

ВІДГУК

**офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук,
професора Отодворець Лариси Валентинівни
на дисертаційну роботу Лебединської Юлії Станіславівни
«Вплив на польову емісію дефектів у приповерхневому шарі
конструкційних матеріалів прискорювачів»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі
знань 10 "Природничі науки" за спеціальністю 104 "Фізика та астрономія"**

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

У сучасній науці та техніці спостерігається стабільна тенденція до використання потужніших, надійніших і більш мініатюризованих електронних та прискорювальних систем, що працюють у надвисоких вакуумних умовах та під дією екстремальних електричних полів. Одним із ключових обмежуючих факторів для таких систем залишається вакуумний пробій, ініційований здебільшого процесами польової емісії електронів із поверхні електродів. Польова емісія значною мірою залежить від реального стану поверхні матеріалів - наявності мікрodefektів, неоднорідностей, домішок, діелектричних включень, локальних напружень тощо.

У контексті конструювання сучасних лінійних та кільцевих прискорювачів зарядів (наприклад, LHC, XFEL, CLIC, FAIR) актуальним залишається питання розуміння і контролю за поведінкою електродів та елементів вакуумної інфраструктури в умовах, які провокують появу неконтрольованих емісійних зон. Особливої уваги набуває дослідження приповерхневих шарів конструкційних матеріалів, де формуються умови для нерівномірного розподілу електричного поля та емісії електронів, що може спричинити пробій, локальний перегрів і деградацію всієї системи.

На сьогодні більшість моделей польової емісії базуються на ідеалізованому підході до поверхні матеріалу, коли вона вважається рівномірною, бездефектною та чистою. Такий теоретичний підхід не враховує особливостей реального мікроструктурного стану, особливо в умовах тривалої експлуатації або дії агресивного середовища. Водночас у матеріалах, які зазнають іонного опромінення, зварювання, механічної обробки або тривалого навантаження у вакуумі, відбувається накопичення дефектів, які істотно впливають на емісійну здатність. Виходячи з цього науково-технічне середовище потребує нових підходів до моделювання емісійних процесів з урахуванням реальної дефектної структури приповерхневих шарів.

Даний комплекс невирішених питань обумовив актуальність теми дисертаційної роботи та її мету, яка полягала у дослідження ефектів впливу дефектів у приповерхневому шарі металу на густину струму польової електронної емісії з точки зору практичного застосування отриманих результатів у високотехнологічних галузях.

2. Зв'язок теми дисертаційної роботи з науковими планами, програмами, фундаментальними та прикладними дослідженнями

Дисертаційна робота виконувалась у відділі квантової електродинаміки сильних полів Інституту прикладної фізики Національної академії наук України і є частиною досліджень, які проводилися за темами: під час виконання наукових робіт: «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).

3. Ступінь обґрунтованості, достовірності наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих в дисертації

Наукові твердження, висновки та рекомендації, викладені автором у роботі представлені у логічній послідовності та ретельно обґрунтовані, виходячи з результатів експериментальних і теоретичних досліджень.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків та достовірності одержаних наукових результатів забезпечуються використанням сучасних методів досліджень: методу растрової електронної мікроскопії; математичного апарату квантової механіки та квантової електродинаміки, чисельних методів розрахунків.

Крім зазначеного, достовірність, обґрунтованість і коректність наукових результатів та висновків дисертаційної роботи забезпечується систематичністю і повторюваністю отриманих даних та узгодженням їх з результатами інших авторів.

4. Наукова і практична цінність дисертаційної роботи та новизна результатів

Наукова цінність дисертаційної роботи полягає в розвитку фундаментальних уявлень про механізми польової емісії в умовах реального стану поверхні конструкційних матеріалів. Запропонований здобувачкою підхід, що враховує вплив дефектної структури приповерхневого шару на характеристики польової

емісії, є новим та важливим внеском у галузі фізики твердого тіла, вакуумної електроніки та матеріалознавства. Робота охоплює міждисциплінарний спектр проблем - від квантовомеханічного опису тунелювання електронів до інженерного моделювання реальних конструкційних ситуацій у прискорювальній техніці.

Отримані результати дозволяють глибше зрозуміти природу емісійних процесів, які обмежують роботу вакуумних систем, та відкривають можливість розробки нових методів прогнозування, діагностики і зниження ризику виникнення вакуумного пробою. Це є суттєвим кроком уперед у науковому розумінні взаємозв'язку між мікроструктурою матеріалу та його електронною поведінкою в сильних полях.

Практична цінність роботи визначається можливістю використання отриманих результатів у прикладних задачах: при проектуванні та оптимізації вакуумних вузлів прискорювачів заряджених частинок, зокрема в елементах, що працюють під високою напругою; при створенні польових емісійних катодів, наносенсорів, мікроелектронних схем та джерел електронів для вакуумної мікроелектроніки; у забезпеченні надійності роботи високовольтних вакуумних пристроїв, таких як реле, вимикачі, електронно-променеві гармати, мікроканальні пластини та інші.

Аналізуючи дисертаційну роботу Лебединської Ю.С. в цілому, можна зазначити найбільш вагомим, як фундаментального так і прикладного характеру, наукові результати, які визначають її наукову новизну.

1. Вперше запропоновано модель польової емісії, яка враховує дефекти на поверхні матеріалу та дає змогу не лише оцінювати інтенсивність емісії, а й прогнозувати її зміну в залежності від природи і параметрів дефектів. Визначено вплив дефектів (вакансії, міжвузлові атоми, нанопори та діелектричні включення) на локальне електричне поле, що визначає емісійний процес.
2. Досліджено новий фізичний ефект - резонансне підсилення емісії в результаті локальних електричних полів, що утворюються навколо дефектів на поверхні, яке виникає через збільшення ймовірності тунелювання електронів через локальні енергетичні рівні, створені дефектами.
3. Вперше показано, що польовий емісійний струм у приповерхневому шарі металу при наявності нанопор має коливальний резонансний характер. Установлено залежність положення резонансних піків від глибини і розміру пори, що визначає області підсилення та послаблення емісії.
4. Установлено, що зміна товщини та діелектричних властивостей покриття може як зменшувати, так і збільшувати емісію залежно від його товщини та

властивостей. Вперше отримано аналітичні оцінки критичної товщини покриття для визначення переходу від режиму послаблення емісії до її зростання.

5. Вивчено вплив морфології електродів на локальне підсилення електричного поля та стійкість до пробоїв різних матеріалів.

Наукові твердження, висновки та рекомендації, викладені в роботі, представлені у логічній послідовності та ретельно обґрунтовані.

Дисертаційна робота має високу наукову новизну як з фундаментальної, так і з прикладної точки зору в галузях фізико-математичних наук і прикладної інженерії.

5. Оцінка змісту дисертаційної роботи

У дисертаційній роботі Лебединської О.С. розглянуто різні аспекти дослідження впливу дефектів у приповерхневому шарі конструкційних матеріалів на процеси польової емісії, що мають ключове значення для надійної роботи вакуумної техніки, зокрема у прискорювачах заряджених частинок.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено наукову проблему, мету і задачі дослідження, охарактеризовано об'єкт і предмет, а також сформульовано наукову новизну, практичне значення і положення, що виносяться на захист.

Перший розділ присвячений аналізу літературних джерел щодо теорії польової емісії, структури та дефектів у матеріалах вакуумних електронних пристроїв. Особливу увагу приділено аналізу моделей електронної емісії та існуючим підходам до врахування впливу дефектності поверхні. На основі аналізу визначено наукову нішу та окреслено необхідність розробки нового підходу, що враховує реальну мікроструктуру матеріалів.

У другому розділі запропоновано теоретичну модель емісії електронів з дефектної поверхні, яка враховує вплив мікродефектів на локальне підсилення електричного поля. Розглянуто дефекти різної природи та їх вплив на потенціальну енергію електрона на межі матеріалу й вакууму. Запропоновано узагальнення рівняння Фаулера–Нордгейма, яке дозволяє описати емісію з урахуванням неоднорідностей поверхні. Аналітично виведено вирази для коефіцієнтів локального підсилення поля біля дефектів та оцінено умови виникнення тунельного струму.

У третьому розділі розглянуто вплив діелектричних покриттів на поверхню катода. Запропоновано аналітичну модель, яка враховує наявність двошарового потенціального бар'єра типу «метал – діелектрик – вакуум». Модель дозволяє оцінювати вплив як товщини, так і діелектричних властивостей покриття на

параметри польової емісії, що дає змогу більш точно прогнозувати зміну емісійного струму в реальних експлуатаційних умовах. Встановлено оптимальні характеристики покриття, за яких ймовірність виникнення пробою є мінімальною.

Четвертий розділ присвячено моделюванню емісійного струму з поверхонь зі складною та реалістичною морфологією. У роботі враховано наявність мікровиступів, зернових меж, нерівностей і домішок. Розглянуто дві моделі: емісію з ізольованих наноструктурованих виступів та з комбінацій поверхневих нерівностей, що відповідає експериментальним даним CERN і Інституту прикладної фізики НАН України. Отримані результати забезпечують точніший опис розподілу локального електричного поля та дозволяють визначити критичні умови, за яких імовірний вакуумний пробій.

У висновках узагальнено основні наукові результати, наведено підтвердження досягнення мети та виконання поставлених завдань, сформульовано перспективи подальших досліджень.

6. Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях

Проаналізувавши наукові праці Лебединської Ю. С., можна стверджувати, що отримані дисертанткою нові наукові результати та висновки відповідають умовам наукової новизни і вимогам МОН України, які пред'являється до дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Основні результати дисертаційної роботи Лебединської Ю. С. опубліковані у 12 працях, з них 2 статті в наукових фахових виданнях, які індексуються в наукометричних базах Scopus та/або Web of Science Core Collection, та 10 тез доповідей на наукових конференціях.

В усіх опублікованих працях Лебединської Ю. С. ґрунтовно та в повному обсязі висвітлені основні наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи. Отримані дисертанткою наукові положення і результати досліджень апробовані на наукових конференціях різного рівня.

7. Відповідність дисертації встановленим вимогам МОН України, та її завершеність

Після детального вивчення дисертації можна прийти до висновку, що дисертаційна робота Лебединської Юлії Станіславівни відповідає чинним вимогам МОН України. Вона містить в своїй структурі зміст, анотацію, яка подана двома мовами, вступ, список опублікованих праць за темою дисертації, чотири

розділи, висновки до кожного розділу, загальні висновки роботи, список використаних джерел із 76 найменувань та додаток.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертації становить 132 сторінки, з яких основний текст - 105 сторінок, 53 рисунки та таблиця.

Усі пункти викладені коректно та в повній мірі відображають проблематику роботи і наукові шляхи її вирішення. Дисертаційна робота характеризується науковою стилістикою і термінологією, викладення матеріалу логічністю, послідовністю і структурованістю. Дисертація має достатню кількість ілюстративного та графічного матеріалу.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що дисертаційне дослідження є завершеним і повністю відповідає вимогам, викладеним у Постанові Кабінету Міністрів №44 від 12.01.2022 р. про затвердження «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти наукової установи про присудження ступеня доктора філософії».

8. Оформлення дисертації

За мовою структурою змістом та стилем написання дисертаційна робота Лебединської Ю.С. повністю відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затверджених МОН України, наказ №40 від 12.11.2017 року.

9. Академічна доброчесність

У ході вивчення та аналізу тексту дисертаційної роботи та наукових публікацій дисертантки, в яких висвітлені основні наукові результати, порушення академічної доброчесності виявлено не було. Наведені у дисертації результати є об'єктивним відображенням проведених наукових досліджень. Дисертантка виявила належний рівень професійної етики у поданні власних висновків та інтерпретації отриманих результатів.

10. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Лебединської Юлії Станіславівни «Вплив на польову емісію дефектів у приповерхневому шарі конструкційних матеріалів прискорювачів» виконана на високому професійному рівні та в цілому залишає позитивне враження, однак, на мою думку має певні недоліки.

1. Для більш повного розуміння фізичних процесів в матеріалах варто було б, окрім співвідношень для коефіцієнтів проходження потенціального бар'єру у двох

випадках: наявності пор у приповерхневому шарі металу (співвідношення 2.15) та вплив діелектричного покриття на поверхні металу (співвідношення 3.16 і 3.23), записати також співвідношення для густини струму польової емісії.

2. У дисертаційній роботі коефіцієнт прозорості потенціального бар'єру розраховується при наявності пор у приповерхневому шарі та наявності діелектрика на поверхні. Вважаю, що доцільно було б розглянути одночасний вплив цих двох факторів.

3. На рисунку 3.3 наведені залежності коефіцієнта прозорості потенціального бар'єру на поверхні металу з діелектричним покриттям, розраховані на основі співвідношень (3.8) і (3.16). Нєдивлячись на те, що залежність носить складний характер та при певних значеннях товщини діелектрика має широкий мінімум ($d \approx 0,75 \cdot 10^{-9}$ м) і виражений максимум ($d \approx 1,30 \cdot 10^{-9}$ м), в роботі не знайшла пояснення фізична причина такої залежності.

4. У дисертаційній роботі поряд з україномовними використовуються неадаптовані до основного тексту дисертації англomовні рисунки 1.2, 1.3, 2.2 і 2.3, які дещо затруднюють сприйняття графічного матеріалу.

Усі вказані зауваження носять рекомендаційний характер і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Лебединської Юлії Станіславівни, яка є одноособово створеною кваліфікаційною науковою працею, що містить сукупність результатів і наукових положень, поданих автором для публічного захисту, та відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія».

11. Загальний висновок

Дисертаційна робота Лебединської Юлії Станіславівни на тему «Вплив на польову емісію дефектів у приповерхневому шарі конструкційних матеріалів прискорювачів» є завершеним науковим дослідженням, яке характеризується актуальністю, науковою новизною, достовірністю та практичною цінністю отриманих результатів.

У роботі вирішено науково-технічну задачу сучасної фізики щодо визначення впливу на польову емісію дефектів у приповерхневому шарі конструкційних матеріалів прискорювачів.

Зміст дисертаційної роботи Лебединської Ю. С. повністю відповідає поставленим на початок дослідження завданням та меті. Текст дисертації написаний науковим стилем з використанням фізичної термінології. За кількістю та обсягом наукові публікації відповідають чинним вимогам МОН України щодо можливості присудження наукового звання доктора філософії.

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

прискорювачів» 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 року №44, а її авторка, Лебединська Юлія Станіславівна, заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент

завідувачка кафедри електроніки, загальної та
прикладної фізики Сумського державного
університету, доктор фізико-математичних наук,
професор



Л.В. Однодворець

