

## ВІДГУК

офіційного опонента **Маслова Василя Івановича** на дисертаційну роботу **Лебединського Сергія Олександровича** «Польова електронна емісія з врахуванням впливу зовнішнього магнітного поля та релятивістських ефектів», подану на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дисертаційна робота Лебединського С. О. присвячена теоретичному вивченню процесу утворення струму польової емісії електронів у присутності зовнішніх однорідних електричного та магнітного полів та урахуванню релятивістських поправок.

Дослідження процесу польової емісії електронів з металу відбувається більш, ніж протягом цілого століття. Незважаючи на велику кількість робіт в цій області, теоретичне вивчення розглядуваного питання залишається актуальним, оскільки сучасні експерименти із фізики пучків розширюють область досліджень і ставлять нові запитання як перед теоретиками, так і експериментаторами. Зменшення струму польової емісії шляхом прикладання магнітного поля дозволить отримувати більш високі прискорювальні градієнти. А це в свою чергу відкриває нові горизонти в експериментах на зустрічних пучках.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основного тексту, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг роботи - 124 сторінки. Структура роботи логічно відповідає темі дослідження.

**У вступі** автор обґрунтовує актуальність теми, формулює мету і завдання дослідження, формулює наукову новизну результатів, їх наукове і практичне значення, вказує особистий внесок, інформацію про апробацію дисертації і публікації.

**В першому розділі** автор дає огляд робіт, присвячених вивченню польової емісії електронів з металу та ініціювання нею вакуумного пробою. Описано основні наявні теорії: польова емісія у відсутності магнітного поля та у присутності зовнішнього магнітного поля, перпендикулярного до поверхні металу, та їх експериментальне підтвердження. Разом з тим описано роль польової емісії у виникненні високовольтного високовакуумного пробою. Перший розділ дає вичерпну картину попередніх досліджень у цій галузі фізики.

**В другому розділі** розглянуто квантово-механічний рух електрона у випадку паралельності електричного та магнітного полів, їх перпендикулярності та довільного кута поміж ними. Показано, що коефіцієнт прозорості потенціального бар'єру не залежить від величини магнітного поля, паралельного до електричного. Знайдено енергетичний спектр електрона при його русі у довільній конфігурації електричного та магнітного полів.

**В третьому розділі** виконується релятивістське узагальнення теорії польової емісії. У рамках квантової теорії польової емісії, розвинутої Фаулером та Нордгеймом, знайдено релятивістську поправку до густини

струму у випадку міжелектродних проміжків менших за 1 см та коефіцієнт прозорості потенціального бар'єру на межі метал-вакуум з урахуванням релятивістських ефектів у загальному випадку. Також у цьому розділі автор отримав ефект релятивістського стиснення ширини потенціального бар'єру. Даний ефект пояснює збільшення прозорості потенціального бар'єру, коли рух електрона стає релятивістським.

**В четвертому розділі** теоретично пояснено результати експериментів проведених у Інституті прикладної фізики НАН України та Європейській організації з ядерних досліджень по вивченню впливу магнітного поля, паралельного поверхні металу, які показали зменшення напруги пробою замість прогнозованого збільшення. Автор теоретично розглянув вплив магнітного поля на компоненти потоків, які протікають у міжелектродному проміжку та пояснив можливий механізм зменшення напруги пробою внаслідок збільшення темного струму через подовження довжини траєкторії електронів у присутності магнітного поля.

У **висновках** наведені головні наукові результати, здобуті у дисертації.

**Апробація дисертації.** Основні положення і висновки дисертації повністю відображені у шести публікаціях у наукових фахових виданнях України та інших держав, які індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus та Web of Science. Дисертант доповідав результати дисертації на міжнародних школах і конференціях, опубліковано 9 тез доповідей.

**Найбільш важливими результатами дисертаційної роботи на мій погляд є наступні:**

1. Виконано узагальнення на релятивістський випадок рівняння польової емісії електронів. Знайдено загальний вираз коефіцієнта проходження потенціального бар'єру та наведено спрощену аналітичну формулу для типових лабораторних параметрів.

2. Знайдено ефект релятивістського стиснення потенціального бар'єру на межі метал-вакуум. Під час зменшення ширини бар'єру збільшується коефіцієнт проходження, чим можна пояснити і отримане збільшення коефіцієнта проходження у випадку присутності електричного поля.

3. Знайдено загальний вигляд та спрощену аналітичну формулу коефіцієнта проходження потенціального бар'єру на межі метал-вакуум у випадку впливу зовнішнього магнітного поля, перпендикулярного електричному.

4. Дано пояснення експериментів ЦЕРН та Інституту прикладної фізики НАН України з вивчення електростатичних високовакуумних пробів, де невелике магнітне поле зменшує градієнтну стійкість.

**Практична значимість** дисертації пов'язана з тим, що отримані результати для врахування впливу магнітного поля на польову електронну емісію, а отже можуть бути використані для опису широкого кола задач, зокрема високовакуумних високоградієнтних пробів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно або при його безпосередній участі.

**Достовірність і обґрунтованість результатів дисертації** обумовлена використанням добре розроблених методів квантової механіки та квантової електродинаміки та узгодження нових одержаних результатів з раніше відомими результатами.

**До недоліків дисертації потрібно віднести наступні:**

1) У підрозділі 3.2 та 3.4 знайдено вирази для коефіцієнтів проходження потенціального бар'єру, які враховують релятивістські ефекти (3.2) та вплив магнітного поля, паралельного поверхні металу (3.4). Варто було б привести також вирази для густини струму польової емісії для цих випадків.

2) У роботі здобувач використовує аналогічний підхід для знаходження коефіцієнту проходження як у релятивістському випадку, так і у випадку присутності зовнішнього магнітного поля, паралельного поверхні металу. Було б доцільно розглянути також випадок одночасного впливу цих факторів.

3) У підпункті 1.1 у виразі, який характеризує силу дії поля на електрон допущена друкарська помилка:  $eF$  необхідно замінити на  $F$ .

4) На сторінці 2 автореферату у «від магнітного, поля паралельного» та на сторінці 6 у «де, введено» кома не там.

5) У підписі до рис. 3 автореферату використана в «1.2», на сторінці 13 в «3.4», на сторінці 15 в «0.33» та в «0.003», на сторінці 89 дисертації в «3.4» та в «10.7», на сторінці 105 дисертації в «0.33» та в «3.25» крапка, а не кома.

6) На сторінці 13 використано «вплив магнітне поле на» замість «вплив магнітного поля на» та на сторінці 19 «о квантово-механическом движение электрона» замість «о квантово-механическом движении электрона» та «объяснено физический смысл» замість «объяснен физический смысл», на сторінці 20 «обобщение теории, описывающий явление» замість «обобщение теории, описывающей явление» или «обобщение теории, описывающее явление» та «полученное уменьшения» замість «полученное уменьшение».

7) На сторінках 21 та 29 дисертації не потрібен новий рядок «де  $A, b, c$  константи.», «де BDR (BreakDown Rate) – відношення».

8) На сторінці 49 до «для складової хвильової» потрібно додати «функції».

Однак наведені зауваження не впливають на достовірність і значимість одержаних автором результатів, і не знижують загальну вельми позитивну оцінку дисертації Лебединського С. О.

Матеріал у дисертації викладено послідовно, всі основні результати обґрунтовані і мають чітке наукове пояснення. У кожному розділі є висновки. Автореферат правильно демонструє зміст і основні положення дисертації.

Дисертаційна робота Лебединського Сергія Олександровича є закінченою науково-дослідною роботою. На мій погляд здобуті в дисертації результати є важливими для подальшого розвитку фізики пучків, прискорювачів та теоретичної фізики. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в ІПФ НАН України, ННЦ «ХФТІ» НАН України, Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, Харківському

національному університеті імені В. Н. Каразіна, CLIC (Compact Linear Collider), ILC (International Linear Collider) та інших наукових центрах.

Таким чином, за актуальністю теми дисертації, обсягом досліджень, новизною здобутих результатів я вважаю, що дисертаційна робота «Польова електронна емісія з врахуванням впливу зовнішнього магнітного поля та релятивістських ефектів» задовольняє вимогам МОН України до кандидатських дисертацій і «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567, а її автор, Лебединський Сергій Олександрович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 - теоретична фізика.

Доктор фізико-математичних наук, професор,  
провідний науковий співробітник  
ННЦ Харківський фізико-технічний  
інститут НАН України

В.І. Маслов

ЗАСВІДЧУЮ  
Учений секретар  
ННЦ ХФТ

11 11

