

АНОТАЦІЯ

Сюсько Є. В. **Застосування рефракції мікрохвиль для діагностики неоднорідної плазми.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія (Галузь знань 10 – Природничі науки). – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

У дисертаційній роботі розвинуто методи діагностики плазми, які засновані на рефракції, а саме: вимірювання зсуву фази мікрохвилі при похилому зондуванні плазми з фіксованими в просторі рупорними антенами, метод визначення азимутальних неоднорідностей плазми, що обертається. Похиле зондування (у випадку фіксованих у просторі рупорних антен) було вперше запропоновано реалізувати з використанням периферійної частини випромінювання рупорної антени.

Вимірювання зсуву фази хвиль при похилому зондуванні та метод визначення азимутальних неоднорідностей плазми, що обертається, можуть використовуватися у якості методів діагностики плазми, завдяки яким є можливість отримувати інформацію про периферійну плазму та визначати азимутальні неоднорідності плазми відповідно. Ці методи можуть бути використані як при дослідженні лабораторної плазми, так і в пристроях керованого термоядерного синтезу.

У роботі виконано розрахунки траєкторії мікрохвиль в неоднорідній плазмі технологічного пристрою МАКЕТ. Результати проведеного моделювання вказують на можливість використання рефракції мікрохвиль для дослідження плазми з різними розподілами густини з застосуванням периферійної частини випромінювання рупорної антени фіксованої у просторі відносно до плазми.

При дослідженні плазми імпульсного відбивного розряду в пристрої МАКЕТ виконано вимірювання зсуву фази хвиль при похилому зондуванні, що дало можливість отримати інформацію про параметри плазми в периферійних шарах плазмового утворення в інтервали часу, коли зондування крізь центр плазмового утворення неможливе. Проведена експериментальна перевірка та відпрацювання методу визначення азимутальних неоднорідностей на механічній моделі, яка імітує азимутальні неоднорідності шару плазми, що обертається, з критичною густиною. Експериментальна апробація цього методу на неоднорідній плазмі імпульсного відбивного розряду показала його придатність та перспективність для вимірювань азимутальних неоднорідностей плазми.

В першому розділі наведені основні методи діагностики плазми: зондові, корпускулярні, лазерні, оптичні, мікрохвильові. Серед мікрохвильових методів виділено й описано найбільш поширені активні методи: метод інтерферометрії, рефлектометрії. Наведено основні принципи та основи методу геометричної оптики, надано основні критерії можливості її застосування для опису розповсюдження мікрохвиль в плазмі. Також розглянуто рефракцію як поняття геометричної оптики, описані основні методи мікрохвильової діагностики плазми, що використовують рефракцію мікрохвиль. Показано вплив рефракції на точність визначення параметрів плазми при використанні мікрохвильових методів діагностики плазми.

У другому розділі виконано опис установки МАКЕТ, де реалізується потужний імпульсний відбивний розряд в схрещених електричному та магнітному полях. Описано основні параметри установки та її основних систем: системи управління, електророзрядної та магнітної систем, вакуумної системи і системи напуску робочого газу. Розглянуті та описані конструкційні особливості імпульсної, високовольтної електророзрядної та магнітної систем електрофізичної установки, що служить для отримання та дослідження багатокomпонентної газометалевої плазми. Приведено електричні схеми електромагнітної та електророзрядної

систем, описано їх принцип дії. Виконано розрахунки залежності напруги, заряду та струму у *RLC* колі магнітної системи. Проведено порівняння експериментально виміряних значень амплітуди і тривалості імпульсу розрядного струму через магнітну систему з розрахунковими, яке показало, що розбіжності тривалості імпульсу струму та його амплітуди не перевищує $\pm 2\%$. Описано можливості вакуумної системи, системи напуску робочого газу.

У третьому розділі були описані геометричні параметри рупорних антен установки МАКЕТ та зроблена оцінка їх основних випромінюючих характеристик. Виконано розрахунки ефективної площі поверхні та коефіцієнт використання поверхні рупорної антени, розподіл вектора Пойнтінга. З розрахункових та експериментальних даних встановлено, що розподіл вектора Пойнтінга та виміряної амплітуди мікрохвильового сигналу детектором якісно схожі та співпадають по формі. Розрахунки та вимірювання проводились вздовж координати x , вправо або вліво до 150 мм, паралельно розкриву рупорної антени, $x = 0$ мм – координата осі антени, крок розрахунку 1 мм, $y = \text{const}$, $z = \text{const}$. Аналіз розрахункових та експериментальних даних показує, що приймальні характеристики антени повністю задовольняють умовам використання її на частоті 37,2 та 71 ГГц для експериментів з рефракцією мікрохвиль на установці МАКЕТ.

Проведено розрахунки траєкторій мікрохвильових променів в неоднорідній плазмі з урахуванням геометричних параметрів установки МАКЕТ, геометричного розташування рупорних антен, їх основних характеристик та параметрів плазми. Розрахунки траєкторії проводились для різних профілів густини з максимумом на осі плазмового формування, при різних значеннях кутів падіння, максимуму густини та частот зондування. Отримані розрахункові дані траєкторії мікрохвильових променів для параболічного профілю густини з максимумом на осі плазмового формування демонструють принципову можливість використання мікрохвильової рефракції для діагностики плазми в установці МАКЕТ при фіксованих в просторі рупорних антенах. Показано, що використання рефракції

мікрохвиль на частотах 37,2 та 71 ГГц дає змогу розширити можливості мікрохвильової діагностики плазми в установці МАКЕТ.

З урахуванням отриманих шляхом моделювання результатів проведено експерименти із застосуванням рефракції в установці МАКЕТ. Експерименти продемонстрували, що залежно від густини плазми мікрохвильові промені на частоті 37 ГГц, потрапляють на рупорні антени, розміщені під кутом 60° та 120° відносно осі антени, що випромінює. При наростанні густини мікрохвильовий сигнал спочатку реєструється приймальною антеною під кутом $\varphi_2 \approx 120^\circ \pm 9^\circ$. Пізніше при $\frac{N_p(0)}{N_{cr}} > 1$ ($N_p(0)$ – густина електронів плазми на осі плазмового формування, N_{cr} – критична густина) сигнал реєструється приймальною антеною під кутом $\varphi_1 \approx 60^\circ \pm 9^\circ$ (в антені під кутом $\varphi_2 \approx 120^\circ \pm 9^\circ$ немає сигналу), а у випадку $1,75 > \frac{N_p(0)}{N_{cr}}$ сигнал відсутній для обох антен. При розпаді плазми спостерігається подібна картина, але в зворотному порядку. Показано, що така ж картина спостерігається і у розрахунках. Проведені експерименти по дослідженню рефракції мікрохвиль на частотах 36 та 71 ГГц продемонстрували можливість прийому мікрохвиль на рупорну антену зміщену на кут 60° відносно осі антени, що випромінює. Як розрахунки, так і експерименти показують, що у випадку, коли $N_p > N_{cr}$, для хвилі на частоті 36 ГГц, сигнал на антені відсутній, а для частоти зондування 71 ГГц для тих самих умов сигнал реєструвався, навпаки, максимальний. Тому завдяки похилому зондуванню плазми мікрохвилями на різних частотах може здійснюватися зондування різних шарів плазми. Проведені дослідження продемонстрували можливість використання периферійної частини випромінювання рупорної антени для діагностики плазми у випадках, коли кут нахилу рупорних антен не можливо змінювати.

У четвертому розділі було запропоновано: за рахунок використання периферійної частини випромінювання рупорної антени виконати зондування периферійних шарів плазми похилими мікрохвилями, виконати вимірювання

зсуву фази даних хвиль, що пройшли крізь периферійні шари плазми. Для цього було проведено розрахунки фази мікрохвильових променів в неоднорідній плазмі при наскрізному зондуванні (крізь вісь плазмового циліндра) і при похилому зондуванні, яке реалізується за рахунок мікрохвильових променів, які падають похило на поверхню плазми, що зондується. Початкові умови поставленої задачі брались згідно геометрії установки МАКЕТ, положення і параметрів рупорних антен, типових параметрів плазми, що утворюється в установці. Результати розрахунків показали принципову можливість використання вимірювання зсуву фази мікрохвилі при похилому зондуванні для діагностики периферійних шарів плазми. У випадку вимірювання зсуву фази хвиль при похилому зондуванні при прийомі мікрохвиль під кутами $60^\circ \pm 9^\circ$ та $120^\circ \pm 9^\circ$, фазовий зсув спостерігається як при $N_{cr} > N_{max}$, так і при $N_{cr} < N_{max}$ (N_{max} – максимальна густина плазми). Це говорить про те, що, використовуючи вимірювання зсуву фази мікрохвилі при похилому зондуванні з фіксованими в просторі рупорними антенами, є можливість реєструвати фазові зсуви навіть у випадку, якщо густина плазми вище критичного значення і наскрізна інтерферометрія неможлива. Також було розраховано радіус критичного шару плазми r_{cr} з густиною рівною N_{cr} , коли за рахунок рефракції та віддзеркалення від шару з критичною густиною частина або всі мікрохвильові промені потрапляють у прийомну антену під кутом 60° . При параболічному профілі густини r_{cr} належить до проміжку між 5,2 до 6,3 см. Розрахунки r_{cr} показують, що при інших функціях розподілу густини вздовж радіуса значення r_{cr} знаходяться в межах 4,5 – 6,5 см.

Описано експерименти з визначення густини плазми за допомогою інтерферометрії при наскрізному зондуванні та зондуванні з використанням рефракції мікрохвиль, коли приймальні рупори розташовано під кутами 60° та 120° . Ці експерименти показали, що використання рефракції мікрохвиль дозволяє вимірювати густину плазми в окремих її шарах при неможливості наскрізного зондування плазмового утворення. При $N_{cr} < N_p$ (N_p – густина електронів плазми)

фазовий зсув відсутній при зондуванні крізь центр плазмового утворення і фазовий зсув присутній при похилому зондуванні. Експериментально виміряно середній час відсутності фазових зсувів при зондуванні крізь центр плазмового утворення $\tau_1 = 3,12 \pm 0,21$ мс та при похилому зондуванні $\tau_2 = 1,04 \pm 0,25$ мс. Визначено залежність добутку $\overline{N_p L}$ (добуток усередненої густини плазми на оптичний шлях L мікрохвиль в плазмі) від часу, а також оцінена величина середньої густини плазми при зондуванні крізь центр плазми та похилому зондуванні. При цьому в обох випадках зондування (при густині плазми $N_{cr} > N_p$) отримано близьке значення середньої густини плазми, що задовільно узгоджується з припущенням віддзеркалення мікрохвильових променів від протилежної поверхні камери. Проведені дослідження продемонстрували можливість використати вимірювання зсуву фази мікрохвилі при похилому зондуванні для діагностики периферійної плазми.

У п'ятому розділі запропоновано метод визначення азимутальних неоднорідностей плазми, що обертається. Метод заснований на спектральному та кореляційному аналізі віддзеркалених від плазми сигналів при похилому й нормальному падінні на плазмову поверхню. Перевірка і відпрацювання методу визначення азимутальних неоднорідностей густини плазми, що обертається, проводилась на механічній моделі. Експериментальна апробація методу проводилася на установці МАКЕТ, в якій реалізується імпульсний відбивний розряд в схрещених електричному та магнітному полях. Плазма зондувалася «звичайною» хвилею на частоті зондування $f = 36$ ГГц. Характер віддзеркалених від плазми сигналів подібний отриманим раніше для механічної моделі циліндра з трьома жолобками. Проведений аналіз віддзеркалених від плазми сигналів дозволив виявити коливання густини електронів плазми з азимутальною модою $m = 3$; визначити значення кутів азимутального зміщення жолобків $\approx 120^\circ, 123^\circ, 118^\circ$; виміряти кутову швидкість обертання азимутальних

неоднорідностей, що знаходиться в діапазоні від $2 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^4$ рад/с. Проведені експериментальна перевірка, відпрацювання та апробація методу визначення азимутальних неоднорідностей плазми, що обертається, показали перспективність дослідженого у дисертації методу діагностики плазми.

Ключові слова: мікрохвилі, промінь, рефракція, плазма, густина, розряд, імпульс, інтерферометрія, ВЧ методи, генератор, антена, спектр, магнітне поле, рупор.