

ВІДЗИВ

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Бабенко Євгенії Віталіївни

«Вакуумне ультрафіолетове випромінювання з плазми сильнострумових імпульсних діодів», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми

Стрімкий прогрес у розвитку мікроелектроніки ставить завдання значного зменшення розмірів елементної бази, що тягне за собою розробку пристроїв, здатних генерувати потужні потоки випромінювання в області довжин хвиль 13.5 нм. Одним з багатьох можливих пристроїв, здатних генерувати випромінювання цієї довжини хвилі, є плазмовий діод в якому розряд здійснюється в парах олова. Дослідженню роботи такого пристрою і генерації випромінювання присвячена дана робота. Цим і визначається **актуальність** представленої дисертації.

Зміст дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів основного тексту, списку використаних джерел та 5 додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт та предмет дослідження, мету і завдання дисертації, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами та темами, визначено наукову новизну результатів і можливості їх практичного використання, відображено особистий внесок здобувача, представлено інформацію про апробацію результатів.

Перший розділ повністю присвячений огляду різних систем, призначених для отримання випромінювання в області екстремального ультрафіолету. При цьому особлива увага приділялася опису плазмових і плазмодинамічних пристроїв. На підставі проведеного аналізу літературних даних були сформульовані цілі і завдання досліджень, які були вирішені в рамках виконання даної дисертаційної роботи.

У **другому розділі** описані експериментальний стенд і методи діагностики, як параметрів плазми, так і енергії випромінювання в ЕУФ діапазоні. Детально описана конструкція потужнострумового плазмового діода і система ініціалізації розряду між електродами. Особливу увагу при виконанні даної роботи приділялася коректності вимірювання енергії випромінювання за допомогою абсолютно каліброваних фотодіодів AXUV з різними видами фільтрів. Це особливо важливо, враховуючи конкретні умови експерименту, зокрема малу тривалість розряду (кілька мкс) і інтенсивні корпускулярні навантаження. Представлено детальний опис розробленої і створеної системи оптичної фотореєстрації з часом експозиції до 10 нс в широкому діапазоні довжин хвиль, але в області ЕУФ.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений аналізу умов генерації пікових імпульсів випромінювання. У цьому розділі наведені результати детального вивчення енерговклада в розрядний проміжок. Було встановлено, що в момент генерації пікового випромінювання істотно збільшується омичний

опір плазми, що добре простежується на осцилограмах струму і напруги. Проведено детальний аналіз перерозподілу енергії, що вводиться в розряд, між омичної і індуктивної навантаженими плазми. Виконано вимірювання просторові розподілу потенціалу в розрядному проміжку і показано, що в момент генерації пікового випромінювання формується подвійний шар об'ємного заряду. Доведено, що генерація пучків іонів і електронів в подвійному шарі призводить до нагрівання плазми і, як наслідок, до генерації випромінювання в діапазоні довжин хвиль 12.2-15.8 нм.

Четвертий розділ присвячений дослідженню анізотропії випромінювання в діапазоні довжин хвиль 12.2-15.8 нм. Підкреслюється, що анізотропія випромінювання характерна тільки для пікового випромінювання. Проведено детальні вимірювання просторового розподілу випромінювання. Були введені коефіцієнти анізотропії випромінювання і встановлено, що анізотропія залежить від прикладеної напруги. Зокрема, при низькій напрузі випромінювання изотропно, а при збільшенні напруги випромінювання спостерігається переважно в поздовжньому напрямку. Проведено дивовижний, за своєю красою, експеримент по візуалізації областей генерації випромінювання з використанням фотометричної методики. В результаті вдалося показати, що існує чотири основні зони генерації випромінювання, які залежать від прикладеної напруги і напівперіода розрядного струму. Представлені результати дослідження впливу зовнішнього магнітного поля на інтенсивність випромінювання. Показано, що інтенсивність випромінювання і його діаграма залежать від знака зовнішнього магнітного поля дуже незначної величини.

У **п'ятому розділі** описана феноменологічна модель формування спрямованого пікового випромінювання. Для моделювання діаграм спрямованості випромінювання був створений оригінальний програмний код Geomfactor. Були розраховані коефіцієнти спрямованості випромінювання для різних величин прикладених напружень. Результати розрахунків коефіцієнта спрямованості порівнювалися з вимірюваними експериментально. Показано, що розраховані і виміряні коефіцієнти спрямованості добре узгоджуються один з одним.

Дисертаційна робота містить **п'ять додатків**, які присвячені детальному опису конструкції і роботи індукційного датчика струму; обчислення похідної струму в розряді; системи діагностики ЕУФ випромінювання; апаратури, призначеної для візуалізації області генерації випромінювання; аналізу електротехнічних характеристик розряду і, зокрема, розрахунку енергії, що виділяється в плазмовому шнурі.

До **наукової новизни** можна віднести виявлення анізотропії випромінювання в області довжин хвиль 12.2-15.8 нм. Такі дослідження виконані вперше. Також вперше побудована феноменологічна модель виникнення анізотропії, і проведено порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними. Вперше було показано вплив досить слабкого зовнішнього поздовжнього, уздовж осі розряду, магнітного поля на

інтенсивність і спрямованість випромінювання. Вперше була встановлена кореляція між формою зони генерації випромінювання і його спрямованістю.

Отримані експериментальні дані сприяють оптимізації конструювання і створення плазмових пристроїв, призначених для генерації випромінювання в ЕУФ діапазоні. Цим визначається **практична значимість** дисертаційної роботи. Досвід застосування систем реєстрації випромінювання, заснованих на АХУV, вже знаходять застосування в дослідженнях, що ведуться, зокрема, в Інституті фізики плазми Національного Наукового Центру «Харківський фізико-технічний інститут», Харків.

Великий набір добре відомих і випробуваних методів діагностики, гарне узгодження отриманих експериментальних даних з результатами феноменологічних моделей випромінювання, що особливо важливо в разі анізотропії випромінювання, і узгодження з результатами, отриманими в інших наукових колективах, визначають **достовірність результатів** отриманих в дисертаційній роботі.

Апробації

Основні наукові положення дисертації в повній мірі опубліковано у 8 статтях у наукових фахових журналах, та апробовано на 9 конференціях, в тому числі на 8 міжнародних. Шість статей увійшли до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, дві статті опубліковано у іноземних виданнях. Зміст автореферату розкриває основні положення і відтворює структуру дисертації.

Недоліки:

1 – в роботі представлені результати вимірювання просторового розподілу потенціалу в плазмовому розряді, виконані набором з трьох одиночних електричних зондів, встановлених на єдиному стрижні. Виміри проводилися в плазмовому об'єкті за розмірами порівняними з розмірами власне зондів і відстанями між окремими зондами. У цьому випадку важливо привести експериментальні дані про вплив зондів на розряд і про вплив зондів один на одного. На жаль, в тексті дисертації цих даних немає, хоча є коротка згадка, що проводилися порівняння з одиночним зондом, але на мій погляд цього недостатньо;

2 - у висновках другого розділу (пункт 2) написано: «спадаючий до потенційного електрода профіль плазми в розрядному проміжку». Не зрозуміло, що таке «профіль плазми», що мається на увазі, температура, щільність або ще щось;

3 – при аналізі часу виникнення пікового імпульсу випромінювання зроблено твердження, що збільшення напруги запалювання розряду призводить до збільшення щільності первинної плазми. У роботі немає експериментальних даних про залежність щільності первинної плазми від напруги запалювання. Таку залежність можна лише припускати!

4 – зроблено твердження, що зовнішнє магнітне поле впливає на первинну плазму. Разом з тим в роботі немає експериментальних даних, що підтверджують це твердження. У цьому випадку, на мій погляд, необхідні додаткові дослідження, оскільки зовнішнє магнітне поле має подовжню і

радіальну складові, а власне магнітне поле розряду тільки азимутальний складову. Іншими словами задача з двовимірної переходить в тривимірну; 5 – в тексті дисертаційної роботи є ряд неточностей і помилок. Наприклад, в першому розділі в таблиці 1.3 в останній колонці написано «рік пуску», а в виносці зазначено «рік останньої модифікації». Ряд рисунків (1.5 - 1.9, 1.14-1.16) мають написи англійською мовою.

Проте, всі вище перелічені недоліки не можуть зменшити достоїнства і важливість представленої дисертаційної роботи.

Структура дисертації в повній мірі відповідає вимогам, які пред'являються до кандидатських дисертаційних робіт. Мова та стиль представлення матеріалу зрозумілий. Зміст дисертації послідовно відображає постановку задач і їх рішення. Тому дисертація є цілісною завершеною роботою. Автореферат дисертації повно відображає зміст дисертації і містить основні результати, що отримані в роботі і виносяться автором на захист.

Дисертація Бабенко Євгенії Віталіївни «Вакуумне ультрафіолетове випромінювання з плазми сильнострумових імпульсних діодів» за актуальністю, ступенем новизни, значенням для науки та практики, а також за структурою та об'ємом відповідає вимогам Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України, зокрема п.п. 9 і 11, «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» № 567 від 24 липня 2013р., щодо кандидатських дисертацій та свідчить про високий науковий рівень автора. Вважаю, що Євгенія Віталіївна Бабенко заслуговує на присвоєння їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник
Інституту фізики плазми
ННЦ ХФТИ НАН України

Д.Г. Соляков

11.02.2016

Підпис д.ф.-м.н., провідного наукового співробітника,
Інституту фізики плазми ННЦ ХФТИ НАН України Д.Г. Солякова завіряю:

Учений секретар ННЦ ХФТИ НАН України
к. ф.-м. н. О. В. Волобуєв



11.02.2016