. C. Jennings. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1994. – №22. – С. 359 – 362.
8. Heavy ion beam probe wavenumber measurements from the TEXT Tokamak edge / [T. P. Crowley, P. M. Schoch, J. W. Heard та ін.]. // Nuclear Fusion. – 1992. – №32.
9. Development of the heavy ion beam probing diagnostic and new results in the plasma electric potential investigations / [I. S. Bondarenko, A. A. Chmyga, N. B. Dreval та ін.]. // Problems of Atomic Science and Technology. 2000. №6. P. 178–180.

10. Heavy ion beam injectors for the plasma potential and electron temperature measurements / [I. S. Bondarenko, A. A. Chmyga, M. B. Dreval та ін.]. // Problems of Atomic Science and Technology. 2000. №6. P. 181–183.
11. Komarov A.D., Chmyga A.A., Chechkin V.V., et. al. Estimations of plasma potential and density by the heavy ion beam probing diagnostics on the Uragan-2M torsatron // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2016. No. 6. P. 306-309.
12. High-Intensity Thermionic Alkali Ion Sources for Plasma Diagnostics / [L. I. Krupnik, A. D. Komarov, A. S. Kozachek та ін.]. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2008. – №36. – C. 1536 – 1544.
13. Green T. S. A parallel plate electrostatic energy analyzer / T. S. Green, G. A. Proca. // Review of Scientific Instruments. – 1970. – №41. – C. 1409–1414.
14. Fujisawa A. 15. A Study of Non-Ideal Focus Properties of 30 degree Parallel Plate Energy Analyzers / A. Fujisawa, H. Iguchi, Y. Hamada. // National Institute for Fusion Science Research Report. – 1993. – №263.
15. Mason D. W. AN ELECTROSTATIC ION-ENERGY ANALYSER / Mason. // Journal of Nuclear Energy. – 1964. – №6. – C. 553–558.
16. McCormick K. Measurement of the scrape-off layer density profile on ASDEX via an energetic neutral lithium beam / K. McCormick. // Review of Scientific Instruments. – 1985. – №56. – C. 1063–1065.
17. MacCormick K. Edge Density Measurements with a Fast Li-beam Probe on Tokamak and Stellarator Experiments / K. MacCormick. // Max-Planck-Inst. für Plasmaphysik. – 1996. – №211.
18. Advanced neutral alkali beam diagnostics for applications in fusion research / [S. Zoletnik, G. Anda, M. Aradi та ін.]. // Review of Scientific Instruments. – 2018. – №89
19. Lithium beam diagnostic system on the COMPASS tokamak / [G. Anda, A. Bencze, M. Berta та ін.]. // ELSEVIER. – 2016. – №108. – C. 3.

20. Zhezhera A.I., Chmyga A.A., Deshko G.N., et. al. The first operation of the heavy ion beam probing diagnostic (HIBP) on the Uragan-2M torsatron // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2015. No.1. P. 276-279.
21. Chmyga A.A., Deshko G.N., Komarov A.D., et. al. The development of light ion injector for the plasma diagnostic system based on beam emission spectroscopy / Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2012. No.6. P. 252-254.