

ВІДГУК

на дисертаційну роботу

Лебединської Юлії Станіславівни

ВПЛИВ НА ПОЛЬОВУ ЕМІСІЮ ДЕФЕКТІВ У ПРИПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИСКОРЮВАЧІВ»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Актуальність

Дисертаційна робота Лебединської Ю.С. присвячена актуальній проблемі фізики прискорювачів – вивченню фундаментальних механізмів польової електронної емісії, що ініціює виникнення високоградієнтних вакуумних пробойів. Ця проблема є ключовим обмежуючим фактором у конструюванні та експлуатації сучасних і перспективних прискорювачів, де планується використання надвисоких темпів прискорення для досягнення енергій заряджених частинок у декілька ТеВ. Прикладання таких високих прискорювальних градієнтів неминуче призводить до ризику електричного пробую, що викликає падіння прискорювальної напруги, пошкодження конструкційних елементів та втрату пучка. Особливої гостроти це питання набуло в рамках проекту CLIC (Compact Linear Collider), який виконується в Європейському центрі ядерних досліджень CERN (European Organization for Nuclear Research), де проблема стабільності роботи прискорювальних структур при градієнтах ~ 100 МВ/м залишається відкритою.

Сучасні дослідження підтверджують, що у розвитку вакуумного пробую фундаментальну роль відіграє автоелектронна емісія, ініційована дефектами та неоднорідностями поверхні катода. Експериментально доведено наявність нановістрів, пор, пустот та діелектричних включень у приповерхневому шарі, які діють як локальні підсилювачі емісії. Тому всебічне теоретичне дослідження впливу складної морфології поверхні на струм польової емісії є важливою фундаментальною та прикладною задачею, вирішення якої безпосередньо впливає на прогрес у фізиці високих енергій. Це підтверджує беззаперечну актуальність дисертаційного дослідження Лебединської Ю.С.

Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямками університету та кафедри

Дисертаційна робота виконувалася в рамках основного наукового напрямку досліджень відділу квантової електродинаміки сильних полів Інституту прикладної фізики НАН України. Здобувачка була безпосереднім виконавцем науково-дослідних держбюджетних тем: «Вплив морфології поверхні катода на

темновий струм та високоградієнтний високовакуумний пробій прискорювальних структур» (№ 0121U110548, 2022 р.); «Процеси квантової електродинаміки і релятивістської атомної фізики в надкритичних електромагнітних полях» (№ 0122U000416, 2022 – дотепер).

Це свідчить про інтегрованість дослідження у пріоритетні наукові напрями наукової установи - Інститут прикладної фізики НАН України.

Наукова новизна

Дисертаційна робота Лебединської Юлії Станіславівни є комплексним дослідженням впливу морфології поверхні металу на струм польової електронно емісії, наукова новизна якого полягає у тому, що авторкою вперше:

Розроблено квантовомеханічну модель, яка описує вплив нанорозмірних пор у приповерхневому шарі металу на польову емісію. Показано, що емісійний струм має коливальний резонансний характер, а положення резонансів залежить від глибини та розміру пори, що визначає області посилення та послаблення емісії.

Обґрунтовано новий механізм підвищення стійкості прискорювальних структур до пробою. Виявлено, що наявність пор певного розміру у приповерхневому шарі прискорювальної структури поза резонансними умовами може призводити до локального послаблення емісії, що є контрінтуїтивним, але важливим результатом.

Встановлено двоїстий характер впливу діелектричних покриттів на польову емісію, що може як зменшувати, так і збільшувати емісію. Отримано аналітичні оцінки для критичної товщини покриття, яка визначає перехід від режиму пригнічення емісії до її посилення, що залежить від товщини та діелектричних властивостей матеріалу.

Запропоновано комбіновану модель морфології поверхні, що враховує одночасний вплив нановістрів та мікровиступів. Показано, що така складна геометрія послаблює залежність емісії від роботи виходу, що дозволило пояснити раніше незрозумілі експериментальні результати щодо стійкості різних матеріалів до пробіів, отримані у CERN.

Практична цінність роботи

Практична цінність роботи визначається можливістю використання її результатів для цілеспрямованої діагностики та покращення властивостей конструкційних матеріалів прискорювачів. Отримані в дисертації аналітичні вирази для коефіцієнта прозорості у випадку наявності пор в приповерхневому шарі, діелектричних вкраплень та діелектричних покриттів на поверхні металу є простими для розуміння й аналізу, а розвинута в роботі теорія, в цілому, може бути застосована для опису широкого кола задач, зокрема для опису польової

емісії електронів з конструкційних матеріалів прискорювачів з метою зменшення ймовірності пробою.

Розроблені моделі та отримані аналітичні вирази дозволяють інтерпретувати експериментальні вольт-амперні характеристики для ідентифікації домінуючих типів дефектів, що спричиняють емісію. Встановлений резонансний характер емісії може бути використаний при конструюванні високоефективних польових емісійних катодів з прогнозованими властивостями. Отримані у рамках виконання дисертаційної роботи результати можуть бути використані при удосконаленні та створенні нових прискорювачів заряджених частинок та джерел електронів, робота яких базується на польовій електронній емісії. Також вони можуть стати основою для розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо оптимізації технологій обробки поверхні (напр., вибір між відпалом та електрополіруванням) з метою мінімізації ймовірності пробою.

Результати дисертації можуть бути впроваджені в науково-дослідну діяльність профільних установ та використані в навчальному процесі при підготовці фахівців з фізики плазми, фізики високих енергій та матеріалознавства.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення та висновки дисертації є повністю обґрунтованими та достовірними. Достовірність забезпечується коректним застосуванням фундаментального математичного апарату квантової механіки; використанням перевірених чисельних методів для розв'язання рівняння Шредінгера та розрахунку електростатичних полів; якісним та кількісним узгодженням результатів моделювання з експериментальними даними, отриманими провідними світовими лабораторіями (CERN) та в ІПФ НАН України; широкою апробацією результатів на міжнародних конференціях та їх публікацією у фахових виданнях, що індексуються у базі Scopus і передбачають процедуру анонімного рецензування.

Характеристика структури і основних положень роботи

Дисертація має традиційну структуру, складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (76 найменувань) та додатків. Робота викладена на 132 сторінках і містить 53 рисунки.

У першому розділі виконано аналіз сучасної літератури, що стосується досліджень проблем механізмів високовольтного високовакуумного пробою і ролі у ньому польової електронної емісії та впливу матеріальних властивостей електродів та дефектів поверхні. Зокрема, розглянуто вплив фізичних

характеристик матеріалів і утворення пор у приповерхневому шарі на процеси емісії та пробую. Це дозволило авторці чітко окреслити існуючі проблеми та сформулювати мету і завдання дослідження.

У другому та третьому розділах дисертантка розробила оригінальні теоретичні моделі впливу нанопор та діелектричних включень/покривтів на польову емісію. Ці розділи є ядром роботи і демонструють здатність автора до самостійної наукової творчості.

У другому розділі теоретично досліджено вплив субмікронних дефектів у приповерхневому шарі металу на польовий емісійний струм. Показано, що нанопори та діелектричні включення можуть суттєво змінювати локальні емісійні характеристики, зокрема викликати резонансне підсилення струму. Встановлено, що розміри та глибина пор визначають ймовірність виникнення пробую, а формування великих пор може підвищувати стійкість матеріалу. Результати моделювання пояснюють розбіжності між теорією та експериментом і мають значення для вдосконалення електродів у прискорювальних структурах.

У третьому розділі досліджено вплив тонкого діелектричного покриття на польову емісію з металевих поверхонь. Встановлено, що при малій товщині покриття струм зменшується через зростання потенціального бар'єра. При збільшенні товщини понад певне характерне значення спостерігається посилення емісії з коливанням густини струму, що згасають зі зростанням товщини. Посиленню струму також сприяє поєднання низької діелектричної проникності та високої спорідненості до електронів.

У четвертому розділі представлено результати комплексного моделювання, що враховують складну морфологію поверхні. Цей розділ вдало поєднує попередні напрацювання та демонструє їхню прогностичну силу шляхом порівняння з експериментальними даними. Показано, що локальні дефекти значно підсилюють електричне поле, збільшуючи емісійний струм і пояснюючи розбіжності між теорією та експериментом. Встановлено, що нановістря істотно підвищують локальне поле, проте при їхній високій щільності ефект підсилення стає нелінійним.

Загальні висновки повністю відповідають поставленим завданням та логічно впливають зі змісту роботи.

Отримані результати підтверджують необхідність урахування складної морфології поверхні металів для точного моделювання процесів польової емісії. Запропоновані моделі дозволяють краще пояснити особливості експериментальних даних, отриманих у CERN та ІПФ НАН України, і сприяють розробці нових підходів до покращення стійкості прискорювальних структур до високовольтного пробую.

Повнота викладу матеріалів в опублікованих працях

Основні результати дисертації повною мірою висвітлено у 12 наукових працях, серед яких 2 статті у фахових виданнях (одна в українському, одна в закордонному), що індексуються в наукометричній базі Scopus (Q3), та 10 тез доповідей на Всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях. Кількість та якість публікацій повністю відповідають вимогам МОН України.

Зауваження до змісту та оформлення дисертації

Оцінюючи роботу в цілому позитивно, вважаю за доцільне висловити декілька зауважень та побажань.

У четвертому розділі, де моделюється поверхня катода, покрита нановістрями, доцільно було б надати більше деталей щодо алгоритму їх розміщення. Зокрема, потребує уточнення, чи використовувався статистичний підхід (напр., розподіл Пуассона) для визначення їх положень та як контролювалася відсутність їх перекриття, оскільки ці фактори суттєво впливають на ефект екранування поля. Крім того, потребує уточнення, яким чином узгоджуються площа ідеального катода та сумарна площа змодельованих вістер.

В обговоренні результатів було б цінним додати короткий аналіз меж застосовності розроблених моделей. Наприклад, оцінити, за яких густин струму та температур стають суттєвими ефекти просторового заряду та локального нагріву, які не враховувалися в роботі, але можуть впливати на емісію в реальних умовах.

У розрахунках використовуються значення роботи виходу для міді (4.5 eV). Однак відомо, що цей параметр сильно залежить від кристалографічної орієнтації та чистоти поверхні. Як врахування реального полікристалічного стану поверхні та можливих адсорбованих шарів могло б змінити отримані Вами результати?

При аналізі формул виявлено кілька можливих одруків, що потребують авторської перевірки. Зокрема, вираз для густини потоку ймовірності у формулі (2.5) потребує уточнення, оскільки його стандартне визначення в квантовій механіці відрізняється від наведеного. У формулах (2.2) та (3.2) для рівняння Шредінгера, ймовірно, пропущено квадрат сталої Планка ($\hbar^2$). У виразі (2.7) для коефіцієнта прозорості, вірогідно, пропущено масу електрона. Також, у тексті дисертації трапляються граматичні та орфографічні неточності, які не впливають на змістовність викладеного матеріалу.

Зазначені зауваження є рекомендаційними і не применшують наукової та практичної цінності дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Лебединської Юлії Станіславівни на тему «Вплив на польову емісію дефектів у приповерхневому шарі конструкційних матеріалів

прискорювачів» є завершеним, самостійним науковим дослідженням, яке вирішує важливу науково-практичну задачу. За актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю результатів та практичною цінністю робота відповідає усім вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (із змінами).

Аналіз дисертації та публікацій не виявив порушень академічної доброчесності.

Враховуючи вищевикладене, вважаю, що дисертантка Лебединська Юлія Станіславівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Опонент:

Доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри прикладної математики
Інституту прикладної математики
та фундаментальних наук
Національного університету
«Львівська політехніка»



Юлія СЕТІ

