

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА,

ЛЕЛЕКО ЯКІВ ФЕЛІКСОВИЧ



УДК 533.9

**ФІЗИЧНІ ЯВИЩА В ПЕРЕХІДНОМУ ШАРІ НА МЕЖІ СЛАБО
ІОНІЗОВАНОЇ ПЛАЗМИ**

01.04.08 – фізика плазми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків — 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна МОН України та в Національному науковому центрі "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Греков Дмитро Леонідович,
Інститут фізики плазми ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,
завідувач відділу теорії плазми.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Засенко Володимир Іванович,
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН
України (м. Київ),
заступник директора з наукової роботи;

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Кравченко Олександр Юрійович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка МОН України,
доцент кафедри фізичної електроніки факультету
радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем.

Захист дисертації відбудеться ” 14 ” травня 2021 р. о 16-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61108, м. Харків, пр. Академіка Курчатова, 31, ауд. 313.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи 4.

Автореферат розісланий “ 12 ” квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.051.12



Андрій ГАХ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасному світі плазмові прилади широко застосовуються в промисловості, наукових дослідженнях та повсякденному житті. Дослідження плазми проводяться в галактичному та планетарному просторах, в навколоземній атмосфері, в технологічних приладах та термоядерних установках. При створенні, утриманні та діагностиці плазма межує з різними поверхнями, наприклад, стінки камер установок, різні вимірювальні прилади, зонди, антени для створення ВЧ коливань і таке інше. У всіх цих випадках на межі плазми з твердими поверхнями утворюється перехідний шар, вивчення явищ в якому і проведено в дисертації. Вона присвячена теоретичному дослідженню і чисельному моделюванню таких фізичних явищ в перехідному шарі на межі слабо іонізованої плазми, як розподіл параметрів плазми в стаціонарних газових розрядах з урахуванням в'язкості іонів, вплив перехідного шару на межі плазми на іонно-звукові коливання в сильно неізотермічній ($T_e \gg T_i$) неоднорідній водневій плазмі, розподіл потенціалу високочастотної антени в межовому ергодичному шарі плазми в торсатроні «Ураган-3М», поглинання електромагнітних хвиль електронами на межі діелектрик - плазма. Такий вибір теми досліджень визначає актуальність теми дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в теоретичному відділі Інституту фізики плазми Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України і на кафедрі прикладної фізики і фізики плазми фізико-технічного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України. Дослідження, матеріали яких містяться в дисертаційній роботі, є частиною фундаментальної науково-дослідної роботи, яка виконувалася за державними темами: «Електродинамічні та оптичні властивості фрактальних та надрозмірних систем» (номер державної реєстрації 0100U003299, роки виконання 2000-2002), «Взаємодія потоків частинок і хвиль з матеріалами в задачах з КТС» (номер державної реєстрації 0103U004199, роки виконання 2003-2005), «Вплив домішок на поширення, загасання та поглинання електромагнітних хвиль в плазмових пристроях» (номер державної реєстрації 0109U001330, роки виконання 2009-2011), «Теорія утримання і нагрівання плазми в магнітних пастках керованого термоядерного синтезу і у високочастотних розрядах пристроїв плазмових технологій» (номер державної реєстрації 0111U006907, роки виконання 2010-2015), «Теорія взаємодії електромагнітних полів з плазмою та явищ переносу в тороїдальній, неідеальній та заряджених плазмах» (номер державної реєстрації 0116U001991, роки виконання 2015-2020), «Фундаментальні властивості потоків частинок та енергії в плазмі термоядерних та технологічних пристроїв» (номер державної реєстрації 0120U102300, роки виконання 2020-2022).

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є виявлення впливу перехідного шару скінченої товщини на межі слабо іонізованої неізотермічної плазми на фізичні явища, що відбуваються в цьому шарі між плазмою та стінкою.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- розглянути іонно-звукові коливання в сильно неізотермічній слабо іонізованій неоднорідній плазмі;
- дослідити розподіл постійного потенціалу високочастотної антени в перехідному ергодичному шарі при нагріванні плазми в торсатроні «Ураган-3М»;
- вивчити поглинання електромагнітних хвиль при їх відбитті від плазми електронами в перехідному шарі діелектрик – плазма;
- дослідити поглинання поверхневих електромагнітних хвиль електронами в перехідному шарі діелектрик – плазма.

Об'єкт дослідження: перехідний шар на межі слабо іонізованої плазми.

Предмет дослідження: різноманітні фізичні явища, що відбуваються в перехідному шарі на межі плазма – стінка.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених завдань було використано як аналітичні, так і чисельні методи. Для знаходження рівноважних параметрів слабо іонізованої сильно неізотермічної плазми застосовувалося квазінейтральне наближення. Система нелінійних рівнянь, яку було отримано, вирішена за допомогою оригінального ітераційного алгоритму. Для знаходження компоненти електричного поля електромагнітної хвилі, яка є нормальною до межі діелектрик - плазма, система рівнянь Максвелла була перетворена до лінійного інтегрального рівняння. Це рівняння було вирішено чисельно за допомогою розкладання за ортогональними поліномами Лежандра.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в дисертації вперше:

- визначено загасання електромагнітної хвилі при її косому падінні з діелектрика на поверхню, що межує з плазмою, внаслідок поглинання енергії хвилі електронами плазми, що взаємодіють з нормальною до поверхні розділу складовою електричного поля цієї хвилі в перехідному шарі;
- визначено загасання поверхневої електромагнітної хвилі внаслідок поглинання її енергії електронами плазми, що взаємодіють з нормальною до поверхні розділу складовою електричного поля поверхневої хвилі в перехідному шарі;
- знайдено залежності реальної та уявної частин частоти об'ємних іонно-звукових коливань як функції хвильового вектора в локальному наближенні для неоднорідних рівноважних параметрів плазми;
- проведено оцінки впливу випрямленого зондом потенціалу високочастотних хвиль, які збуджуються рамковою антеною, випрямленого потенціалу антени, який виникає при подачі на неї високочастотної напруги і пондеромоторної сили Міллера на результати вимірювань потенціалу ленгмюрівським зондом.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність проведеного в дисертації дослідження полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані для аналізу та підвищенню ефективності застосування розрядів, параметри яких близькі до тих, що використані в дисертації, наприклад,

жевріючого розряду. Більш того, результати дисертації можуть бути застосовані для якісної оцінки ефективності застосування плазми з параметрами, які відрізняються від тих, що використано при обчисленнях в дисертації. Отримані в дисертації результати пояснили причину виникнення різниці вимірів плаваючого потенціалу між ленгмюрівськими зондами в торсатроні "Ураган-3М", один з яких розташований далеко від рамкової антени, а інший біля неї.

Використання результатів роботи. Результати розробок і досліджень, виконаних в рамках дисертації, використовуються або будуть використані в теоретичних і експериментальних дослідженнях в Інституті фізики плазми ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна МОН України, в Інституті ядерних досліджень НАН України, м. Київ, на факультеті радіофізики та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка МОН України, в Інституті фізики НАН України, м. Київ.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, що увійшли в дисертацію, отримано при безпосередній участі автора. Особистий внесок здобувача у всіх опублікованих роботах [1-10] полягає у розробці постановки задач та розв'язанні сформульованих задач, моделюванні та проведенні чисельних розрахунків, аналізі джерел наукової літератури, інтерпретації та обговоренні отриманих результатів, їх підготовці до публікації, написанні статей і презентації доповідей за темою дисертації.

У роботах [3, 7] здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні тимчасової плазмон - поляритонної луни в напівпровіднику, який обмежений металом, в гідродинамічному наближенні і провів розрахунки значення часу генерації луна-сигналу і електромагнітного поля відгуку плазми.

У роботах [4, 6] здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні рівноваги сильноточових електронних пучків в циклічних системах типу модифікований бетатрон і стеллатрон і провів розрахунки траєкторій електронів, умови утримання пучка, розподілу електронів в пучку.

У роботах [1, 5] здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні впливу перехідного шару на поглинання електромагнітних хвиль при їх косому падінні з діелектрика на поверхню, що межує з плазмою, з частотою, меншою за ленгмюрівську частоту в середині плазми, і поверхневих електромагнітних хвиль і провів розрахунки розподілу електричного поля в перехідному шарі і коефіцієнту поглинання електронами плазми електромагнітних хвиль в цьому шарі.

В роботі [2] здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні іонно-звукових коливань в сильно неізотермічній слабо іонізованій неоднорідній водневій плазмі і провів розрахунки стаціонарного розподілу параметрів сильно неізотермічної слабо іонізованої водневої плазми в гідродинамічному наближенні в області квазінейтральності та в перехідному шарі між діелектриком та плазмою з урахуванням ефектів іонізації, перезарядки, в'язкості та самоузгодженого електричного поля і залежностей частоти та декременту загасання іонно-звукових коливань, пов'язаних із зіткненнями частинок в плазмі, від хвильового вектора у локальному наближенні.

В роботі [10] здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні впливу високочастотних хвиль на потенціал ленгмюрівського зонду в торсатроні «Ураган-3М» і провів розрахунки та оцінки випрямлення зондом потенціалу високочастотних хвиль, які збуджуються рамковою антеною, випрямленого потенціалу антени, який виникає при подачі на неї високочастотної напруги і пондеромоторної сили Міллера на показання ленгмюрівського зонду.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені, доповідалися і обговорювалися на міжнародних конференціях:

- High-Power Particle Beams, 8th International Conference (Novosibirsk, USSR, 2–5 July 1990);
- IEEE International Conference on Plasma Science (Vancouver, Canada, 3-5 June 1993);
- International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kharkiv, Ukraine, 15-18 September, 2014);
- International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kharkiv, Ukraine, 12-15 September, 2016)

та численних наукових семінарах на фізико-технічному факультеті Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна та в Інституті фізики плазми ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 10 наукових праць, серед яких 1 статтю [1] опубліковано в спеціалізованому фаховому науковому виданні України, 1 статтю [2] опубліковано в спеціалізованому науковому виданні України, яке включено в міжнародні наукометричні бази Scopus і Web of Science, 3 статті [3-5] опубліковано в спеціалізованих наукових виданнях іноземних держав, які включено в міжнародні наукометричні бази Scopus або Web of Science, 4 роботи [6-9] опубліковано в матеріалах і тезах доповідей на наукових конференціях і 1 стаття [10], що додатково відображає наукові результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та одного додатка. Обсяг загального тексту дисертації складає 145 сторінок, з них основного тексту 109 сторінок. Робота ілюстрована 51 рисунком. Список використаних джерел містить 111 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами і темами, сформульовано мету і задачі роботи. Сформульовано наукову новизну і практичне значення роботи та отриманих результатів. Відображено публікації, особистий внесок здобувача та апробація результатів дисертації. Наведені дані про структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі дисертації досліджено розподіл параметрів плазми в стаціонарних газових розрядах з урахуванням в'язкості іонів та вплив перехідного

шару на межі плазми на іонно-звукові коливання в сильно неізотермічній неоднорідній водневій плазмі.

Секція 3.1 дисертації присвячена з'ясуванню ролі в'язкості іонів в формуванні розподілів параметрів плазми в стаціонарних газових розрядах.

Як було відомо, при дослідженні розподілу параметрів плазми в стаціонарному газовому розряді плазму можна умовно розділити на дві області. Перша – основний об'єм плазми, де майже точно виконується умова квазінейтральності: густина іонів майже дорівнює густині електронів, що розподілені в потенціалі плазми у відповідності з розподілом Больцмана. Розподіл потенціалу в плазмі визначається виходом електронів на поверхню, що обмежує плазму, і подальшим екрануванням цієї поверхні іонами. Друга область – перехідний шар, де іони екранують поверхневий заряд, який створюється електронами, і де не виконується умова квазінейтральності. Приблизною «межею» цих областей є точка, де швидкість іонів, що прискорюються у напрямку поверхні, дорівнює швидкості Бома $v_B = \sqrt{(T_e + T_i)/m_i}$, де T_e – температура електронів, T_i і m_i – температура і маса іонів. Відстань цієї точки від поверхні становить $\approx 30r_{De}$, де r_{De} – радіус Дебая-Хюккеля електронів.

Задача про визначення параметрів стаціонарного газового розряду є задачею на власні функції і власні значення. Зазвичай замість неї розв'язують задачу Коші з початковими умовами в центрі плазми, а координата граничної поверхні визначається з умови рівності потоків іонів і електронів. «Правильне» положення поверхні можна отримати, якщо при інших фіксованих параметрах змінювати, наприклад, густину електронів в центрі плазми.

В цьому розділі використовувалась система гідродинамічних рівнянь руху (1) і неперервності (2) іонів і рівняння Пуассона (3) в одновимірному випадку.

$$v_i \frac{dv_i}{dx} = -\frac{e}{m_i} \frac{d\varphi}{dx} - \left(v_{ex} + \alpha_e \frac{n_{e0} \exp\left(\frac{e\varphi}{T_e}\right)}{n_i} \right) v_i - \frac{T_i}{m_i n_i} \frac{dn}{dx} + \frac{4}{3} \bar{\eta}_i \frac{d^2 v_i}{dx^2}, \quad (1)$$

$$\frac{d(n_i v_i)}{dx} = \alpha_e n_{e0} \exp\left(\frac{e\varphi}{T_e}\right), \quad (2)$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = 4\pi e \left(n_{e0} \exp\left(\frac{e\varphi}{T_e}\right) - n_i \right), \quad (3)$$

де v_i , n_i , $\bar{\eta}_i$ – гідродинамічні швидкість і густина та коефіцієнт кінематичної в'язкості іонів, φ – потенціал самоузгодженого електричного поля, n_{e0} – густина електронів в центрі плазми, α_e – частота іонізації, v_{ex} – частота перезарядки іонів на атомах водню, e – елементарний заряд. Для знаходження стаціонарного розподілу параметрів плазми (див. Рис. 1) ця система була вирішена без урахування в'язкого доданка в рівнянні руху іонів (1). Потім на основі отриманого рішення була проведена оцінка вкладу цього доданка у всій області плазми. На Рис. 2 показано залежність відношення доданків рівняння руху (1) до першого доданка правої

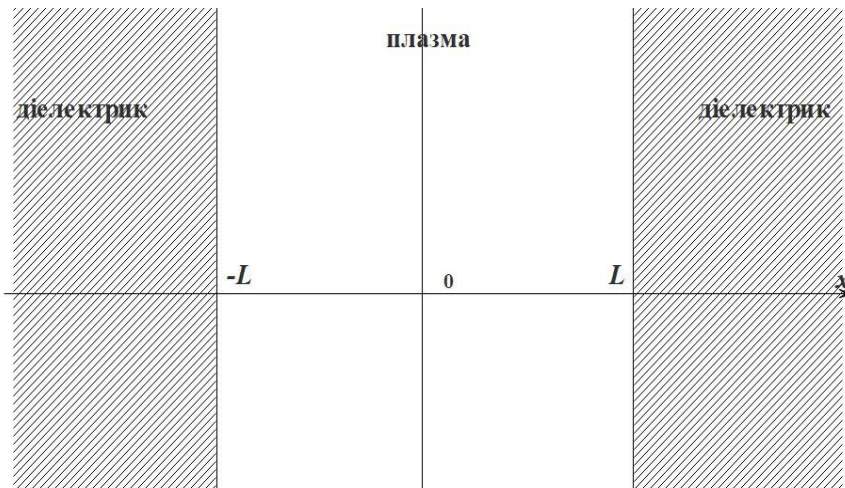


Рис. 1. Схематичне розташування плазмового шару і діелектрика, який обмежує плазму, щодо координати x .

частини рівняння. В області квазінейтральності було отримано рішення з урахуванням в'язкого доданка.

Зазвичай, при визначенні розподілу параметрів плазми в стаціонарному газовому розряді температурою іонів нехтували. В роботі запропоновано і

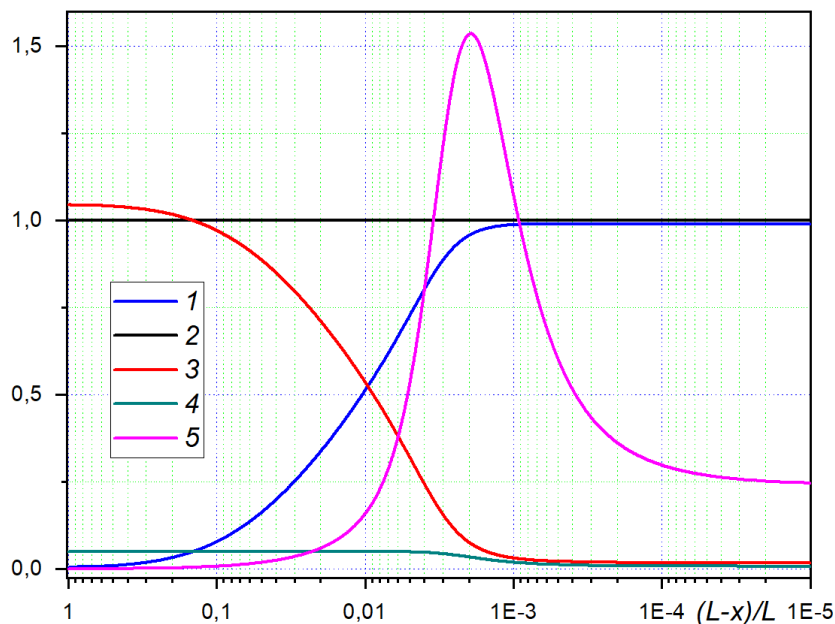


Рис. 2. Залежність відношення доданків рівняння руху (1) до доданка, який містить електричне поле від координати $(L-x)/L$ у логарифмічному масштабі у випадку $n_{e0} = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $n_n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 2 \text{ eV}$ і $T_i = 0.1 \text{ eV}$. Цифрами позначені частини від ділення на перший доданок правої частини рівняння: 1 – лівої частини рівняння, 2 – першого, 3 – другого, 4 – третього, 5 – четвертого доданків правої частини рівняння.

частини рівняння, який містить електричне поле, від координати $(L-x)/L$ у логарифмічному масштабі у випадку $n_{e0} = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $n_n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 2 \text{ eV}$ і $T_i = 0.1 \text{ eV}$, де n_n – густина нейтральних частинок.

Цифрами позначені частини від ділення на перший доданок правої частини рівняння: 1 – лівої частини рівняння, 2 – першого, 3 – другого, 4 – третього, 5 – четвертого доданків правої частини рівняння.

було отримано рішення з урахуванням в'язкого доданка.

Застосовано метод

визначення розподілів

параметрів сильно

неізотермічної плазми з

урахуванням скінченної

температури іонів. На основі

цього методу проведено

оцінки ефекту в'язкості в

рівнянні руху іонів і

отримано розподіли

параметрів плазми з

урахуванням в'язкості іонів в

квазінейтральному

наближенні. Показано, що в

області квазінейтральності,

тобто майже у всьому об'ємі

плазми, цей ефект є малим.

Він не веде до помітної зміни

центральної густини плазми.

З іншого боку, розрахунки

показують, що в'язкість іонів

суттєво впливає на розподіл

параметрів плазми в

перехідному шарі.

У секції 1.2 дисертації досліджено поширення і поглинання об'ємних іонно-звукових коливань у сильно неізотермічній слабо іонізованій неоднорідній водневій плазмі в локальному наближенні.

Отримано стаціонарний розподіл параметрів сильно неізотермічної слабо іонізованої водневої плазми в гідродинамічному наближенні в області квазінейтральності та в перехідному шарі між діелектриком та плазмою з урахуванням ефектів іонізації, перезарядки, в'язкості та самоузгодженого електричного поля. Для цього була використана система рівнянь (1) - (3), яка приведена вище. Визначено функцію розподілу іонів за швидкостями у відповідності з розподілом потенціалу самоузгодженого поля. Далі в гідродинамічну систему рівнянь (1) - (3) з відомими рівноважними рішеннями були додані малі нестационарні доданки, які описують іонно-звукові коливання. Отримана

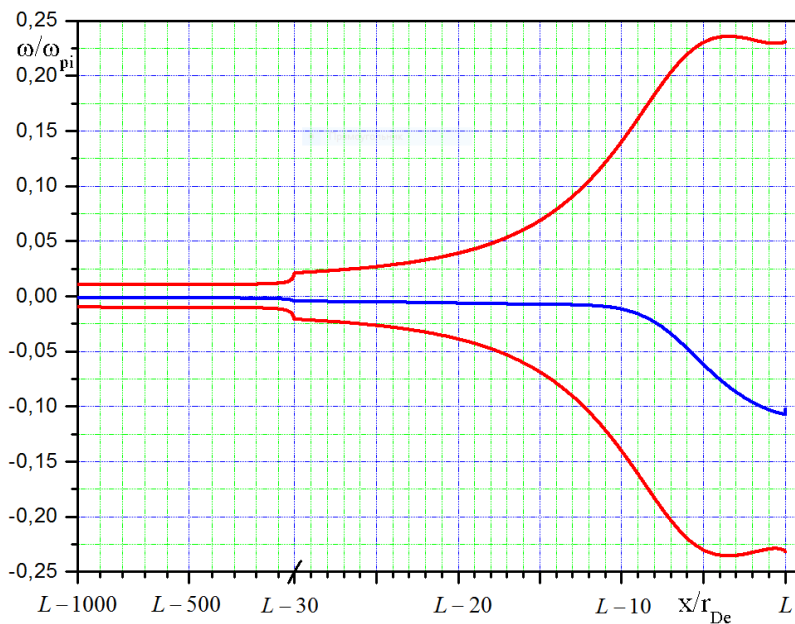


Рис. 3. Залежності реальної (червона лінія) і уявної (синя лінія) частин частоти іонно-звукових коливань від координати x/r_{De} для випадку $k_y r_{De} = 0.01$, $k_x \ll k_y$.

лінеаризована система рівнянь була перетворена в дисперсійне рівняння. Чисельне рішення цього рівняння - залежності реальної (червона лінія) і уявної (синя лінія) частин частоти іонно-звукових коливань від координати x/r_{De} для випадку $k_y r_{De} = 0.01$, $k_x \ll k_y$ наведені на рис. 3, де ω - частота іонно-звукових коливань, ω_{pi} - ленгмюрівська частота іонів, k_y і k_x - компоненти хвильового вектора в паралельному (y) і перпендикулярному (x) напрямках до поверхні розділу.

Показано, що в глибині плазми дисперсія іонно-звукових коливань слабо відрізняється від відомої формули $\omega = kv_s$, а загасання обумовлено ефектами, пов'язаними з перезарядкою і в'язкістю іонів і електронів. Доведено, що при наближенні до перехідного шару, і в самому шарі, істотну роль у виразі для частоти коливань починає грати градієнт густини іонів, який обумовлює суттєве, в рази, збільшення частоти. При цьому значно зростає загасання іонно-звукових коливань, в якому визначальну роль починають грати складові, пов'язані з неоднорідністю гідродинамічної швидкості іонів.

У другому розділі дисертації розглянуто вплив електромагнітних високочастотних хвиль на вимір потенціалу плазми ленгмюрівським зондом в торсатроні «Ураган-3М», в якому для створення і нагріву водневої плазми високочастотними полями в області альфвенівських частот $\omega \lesssim \omega_{ci}$ (ω - частота генератора, ω_{ci} - циклотронна частота іонів) використовується неекранована рамкова антена, яка показана на Рис. 4.



Рис. 4. Рамкова антена.

Модуль магнітного поля нормований на B_0 – пунктирні лінії. Перетини поздовжніх

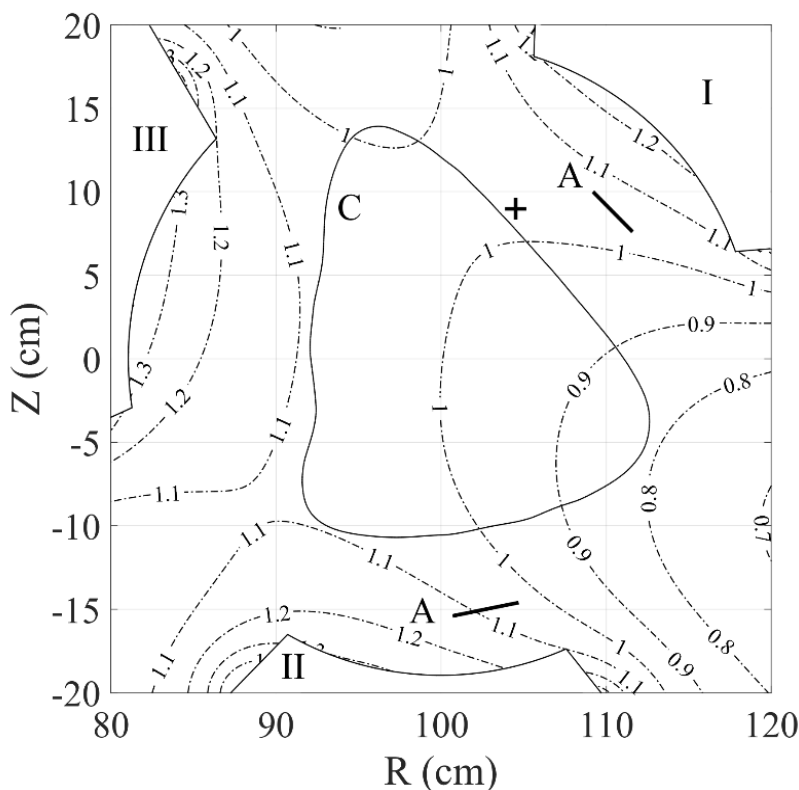


Рис. 5. Малий перетин торсатрона "Ураган-3М" в місці розташування зонда під антеною (позначено хрестиком). Положення крайньої замкнутої магнітної поверхні - лінія С. Модуль магнітного поля нормований на B_0 - пунктирні лінії. Перетини поздовжніх провідників антени - лінії А. I, II, III - гвинтові провідники торсатрона.

В експериментах по високочастотному нагріванню плазми в торсатроні «Ураган-3М» було виявлено, що потенціал ленгмюрівського зонду, розташованого під антеною на відстані Δx , суттєво відрізняється від потенціалу такого ж зонду, розташованого на протилежному боці тору. На Рис. 5 показано малий перетин торсатрона "Ураган-3М" в місці розташування зонда під антеною (позначено хрестиком). Положення крайньої замкнутої магнітної поверхні – лінія С. Модуль магнітного поля нормований на B_0 – пунктирні лінії. Перетини поздовжніх провідників антени – лінії А. I, II, III – гвинтові провідники торсатрона. ВЧ антена і зонди на цій установці знаходяться в ергодичному шарі силових ліній магнітного поля, що утримує плазму. В цьому шарі силові лінії при обертанні по тору блукають в радіальному напрямку на відстань, порівняну з Δx . Отримані в розділі оцінки зміни електричного потенціалу поблизу рамкової антени внаслідок дії сили Міллера, випрямлення зондом потенціалу електромагнітних високочастотних хвиль, що збуджуються рамковою антеною, і випрямленого потенціалу цієї антени дозволяють зробити висновки, що випрямлення зондом потенціалу електромагнітних високочастотних хвиль і випрямлений потенціал рамкової антени дуже слабо

впливають на зондові вимірювання.

На частинки плазми сорту α поблизу джерела електромагнітного випромінювання в магнітному полі ($\omega_{c\alpha} \gtrsim \omega$, $\omega_{c\alpha}$ – циклотронна частота частинок сорту α , ω – частота ВЧ полю) уздовж магнітних силових ліній (z напрямом) діє пондеромоторний потенціал

$$\Psi_{\alpha} = \frac{e_{\alpha}^2}{4m_{\alpha}\omega^2} E_z E_z^* - \frac{e_{\alpha}^2}{4m_{\alpha}(\omega_{c\alpha}^2 - \omega^2)} \left\{ E_x E_x^* + E_y E_y^* - 2 \frac{\omega_{c\alpha}}{\omega} \operatorname{Re}(i E_x E_y^*) \right\}, \quad (4)$$

де $E_{x,y,z}$ – амплітуда компонент електричного ВЧ полю, e_{α} і m_{α} – заряд і маса частинок сорту α .

Для випадку повільної хвилі, яку збуджують поздовжні силовим лініям магнітного поля провідники, величина пондеромоторного потенціалу, який діє на електрони, не залежить від густини і виявляється рівною $\approx 130\text{В}$ ($E_z = 30\text{В}$, $B_z = 7\text{кГс}$ – зовнішнє магнітне поле, яке створюється гвинтовими і компенсаційними котушками, $l = 10$ – характерне тороїдальне хвильове число). Це пов'язано з тим, що основний внесок в електронний пондеромоторний потенціал вносить перший доданок з (4), який не залежить від густини, другий доданок в разі електронів пропорційний $\sim \omega/\omega_{ce} \ll 1$ і є малим в порівнянні з першим доданком. Іонний пондеромоторний потенціал стає помітним при густині частинок плазми $n = 10^{10}\text{см}^{-3}$ і зменшується до $\approx -80\text{В}$ при $n = 10^9\text{см}^{-3}$. У разі іонів основний внесок вносить другий доданок з (4), який збільшується при збільшенні x компоненти електричного поля, яка залежить від густини, перший же доданок є малим, так як має порядок $\sim m_e/m_i$ по відношенню до першого електронного доданку.

Виявлено, що величина зміни електричного потенціалу плазми за рахунок дії пондеромоторної сили Міллера для типових значень тороїдального хвильового числа добре збігається з різницею вимірювань плаваючого потенціалу зондів. Тому можна стверджувати, що дія пондеромоторної сили Міллера поблизу рамкової антени є причиною різниці показань зондів.

У третьому розділі дисертації розглянуто вплив перехідного шару на поглинання електромагнітних хвиль при їх косому падінні з діелектрика на поверхню, що межує з плазмою, з частотою, меншою за ленгмюрівську частоту в середині плазми, і поглинання поверхневих електромагнітних хвиль електронами в перехідному шарі діелектрик-плазма.

У **секції 3.1** досліджено поглинання відбитої електромагнітної хвилі електронами в перехідному шарі діелектрик-плазма (див. Рис. 6). Як відомо, електромагнітні хвилі з частотою, меншою за ленгмюрівську, відбиваються від плазми. Зіткнення електронів зі стінкою в випадку плазми металів і напівпровідників можуть призводити до поглинання хвилі, що відбивається. Частка поглиненої енергії Q залежить від того, як відбиваються електрони: при дзеркальному відбитті $Q \sim \beta^3$, при дифузному – $Q \sim \beta$, де β – відношення хаотичної швидкості електронів до швидкості світла. У випадку, коли газорозрядна плазма межує з твердим тілом (діелектриком), на межі плазма - діелектрик утворюється,

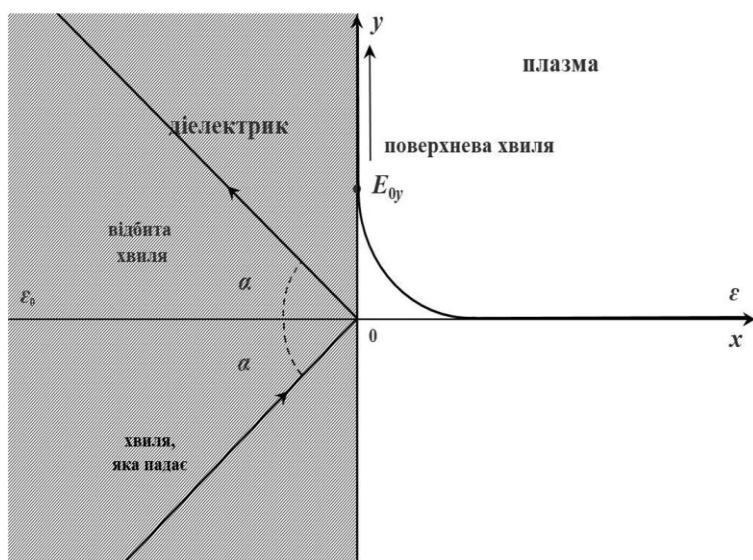


Рис. 6. Схематичне зображення плазми і діелектрика щодо координати x і електромагнітних хвиль.

іонів (четвертий доданок правої частини рівняння). Це було зроблено тому, що роль іонів в ефектах, які розглянуті в цьому розділі мала. Такий спрощений розгляд дозволило розв'язати рівняння (3) аналітично. Однак при больцманівському розподілі іонів в перехідному шарі при негативному зростанні потенціалу їх густина зростає, а не зменшується, як випливає з рішення рівнянь (1) і (2). Це призводить до більш швидкого зростання просторового заряду, ніж при вирішенні цих рівнянь, і зменшення в 2-3 рази розміру перехідного шару.

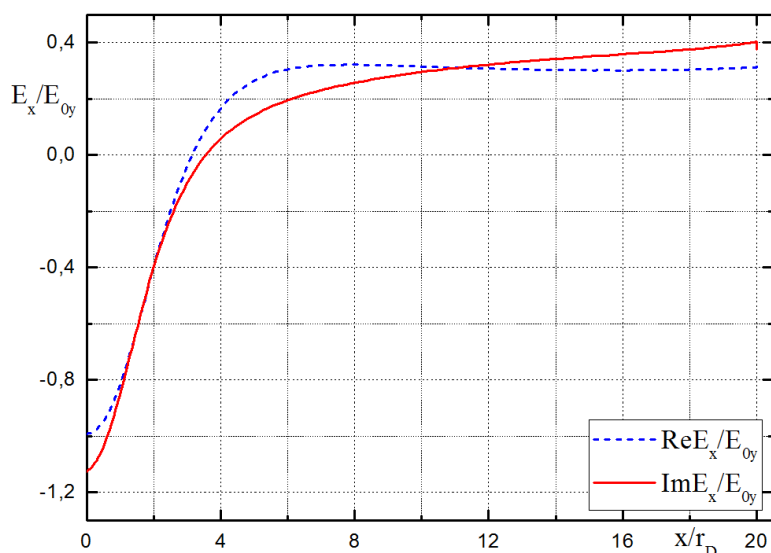


Рис. 7. Залежність реальної та уявної частин x -компоненти електричного поля, віднесеної до амплітуди y -компоненти електричного поля падаючої хвилі, що падає, від координати, вираженої в радіусах Дебая-Хюккеля, у плазмі. Синя пунктирна лінія - реальна частина, суцільна червона лінія - уявна частина.

внаслідок виходу електронів з плазми, перехідний шар з товщиною порядку $\approx (10 \div 15)r_{De}$.

У цьому розділі дисертації рівноважний розподіл електричного потенціалу плазми також було визначено з рівняння (3), але в цьому випадку для спрощення задачі вважалося, що іони, також як і електрони, мають больцманівський розподіл $n_i = n_{i0} \exp(-e\phi/T_e)$, тобто в рівнянні (1) було знехтувано інерцією (ліва частина рівняння), зіткненнями (другий доданок правої частини рівняння) і в'язкістю

Далі розглянуто поширення електромагнітної хвилі при її відбитті від поверхні, що межує з плазмою, з частотою, меншою за ленгмюрівську частоту в середині плазми і визначені компоненти електричного поля цієї хвилі в перехідному шарі, які зображені на Рис. 7 (розрахунок проведено для параметрів $\alpha = 45^\circ$ - кут падіння, $\omega/\omega_{pe} = 0.5$ - відношення частоти хвилі до електронної плазмової частоти, $\epsilon_0 = 1$ - діелектрична проникність діелектрика, $T_e = 10\text{eV}$). Визначено загасання електромагнітної хвилі при її косому падінні з діелектрика на поверхню, що

межує з плазмою, внаслідок поглинання її енергії електронами плазми, що взаємодіють з нормальною до поверхні розділу складовою електричного поля цієї хвилі в перехідному шарі.

Наявність перехідного шару істотно змінює умови взаємодії електронів з хвилею. У цій секції показано, що p - поляризована хвиля, яка відбивається від плазми, поглинається електронами, які сповільнюються в перехідному шарі і відбиваються від стінки або від потенційного бар'єру всередині шару. У цьому шарі густина електронів плазми зменшується від значення n_0 для однорідної плазми до значення $n_0 \exp \Phi_0 \sim n_0 \sqrt{m_e/m_i}$. Складові електричного поля в напрямку неоднорідності $E_x(x)$ в перехідному шарі змінюється на відстані $\Delta x \approx (10 \div 15)r_{De}$. Це означає, що Фур'є-компонента електромагнітного поля $E_x(k_x)$ має характерне значення хвильового вектора $k_x \sim 1/\Delta x$, а фазова швидкість цих хвиль $\omega/k_x \sim v_{Te}$. Такі коливання сильно поглинаються електронами з тепловою швидкістю. Так як область такої взаємодії Δx мала в порівнянні з глибиною скін-шару $\delta = c/\omega_{pe}$, то коефіцієнт поглинання виявляється порядку частки від ділення товщини перехідного шару на глибину скін-шару, $Q \sim r_{De}/\delta \sim v_{Te}/c \ll 1$, де c - швидкість світла в вакуумі.

У секції 3.2 досліджено поглинання поверхневих електромагнітних хвиль електронами в перехідному шарі діелектрик-плазма (див. Рис. 8).

Поверхневі електромагнітні хвилі широко використовуються для створення і

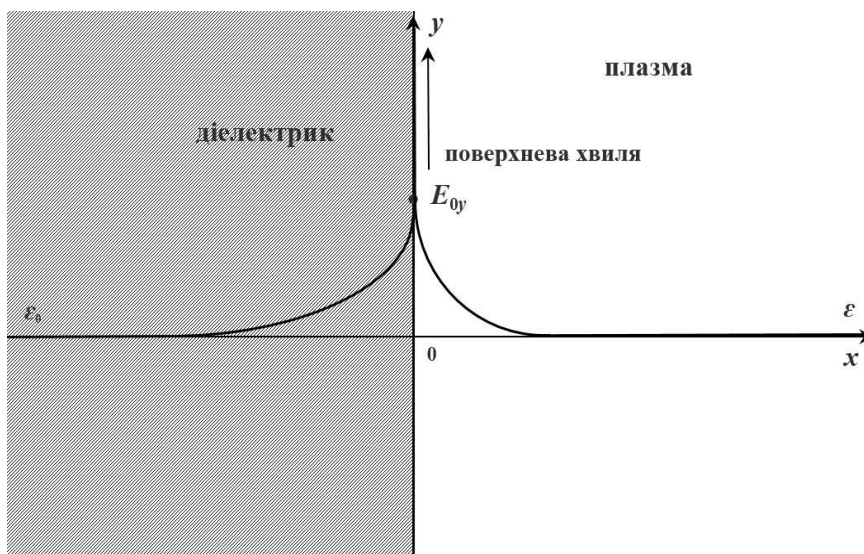


Рис. 8. Схематичне зображення плазми і діелектрика щодо координати x і поверхневої електромагнітної хвилі.

нагріву плазми, генерації і посилення НВЧ-коливань. Загасання цих хвиль може бути обумовлено зіткненнями, ефектом "розбухання" поля в області плазмового резонансу, загасанням Ландау (без зіткнень), а також зіткненнями електронів зі стінкою.

Було розглянуто поширення поверхневої електромагнітної хвилі вздовж межі розділу діелектрик-плазма і визначені компоненти

електричного поля цієї хвилі в плазмі. Результати розрахунку для параметрів $\epsilon_0 = 1$, $T_e = 10\text{eV}$, $\omega/\omega_{pe} = 0.3$ наведені на Рис. 9.

Досліджено поглинання поверхневих хвиль, яке пов'язане з взаємодією електронів плазми з електричним полем поверхневої хвилі в перехідному шарі, який утворюється на межі плазма - діелектрик через вихід електронів з об'єму плазми на поверхню діелектрика, що спричиняє появу об'ємного заряду. В результаті густина

електронів виявляється меншою її значення n_0 всередині плазмового об'єму.

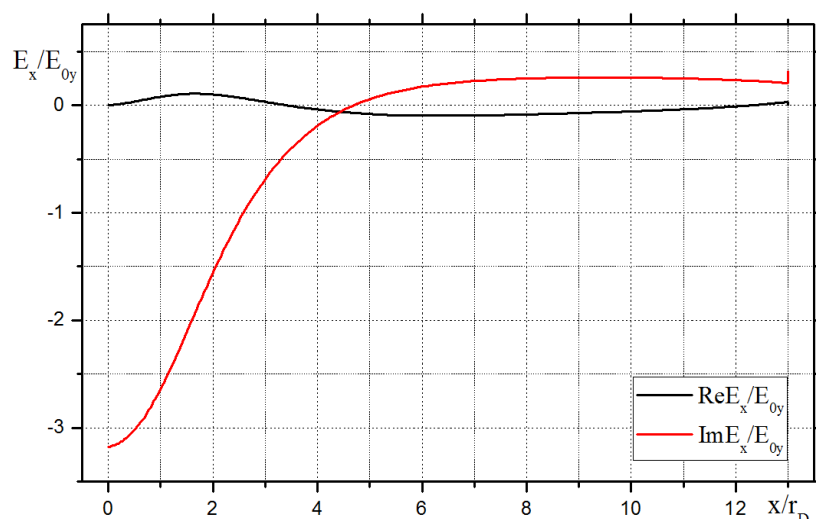


Рис. 9. Залежність реальної (чорна лінія) і уявної (червона лінія) частин x -компоненти електричного поля, віднесеної до амплітуди y -компоненти електричного поля поверхневої хвилі, від координати, яка виражена в радіусах Дебая, в плазмі; $\varepsilon_0 = 1$, $T_e = 10eB$, $\omega/\omega_{pe} = 0.3$.

декремент загасання поверхневої хвилі в напрямку x , ε – діелектрична проникність плазми, то Фур'є- спектр по x містить всі гармоніки k_x , в тому числі короткохвильові, для яких фазова швидкість в напрямку x порядку теплової швидкості електронів ($\omega/k_x \sim v_{Te}$). У середині перехідного шару нормальна складова електричного поля поверхневої хвилі змінюється на відстані близько декількох радіусів екранування. Це означає, що ефективне хвильове число в напрямку неоднорідності порядку $k_x \sim 1/r_{De}$, а якщо частота поверхневої хвилі порядку ленгмюрівської, то основна група електронів, що мають швидкість близько теплової швидкості електронів v_{Te} , може ефективно взаємодіяти з електричним полем в напрямку неоднорідності x , поглинаючи енергію хвилі. Оскільки поле поверхневої хвилі зосереджено в області порядку $\sim 1/k$, а характерні частоти порядку $\sim \omega_{pe}$, то частка енергії поверхневої хвилі, яку отримують такі електрони $Q \sim v_{Te}/v_{ph}$. При $v_{Te} \ll v_{ph}$ товщина перехідного шару значно менше відстані, на якому загасає поверхнева хвиля і величина Q виявляється малою. Для частот $\omega \ll \omega_{pe}$ фазова швидкість хвилі близька до швидкості світла c і $Q \sim v_{Te}/c$. У цьому випадку коефіцієнт загасання поверхневої хвилі такий ж по порядку величини, як для хвилі, що відбивається від плазми, при її "косому" падінні з діелектрика. При наближенні частоти поверхневої хвилі до граничної, фазова швидкість стає значно менше швидкості світла, так що загасання хвилі значно збільшується в порівнянні з попереднім випадком.

Електрони, рухаючись в електричному полі об'ємного заряду, гальмуються і відбиваються від точки повороту, якщо їх енергія менше потенціалу стінки, або відбиваються від стінки, якщо їх енергія більше її потенціалу. Так як поверхневі хвилі, амплітуда яких пропорційна $\sim \exp(iky)$, де k – хвильове число поверхневої хвилі вздовж напрямку поширення y , загасають в плазмі при видаленні від поверхні розділу як $\sim \exp(-kx)$, де

$k = k\sqrt{|\varepsilon|/\varepsilon_0}$ – просторовий

ВИСНОВКИ

В дисертації виконано теоретичне дослідження і чисельне моделювання обмеженої сильно неізотермічної слабо іонізованої плазми з параметрами, типовими для жевріючих розрядів $n_{e0} = 10^{10} \text{см}^{-3}$, $n_n = 10^{14} \text{см}^{-3}$, $T_e = 2 \text{eV}$ і $T_i = 0.1 \text{eV}$. Розглянуто фізичні явища, що мають місце як в «основній» квазінейтральній плазмі, так і в шарі на межі плазми, де суттєвою є різниця між густиною іонів і густиною електронів.

Основні результати і висновки, які отримано в дисертаційній роботі, полягають в наступному.

- Показано, що в глибині плазми дисперсія іонно-звукових коливань слабо відрізняється від відомої формули $\omega = kv_s$, а загасання обумовлено ефектами, пов'язаними з перезарядкою і в'язкістю іонів і електронів. Доведено, що при наближенні до перехідного шару, і в самому шарі, істотну роль у виразі для частоти коливань відіграє градієнт густини іонів, який обумовлює суттєве, в рази, збільшення частоти. При цьому значно зростає загасання іонно-звукових коливань, в якому визначальну роль відіграють доданки, які пов'язані з неоднорідністю гідродинамічної швидкості іонів.
- В експериментах по високочастотному нагріванню плазми в торсатроні «Ураган-3М» було знайдено, що потенціал ленгмюрівського зонду, розташованого під антеною на відстані Δx , суттєво відрізняється від потенціалу такого ж зонду, розташованого на протилежному боці тору. ВЧ антена і зонди на цій установці знаходяться в ергодичному шарі силових ліній магнітного поля, що утримує плазму. В цьому шарі силові лінії при обертанні по тору блукають в радіальному напрямку на відстань, порівняну з Δx . В дисертації вперше доведено, що випрямлення зондом потенціалу електромагнітних високочастотних хвиль і випрямлений потенціал рамкової антени не впливають на зондові вимірювання. Виявлено, що причиною різниці показань зондів є зміна електричного потенціалу плазми вздовж силових ліній магнітного поля за рахунок дії пондеромоторної сили Міллера поблизу рамкової антени.
- Показано, що електромагнітна хвиля, яка відбивається від плазми, поглинається електронами, які сповільнюються в перехідному шарі і відбиваються від стінки або від потенційного бар'єру всередині перехідного шару. Коефіцієнт поглинання виявляється порядку частки від ділення товщини перехідного шару на глибину скін-шару, $Q \sim v_{Te}/c$.
- Показано, що поверхнева електромагнітна хвиля, яка поширюється вздовж межі розділу діелектрик-плазма, поглинається електронами, які сповільнюються в перехідному шарі і відбиваються від стінки або від потенційного бар'єру всередині перехідного шару. Коефіцієнт поглинання виявляється порядку частки від ділення товщини перехідного шару на глибину, на яку хвиля проникає в плазму, $Q \sim v_{Te}/v_{ph}$.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікація у спеціалізованому фаховому виданні України:

1. Лелеко Я. Ф., Степанов К. Н. Поглощение электромагнитных волн при их отражении от плазмы электронами в переходном слое диэлектрик плазма. *Доповіді НАН України*. 2000. № 3. С. 78–85. (Особистий внесок здобувача: здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні впливу перехідного шару на поглинання електромагнітних хвиль при їх косому падінні з діелектрика на поверхню, що межує з плазмою, з частотою, меншою за ленгмюрівську частоту в середині плазми, і провів розрахунки розподілу електричного поля в перехідному шарі і коефіцієнту поглинання електронами плазми електромагнітних хвиль в цьому шарі).

Публікація у спеціалізованому виданні України, що індексуються в міжнародних наукометричних базах:

2. Leleko Ya. F., Grigor'eva L. I., Chechkin V. V., Grekov D. L. Influence of the frame-type antenna on the RF-discharge peripheral plasma parameters in the Uragan-3M torsatron. *Problems of atomic science and technology*. 2017. № 1(107), Series: Plasma Physics (23). P. 40–43. (Scopus, Web of Science). (Особистий внесок здобувача: здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні впливу високочастотних хвиль на потенціал ленгмюрівського зонду в торсатроні «Ураган-3М» і провів розрахунки та оцінки випрямлення зондом потенціалу високочастотних хвиль, які збуджуються рамковою антеною, випрямленого потенціалу антени, який виникає при подачі на неї високочастотної напруги, і пондеромоторної сили Міллера на показання ленгмюрівського зонду).

Публікації в зарубіжних виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах:

3. Fedutenko E. A., Lapshin V. I., Leleko Ya. F. The hydrodynamical plasmon polariton echo in nonuniform semiconductor plasmas. *Physica Scripta*. 1994. Vol. 50, Is. 3. P. 310–313. (Scopus, Web of Science). (Особистий внесок здобувача: здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні впливу тимчасової плазмон-поляритонної луни в напівпровіднику, який обмежений металом, в гідродинамічному наближенні і провів розрахунки значення часу генерації луна-сигналу і електромагнітного поля відгуку плазми).
4. Долгополов В. В., Кириченко Ю. В., Лелеко Я. Ф., Романов С. С., Ткач Ю. В. Об удержании сильноточных нескомпенсированных пучков электронов в циклических системах. *Журнал технической физики*. 1995. Т. 65, Вып. 6. С.141–146. (Web of Science). (Особистий внесок здобувача: здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні рівноваги сильно струмових електронних пучків в циклічних системах типу модифікований бетатрон і стеллатрон і

провів розрахунки траєкторій електронів, умови утримання пучка, розподілу електронів в пучку).

5. Leleko Ya. F., Stepanov K. N. Absorption of electromagnetic surface waves by electrons in a transition layer between the plasma and dielectric. *Plasma Physics Reports*. 2003. Vol. 29, Is. 10. P. 867–873. (Scopus, Web of Science). (Особистий внесок здобувача: здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні впливу перехідного шару на поглинання поверхневих електромагнітних хвиль, провів розрахунки розподілу електричного поля в перехідному шарі і коефіцієнту поглинання електронами плазми поверхневих електромагнітних хвиль в цьому шарі).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Dolgoplov V. V., Kirichenko Y. V., Leleko Ya. F., Romanov S. S., Tkach Y. V. Electron beam in a two-turn stellatron // *High-Power Particle Beams : 8th International Conference, 2–5 July 1990, Novosibirsk, USSR, 1990*. P. 872–877. (Особистий внесок здобувача: здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні рівноваги сильно струмових електронних пучків в циклічних системах типу модифікований бетатрон і стеллатрон і провів розрахунки траєкторій електронів, умови утримання пучка, розподілу електронів в пучку).
7. Fedutenko E. A., Leleko Ya. F., Ostrikov K. N. Effects of hydrodynamical echo in plasma-like media bounded by a metal // *IEEE : International Conference on Plasma Science, 3–5 June 1993 : abstr. Vancouver, Canada, 1993*. P. 85. (Особистий внесок здобувача: здобувач взяв безпосередню участь в дослідженні впливу тимчасової плазмон-поляритонної луни в напівпровіднику, який обмежений металом, в гідродинамічному наближенні і провів розрахунки значення часу генерації луна-сигналу і електромагнітного поля відгуку плазми).
8. Leleko Ya. F. Stationary state of strongly nonisothermic weakly ionized hydrogen plasma in kinetic approximation // *International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, 15–18 September 2014 : abstr. Kharkov, 2014*. P. 143.
9. Leleko Ya. F. Influence of the frame-type antenna on the RF-discharge peripheral plasma parameters in torsatron «Uragan-3M» // *International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, 12–15 September 2016 : abstr. Kharkov, 2016*. P. 179.

Публікація, що додатково відображає наукові результати дисертації:

10. Лелеко Я. Ф., Степанов К. Н. Ионно-звуковые колебания в сильнонеизотермической слабоионизированной неоднородной водородной плазме. *Доповіді НАН України*. 2010. № 11. С. 66–72. (Особистий внесок здобувача: здобувач взяв безпосередню участь у дослідженні іонно-звукових коливань в сильно неізотермічній слабо іонізованій неоднорідній водневій плазмі і провів розрахунки стаціонарного розподілу параметрів сильно неізотермічної слабо іонізованої водневої плазми в гідродинамічному

наближенні в області квазінейтральності та в перехідному шарі між діелектриком та плазмою з урахуванням ефектів іонізації, перезарядки, в'язкості та самоузгодженого електричного поля і залежностей частоти та декременту загасання іонно-звукових коливань, пов'язаного із зіткненнями частинок в плазмі, від хвильового вектора у локальному наближенні).

АНОТАЦІЯ

Лелеко Я. Ф. Фізичні явища в перехідному шарі на межі слабо іонізованої плазми. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. – Інститут фізики плазми Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України. – Харківський національний університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню впливу перехідного шару скінченної товщини на межі слабо іонізованої неізотермічної плазми на фізичні явища, що відбуваються в цьому шарі між плазмою та стінкою. Визначено загасання електромагнітної хвилі при її косому падінні з діелектрика на поверхню, що межує з плазмою, внаслідок поглинання енергії хвилі електронами плазми, що взаємодіють з нормальною до поверхні розділу складовою електричного поля цієї хвилі в перехідному шарі. Отримано загасання поверхневої електромагнітної хвилі внаслідок поглинання її енергії електронами плазми, що взаємодіють з нормальною до поверхні розділу складовою електричного поля поверхневої хвилі в перехідному шарі. Знайдено залежності комплексної частоти об'ємних іонно-звукових коливань як функції хвильового вектора в локальному наближенні для неоднорідних рівноважних параметрів плазми. Проведено оцінки впливу випрямленого зондом потенціалу височастотних хвиль, які збуджуються рамковою антеною, випрямленого потенціалу антени, який виникає при подачі на неї височастотної напруги і пондеромоторної сили Міллера на результати вимірювань потенціалу ленгмюрівським зондом. З застосуванням оригінального чисельного алгоритму, розробленого в дисертації, проведено оцінки ефекту в'язкості іонів в рівнянні руху іонів і отримано розподіли параметрів плазми з урахуванням в'язкості іонів в квазінейтральному наближенні.

Ключові слова: перехідний шар, радіус Дебая, стаціонарний газовий розряд, в'язкість, гідродинамічне наближення, іонно-звукові коливання, декремент загасання, торсатрон «Ураган-3М», ленгмюрівський зонд, рамкова антена, електромагнітна хвиля, випрямлення потенціалу, пондеромоторна сила, коефіцієнт поглинання, поверхнева електромагнітна хвиля.

АНОТАЦІЯ

Лелеко Я. Ф. Физические явления в переходном слое на границе слабо ионизированной плазмы. – Рукопис.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика плазмы. - Институт физики плазмы Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» Национальной академии наук Украины. - Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина Министерства образования и науки Украины. - Харьков, 2021.

Диссертационная работа посвящена исследованию влияния переходного слоя конечной толщины на границе слабо ионизированной неизотермической плазмы на физические явления, происходящие в этом слое между плазмой и стенкой.

Определено затухание электромагнитной волны при ее косом падении из диэлектрика на поверхность, граничащую с плазмой, в результате поглощения энергии волны электронами плазмы, взаимодействующими с нормальной к поверхности раздела составляющей электрического поля этой волны в переходном слое. Получено затухание поверхностной электромагнитной волны вследствие поглощения ее энергии электронами плазмы, взаимодействующими с нормальной к поверхности раздела составляющей электрического поля поверхностной волны в переходном слое. Найдены зависимости комплексной частоты объемных ионно-звуковых колебаний как функции волнового вектора в локальном приближении для неоднородных равновесных параметров плазмы. Проведены оценки воздействия выпрямленного зондом потенциала высокочастотных волн, которые возбуждаются рамочной антенной, выпрямленного потенциала антенны, который возникает при подаче на нее высокочастотного напряжения и пондеромоторной силы Миллера на результаты измерений потенциала ленгмюровским зондом. С применением оригинального численного алгоритма, разработанного в диссертации, проведены оценки эффекта вязкости ионов в уравнении движения ионов и получены распределения параметров плазмы с учетом вязкости ионов в квазинейтральном приближении.

Ключевые слова: переходный слой, радиус Дебая, стационарный газовый разряд, вязкость, гидродинамическое приближение, ионно-звуковые колебания, декремент затухания, торсатрон, ленгмюровский зонд, рамочная антенна, электромагнитная волна, выпрямление потенциала, пондеромоторная сила, коэффициент поглощения, поверхностная электромагнитная волна.

ABSTRACT

Leleko Ya. F. Physical phenomena in the sheath at the boundary of weakly ionized plasma. – Manuscript.

Thesis for a Candidate of Science degree in Physics and Mathematics, specialty 01.04.08 – Plasma Physics. – Institute of Plasma Physics of the National Science Centre "Kharkiv Institute of Physics and Technology" of the National Academy of Sciences of Ukraine. – V.N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the research of the influence of the sheath of finite thickness on the boundary of weakly ionized nonisothermal plasma on the physical phenomena occurring in this sheath between the plasma and the wall.

The damping of an electromagnetic wave at its oblique incidence from the dielectric to the surface adjacent to the plasma due to the absorption of the wave energy by plasma electrons interacting with the normal to the interface surface component of the electric field of this wave in the sheath is determined. It is shown that the electromagnetic wave reflected from the plasma is absorbed by electrons, which are slowed down in the sheath and reflected from the wall or from a potential barrier inside the sheath. The absorption coefficient is of the order of the fraction of the division of the thickness of the sheath by the depth of the skin layer, $Q \sim v_{Te}/c$.

The damping of the surface electromagnetic wave due to the absorption of its energy by plasma electrons interacting with the normal to the interface surface component of the electric field of the surface wave in the sheath is obtained. It is shown that the surface electromagnetic wave propagating along the dielectric-plasma interface is absorbed by electrons, which are slowed down in the sheath and reflected from the wall or from a potential barrier inside the sheath. The absorption coefficient is of the order of the fraction of the division of the thickness of the sheath by the depth at which the wave penetrates the plasma, $Q \sim v_{Te}/v_{ph}$.

The dependences of the complex frequency of the ion-sound oscillations as a function of the wave vector in the local approximation for inhomogeneous equilibrium plasma parameters are found. It is shown that in the bulk plasma the dispersion of the ion-sound oscillations differs slightly from the known formula $\omega = kv_s$, and the damping is due to the effects associated with recharging and viscosity of ions and electrons. It is proved that when approaching the sheath, and in the sheath itself, a significant role in the expression for the oscillation frequency is played by the ion density gradient, which causes a significant, at times, increase in frequency. At the same time, the damping of ion-sound oscillations increases significantly, in which the components associated with the inhomogeneity of the hydrodynamic velocity of ions play a decisive role.

The influence of the probe rectified potential of high-frequency waves radiated by the frame-type antenna, the rectified antenna potential, caused by high-frequency voltage and Miller's ponderomotor force are calculated. Their influence on the results of potential measurements by the Langmuir probe was clarified. In experiments on high-frequency plasma heating in the «Uragan-3M» torsatron, it was found that the potential of the Langmuir probe located under the antenna at a distance Δx differs significantly from the potential of the same probe located on the opposite side of the torus. The RF antenna and probes in this installation are located in the ergodic layer of the magnetic field lines confining the plasma. In this layer, the lines of force shift in the radial direction at a distance comparable to Δx when rotating along the torus. In the dissertation it is proved for the first time that rectification by a probe of potential of electromagnetic high-frequency waves and the rectified potential of a frame antenna do not influence probe measurements. It was found that the reason for the difference in the data of the probes is the change in the electric potential of the plasma along the lines of force of the magnetic field due to the action of the ponderomotor force of Miller near the frame-type antenna.

Using the original numerical algorithm developed in the dissertation, assessments of the effect of ion viscosity in the ion motion equation were performed and plasma parameter distributions were obtained taking into account ion viscosity in the quasi-neutral

approximation. For the first time, a numerical method for determining the parameters distributions of strongly nonisothermal ($T_e \gg T_i$) plasma taking into account the finite ion temperature was proposed and applied. Based on this method, assessments of the viscosity effect in the ion motion equation were performed. It is shown that despite the effect of ion viscosity is small in the region of quasineutrality, it significantly affects the distribution of plasma parameters in the sheath at the plasma-wall interface.

Keywords: sheath, Debye radius, stationary gas discharge, viscosity, hydrodynamic approximation, ion-sound oscillations, decrement of attenuation, torsatron, Langmuir probe, loop antenna, electromagnetic wave, rectification potential, ponderomotor force, absorption coefficient, surface electromagnetic wave.