

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента на дисертаційну роботу

Лебединської Юлії Станіславівни

на тему «Вплив на польову емісію дефектів у приповерхневому шарі
конструкційних матеріалів прискорювачів»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 10 «Природничі науки»
за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Актуальність теми дисертації.

Дисертаційна робота Ю. С. Лебединської присвячена актуальній проблемі фізики сучасних прискорювальних структур — дослідженню процесів польової емісії електронів з реальної поверхні прискорювальних структур. Польова емісія є одним із ключових механізмів, що обмежують експлуатаційні характеристики вакуумних прискорювальних структур, зокрема їхню стійкість до високовольтного пробою. Зменшення ефективності та надійності прискорювачів часто пов'язане з появою локалізованих емісійних центрів, які виникають унаслідок дефектів на поверхні та в приповерхневому шарі конструкційних матеріалів. У сучасних високочастотних прискорювачах, які працюють у режимах зростаючої напруги градієнта, питання керування емісійними властивостями матеріалів набуває особливої важливості. Попри наявність значного обсягу експериментальних досліджень, недостатньо вивченими залишаються фундаментальні механізми впливу морфологічних і структурних дефектів, таких як пори, включення, напруження та неоднорідності, на характеристики польової емісії. З огляду на активний розвиток прискорювальних технологій, у тому числі для потреб фундаментальної науки, медицини та промисловості, необхідність у глибокому теоретичному аналізі та моделюванні впливу дефектів на емісійну поведінку матеріалів є надзвичайно актуальною. Результати такого дослідження сприятимуть покращенню надійності роботи прискорювальних систем і оптимізації вибору матеріалів для їх виготовлення.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Одержані у дисертаційній роботі наукові результати базуються на використанні в процесі досліджень комплексу взаємодоповнюючих теоретичних та експериментальних методів, а також на залученні до інтерпретації одержаних результатів теоретичних підходів та положень, як нових, так і загальноприйнятих у фізиці. Обґрунтованість наукових положень та висновків дисертації зумовлена коректністю поставлених задач, правильною інтерпретацією отриманих результатів, їх узгодженістю із сучасними

науковими поглядами та відомими з літератури даними інших авторів. Достовірність та надійність результатів досліджень забезпечено застосуванням сучасних обчислювальних методик, включно з комп'ютерними, отриманням відтворюваних та систематизованих даних, узгодженістю з результатами подібних досліджень інших авторів..

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше показано коливальний резонансний характер польового емісійного струму в приповерхневому шарі металу за наявності нанопор, а також встановлено залежність положення резонансних піків від глибини та розміру пор, що визначає області посилення та послаблення емісії. Виявлено, що великі пори у приповерхневому шарі прискорювальної структури можуть підвищувати її стійкість до високоградієнтного пробою завдяки локальному зменшенню емісійного струму поза резонансними умовами. Встановлено, що діелектричне покриття може як послаблювати, так і посилювати емісію залежно від його товщини та властивостей; при цьому вперше отримано аналітичні оцінки критичної товщини покриття, що визначає перехід між цими режимами. Крім того, визначено вплив морфології електродів на локальне підсилення електричного поля — зокрема, встановлено, що наявність нанорозмірних вістрів і більших елементів із певним радіусом кривини знижує залежність емісії від роботи виходу. Запропонована модель дозволяє пояснити експериментальні результати щодо стійкості різних матеріалів до пробойів, отримані в CERN.

Про актуальність тематики дисертаційного дослідження свідчить її зв'язок з державними науковими програмами та проектами, зокрема «Вплив морфології поверхні катоду на темновий струм та високоградієнтний високовакуумний пробій прискорювальних структур.» (державний реєстраційний номер: 0121U110548) та «Процеси квантової електродинаміки і релятивістської атомної фізики в надкритичних електромагнітних полях» (державний реєстраційний номер: (0122U000416).

Достатньо доброю є апробація роботи, результати якої доповідалися, зокрема, на наступних конференціях: 8th International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs, MeVArc'2019 (Padova, Italy); 10th International Workshop on the Mechanisms of Vacuum Arcs (Hybrid MeVArc 2022); 37th International Vacuum Nanoelectronics Conference, IVNC 2024 (Brno, Czech Republic).

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувачки Юлії ЛЕБЕДИНСЬКОЇ повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 104 “Фізика та астрономія” та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Фізика»

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувачки у науковий напрям теоретичної фізики.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Лебединської Юлії Станіславівни є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Дисертація структурована таким чином, щоб послідовно й логічно відображати етапи виконаного дослідження, що полегшує сприйняття матеріалу та дає змогу іншим науковцям чітко простежити хід роботи. Виклад результатів супроводжується вдалим графічним матеріалом — авторськими фотографіями, скріншотами моделей і розрахунків, а також загальноприйнятими ілюстраціями, що забезпечує наочність, стислість і зручність подачі інформації.

Дисертація складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 132 сторінки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету й завдання дослідження, охарактеризовано методи та наведено відомості про наукову новизну і практичне значення результатів.

Розділ 1 присвячено огляду літератури щодо механізмів вакуумного високовольтного пробою. Показано, що ключову роль відіграє електронна польова емісія, інтенсивність якої залежить від матеріалу електродів, стану поверхні, наявності дефектів та мікронерівностей. Окрему увагу приділено утворенню пор під дією випромінення та їх впливу на емісію і пробій.

Розділ 2 містить теоретичне дослідження впливу субмікронних дефектів у приповерхневому шарі на польову емісію, зокрема нанопор і діелектричних включень. Показано, що емісійний струм біля нанопор має резонансний характер і може перевищувати значення для ідеальної поверхні більш ніж у 3,5 рази. Встановлено, що дрібні пори посилюють емісію, а великі — можуть її послаблювати. Виявлено вплив діелектричних включень, які змінюють розподіл поля і розширюють діапазон розмірів пір, сприятливих для емісії.

Розділ 3 присвячено впливу діелектричних покриттів на польову емісію. Запропоновано аналітичну модель подвійного потенційного бар'єра на межі метал-діелектрик-вакуум. Результати моделювання показують, що емісія змінюється нелінійно зі збільшенням товщини покриття: спочатку зменшується, а потім зростає з коливаннями. Встановлено, що параметри

діелектрика істотно впливають на ефективність емісії, що має значення для розробки електродних матеріалів та покриттів.

Розділ 4 розглядає моделювання емісії з урахуванням морфологічних нерівностей на поверхні металу. Показано, що саме ці нерівності пояснюють розбіжності між теорією та експериментом. Досліджено дві моделі: ізольованих нановістрь та комбінованих структур із мікронерівностями. Виявлено, що нановістря суттєво підсилюють локальне поле, але при їх високій концентрації ефект підсилення змінюється нелінійно. Отримані результати дозволяють краще пояснити експериментальні дані CERN і сприяють вдосконаленню конструкцій прискорювачів.

У висновках узагальнено всі результати, чітко сформульовано основні положення, що виносяться на захист, зокрема: виявлення резонансного характеру емісії, впливу пор та покриттів, запропоновану модель морфології поверхні.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 2-х статтях включених до міжнародних баз даних Web of Science Core Collection та Scopus та віднесених до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank. Результати дисертації були апробовані на 10 наукових фахових конференціях.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У розділі 3 однією з ключових величин є характерна товщина діелектричного шару $d_0 \sim W/E$. Водночас з практичної точки зору доцільніше було б подати залежність у вигляді $E_0 \sim W/d$, тобто виразити поле через товщину, що є більш зручним для аналізу та практичного застосування. Аналогічне зауваження стосується і графіків, де варто було б замінити вісь товщини на вісь електричного поля для кращої інтерпретації результатів.

2. Також у роботі міститься ряд технічних помилок, зокрема порушено єдність розміщення ілюстративного матеріалу та його підписів — зокрема, рисунок 4.1 розміщено на сторінці 91, тоді як його підпис подано на наступній сторінці, що ускладнює сприйняття матеріалу. Крім того, підписи до рисунків 3.5, 3.6, 3.7 та інших є неповними: на рисунку 3.5 відсутнє зазначення спорідненості, на 3.6 — спорідненість і значення електричного поля, на 3.7 — електричне поле та діелектрична проникність тощо. Необхідно уніфікувати подачу параметрів і забезпечити повноту підписів для всіх графіків.

Вказані запитання не знижують наукової та практичної цінності роботи та не стосуються основних висновків і результатів, що виносяться на захист.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувачки ступеня доктора філософії Лебединської Юлії Станіславівни на тему “ Вплив на польову емісію дефектів у приповерхневому шарі конструкційних матеріалів прискорювачів ” виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для фізики пробоїв. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувачка Лебединська Юлія Станіславівна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 10 “Природничі науки” за спеціальністю 104 “Фізика та астрономія”.

Рецензент:

заступник завідувача відділу
ядерно-фізичних досліджень
Інституту прикладної фізики НАН України,
кандидат фізико-математичних наук, с. н. с.



Володимир БАТУРІН

Підпис рецензента

заступника завідувача відділу
ядерно-фізичних досліджень,
к.ф.-м.н.,с.н.с. В. А. Батуріна
засвідчую

учений секретар

Інституту прикладної фізики НАН України,
к.ф.-м.н., с.н.с



Олексій ВОРОШИЛО