

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**

**ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ**

Цикл наукових праць  
на здобуття премії Президента України для молодих вчених

**«ПОЛЬОВА ЕЛЕКТРОННА  
ЕМІСІЯ: ВПЛИВ МАГНІТНОГО  
ПОЛЯ ТА РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ  
ЕФЕКТІВ»**

**ЛЕБЕДИНСЬКИЙ Сергій Олександрович** –

кандидат фізико-математичних наук,  
науковий співробітник  
Інституту прикладної фізики НАН  
України

**АНОТАЦІЯ**

**2022**

**Основний зміст роботи.** У циклі наукових робіт, що представлені на здобуття премії, теоретичному дослідженню впливу зовнішнього магнітного поля на польову емісію електронів з металів та врахуванню релятивістських ефектів, що можуть проявлятися при прикладенні високих напруг, а також аналізу та інтерпретації нових експериментальних даних отриманих під час дослідження впливу магнітного поля на високовакуумний пробій.

У циклі наукових робіт вирішена задача про квантово-механічний рух електрона в зовнішніх електричному і магнітному полях при довільному куті між ними. Знайдений енергетичний спектр електрона, що рухається в такій конфігурації полів, і пояснено фізичний зміст окремих складових цього спектра. Доведено припущення про незалежність коефіцієнта проходження потенційного бар'єру від магнітного поля, паралельного електричному, яке використовувалося при побудові теорії польової емісії в такій конфігурації полів, на той час необґрунтоване ні теоретично, ні експериментально.

Показано, що у разі досить сильних електричних полів і відносно великих міжелектродних відстаней рух електрона в міжелектродному вакуумному проміжку може бути релятивістським, тому з'являється необхідність врахування релятивістської поправки до існуючої квантової теорії польової емісії. Виконано узагальнення теорії Фаулера-Нордгейма, що описує явище польової емісії електронів з металу, на релятивістський випадок і знайдено аналітичний вираз для щільності струму польової емісії у випадку малих міжелектродних відстаней і високих полів, а також узагальнено на релятивістський випадок вираз для коефіцієнта проходження потенціального бар'єру на межі метал-вакуум у загальному випадку.

Виявлено ефект релятивістського стиснення ширини потенціального бар'єру на межі метал-вакуум, що призводить до збільшення величини коефіцієнта проходження потенціального бар'єру. Здійснено узагальнення теорії польової емісії Фаулера-Нордгейма на випадок присутності зовнішнього магнітного поля, паралельного електричному, коли електромагнітне поле є полем електричного типу, тобто  $E > cV$ .

Вперше отримано загальний вираз для коефіцієнта проходження потенційного бар'єру електроном в присутності зовнішнього однорідного електричного поля, перпендикулярного поверхні металу, і зовнішнього однорідного магнітного поля, паралельного поверхні металу, а також отримано аналітичний вираз коефіцієнта проходження в разі автоелектронної емісії при лабораторних значеннях напруженості електричного поля і роботи виходу електрона з металу, яке справедливо і для автоелектронної емісії з полярної област замагніченій нейтронних зірок.

Виконано аналіз процесів, що протікають в міжелектродному проміжку в високому вакуумі при додатку високих значень напруженості електричного поля і досліджена можливість впливу на них магнітним полем в розрізі проблеми високовакуумних високоградієнтних пробіїв.

Пояснено експериментально отримане зменшення стійкості до пробоїв при наявності зовнішнього магнітного поля паралельного поверхні електродів в експериментах, проведених в Інституті прикладної фізики НАН України і Європейської організації з ядерних досліджень (ЦЕРН), і дані рекомендації щодо запобігання виникненню високовакуумних високоградієнтних пробоїв шляхом додатки магнітного поля більшого відсікаючого.

**Наукова новизна та результати.** Наукова новизна полягає у врахуванні впливу магнітного поля на польову електронну емісію, що може бути використано для опису широкого кола задач, зокрема високовакуумних високоградієнтних пробоїв. Серед нових наукових результатів, що одержані в рамках циклу робіт «Вплив зовнішнього магнітного поля та релятивістських ефектів на польову електронну емісію», можна виділити наступні:

- вперше доведено припущення про незалежність коефіцієнта проходження електроном потенціального бар'єру від магнітного поля паралельного електричному;

- вперше виконано узагальнення теорії Фаулера-Нордгейма на релятивістський випадок і знайдено аналітичний вираз для коефіцієнта проходження потенціального бар'єру у загальному випадку та густину струму польової емісії у випадку малих міжелектродних відстаней;

- вперше передбачено ефект релятивістського стиснення ширини потенціального бар'єру на межі метал-вакуум, який призводить до збільшення величини коефіцієнта проходження потенціального бар'єру;

- вперше зроблено узагальнення теорії польової емісії на випадок присутності зовнішнього магнітного поля, перпендикулярного електричному, коли електромагнітне поле є полем електричного типу ( $E > cB$ ) та отримано загальний вираз для коефіцієнта проходження потенціального бар'єру;

- отримано аналітичний вираз коефіцієнту проходження потенціального бар'єру, що є справедливим для значень напруженості електричного поля та роботи виходу електрона з металу, як для лабораторних параметрів протікання польової емісії, так і для польової емісії з пульсарів;

- пояснено зменшення напруги пробою, що спостерігалось в експериментах ІПФ НАН України та ЦЕРН, як наслідок зростання темного струму через подовження траєкторій електронів, утворених в міжелектродному проміжку за присутності магнітного поля, паралельного поверхні електродів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Здобуті в циклі наукових робіт аналітичні вирази для коефіцієнта проходження потенціального бар'єру з урахуванням релятивістських поправок та у випадку присутності зовнішнього магнітного поля, що є перпендикулярним до електричного, є простими для розуміння й аналізу, а розвинута теорія, в цілому, може бути застосована для опису широкого кола задач, зокрема для

опису польової емісії електронів з конструкційних матеріалів прискорювачів з метою зменшення вірогідності пробою.

У циклі наукових робіт, що представлені на здобуття премії, пояснено експериментально отримане зменшення стійкості до пробоїв при наявності зовнішнього магнітного поля, паралельного поверхні електродів у експериментах проведених в Інституті прикладної фізики НАН України та Європейській організації з ядерних досліджень (ЦЕРН) та надано рекомендації щодо запобігання виникнення високовакуумного високоградієнтного пробою шляхом прикладення магнітного поля, більшого за відсікаюче.

**Публікації.** Представлений цикл наукових праць «ПОЛЬОВА ЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ: ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕФЕКТІВ» включає наукові результати по основним процесам квантової електродинаміки в різних кінематичних областях, тому являється **єдиним завершеним дослідженням** та складається з 15 публікацій:

1. Мирошніченко В. І. Квантово-механічний рух електрона в паралельних магнітному та електричному полях / В. І. Мирошніченко, **С. О. Лебединський** // Доповіді НАН України. – 2014. – №9. – С. 61–65.
2. Мирошніченко В. І. Квантово-механічний рух електрона в схрещених однорідних електричному та магнітному полях / В. І. Мирошніченко, **С. О. Лебединський** // Доповіді НАН України. – 2014. – №11. – С. 72–76.
3. Lebedynskiy S. O. The effect of a magnetic field on the motion of electrons for the field emission process description / **S. O. Lebedynskiy**, V. I. Miroshnichenko, R. I. Kholodov, V. A. Baturin. // Probl. of Atomic Science and Technology. – 2015. – №98. – pp. 62–66.
4. DC vacuum breakdown in an external magnetic field / **S. Lebedynskiy**, O. Karpenko, R. Kholodov, V. Baturin, Ia. Profatilova, N. Shipman, W. Wuensch // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2018. – №908. – pp. 318–324.
5. Lebedynskiy S. O. Relativistic correction of the field emission current in the Fowler-Nordheim formalism / **S. O. Lebedynskiy**, O. O. Pasko, R. I. Kholodov // Journal of nano- and electronic physics. – 2019. – №2. – pp. 02022-1 –02022-6.
6. Lebedynskiy S. Field emission with relativistic effects in a magnetic field / **S. Lebedynskiy**, R. Kholodov // The European Physical Journal D. – 2019. – № 73 – pp. 190-1–190-5.
7. Лебединський С.О. Рух електрона у паралельних магнітному та електричному полях / **С. О. Лебединський** // Матеріали III Міжрегіональної науково-практичної конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики». – СПЕТФ'2014, 16-17 квітня 2014: тези. – Суми, Україна, 2014. – С. 41-43.

8. Lebedynskiy S. O. Quantum-mechanical movement of the electron in electric and magnetic fields / **S. O. Lebedynskiy**, V. I. Miroshnichenko // Trans-European School of High Energy Physics – TESHER'2014, 17-24 July 2014: proceeding. – Basiivka, Lviv Region, Ukraine, 2014. – P. 117-119.
9. Лебединський С.О. Потенціальний бар'єр на межі метал-вакуум при наявності схрещених електричного та магнітного полів / **С. О. Лебединський** // Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики та методики навчання фізики». – СПЕТФ+МНФ'2015, 15-16 квітня 2015: тези – Суми, Україна, 2015. – С. 58-60.
10. Lebedynskiy S.O. Decreasing of the field emission current by the external magnetic field / **S.O. Lebedynskiy**, **R.I. Kholodov** // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики та методики навчання фізики». – СПЕТФ+МНФ'2016, 13-14 квітня 2016: тези – Суми, Україна, 2016. – С. 127-129.
11. Лебединський С.О. Релятивістська поправка до струму польової емісії електронів/ **С. О. Лебединський** // Матеріали XVI Конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів, 20-23 березня 2018 р.: тези. – Харків, Україна, 2018. – С.86 .
12. Lebedynskiy S.O. Relativistic correction to the field electron emission current / **S. O. Lebedynskiy**// Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики та методики навчання фізики». – СПЕТФ+МНФ'2018, 24-25 квітня 2018: тези – Суми, Україна, 2018. – С. 77-78.
13. Лебединський С.О. Релятивістський підхід до тунелювання електронів з конструкційних матеріалів прискорювачів/ **С. О. Лебединський**, Р. І. Холодов // Матеріали XVII Конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів, 26-29 березня 2019 р.: тези. – Харків, Україна, 2019. – С.87 .
14. Лебединський С.О. Вплив зовнішнього магнітного поля на польову електронну емісію / **С. О. Лебединський**, Р. І. Холодов // Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики та методики навчання фізики». – СПЕТФ+МНФ'2019, 23-24 квітня 2019: тези – Суми, Україна, 2019. – С. 42-43.
15. Lebedynskiy S. Field electron emission in an external magnetic field parallel to the surface / **S.O. Lebedynskiy**, R. I. Kholodov, Yu. S. Lebedynska// 8th International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs, MeVArc'2019. – Padova, Italy. September 16-19, 2019. – P. 26.

У роботах [1, 7] розв'язується квантово-механічна задача про рух електрона в зовнішніх колінеарних електричному та магнітному полях. Показано, що розв'язок цієї задачі зводиться до розв'язання системи двох

незалежних диференціальних рівнянь, які описують поздовжній та поперечний рух електрона. Цей результат теоретично доводить справедливість припущення про незалежність коефіцієнта проходження потенціального бар'єра електроном металу від магнітного поля у випадку колінеарності електричного та магнітного полів при обчисленні густини струму польової емісії. У роботах [2, 8] розв'язується квантово-механічна задача про рух електрона в зовнішніх однорідних схрещених електричному та магнітному полях. Знайдено спектр можливих значень енергії електрона, який складається з чотирьох частин: квантованого спектра енергій у площині, перпендикулярній до магнітного поля, неперервного спектра енергій вздовж магнітного поля, енергії дрейфового руху, що визначається напруженостями електричного та магнітного полів, та потенціальної енергії електрона в зовнішньому електричному полі. У роботах [3, 9, 10] розв'язується рівняння Шрьодінгера для хвильової функції електрона, що рухається в суперпозиції зовнішніх постійних і однорідних електричного і магнітного полів під довільним кутом між ними. Показано зміну потенціального бар'єру під впливом магнітного поля, паралельного поверхні металу. У роботі [4] виконано узагальнення рівняння Фаулера – Нордгейма, яке дозволило врахувати вплив магнітного поля, паралельного поверхні катода, на польовий емісійний струм. Також було теоретично розглянуто передпробійні процеси, які протікають у міжелектродному проміжку та можливість впливу на них магнітним полем. У роботах [5, 11, 12] виконене релятивістське узагальнення виразу для струму польової емісії електронів у випадку малих міжелектродних відстаней. У роботах [6, 13-15] зроблене релятивістське узагальнення виразу для коефіцієнта проходження потенціального бар'єру, що дало змогу також врахувати вплив зовнішнього магнітного поля паралельного поверхні. Також знайдено ефект релятивістського стиснення ширини потенціального бар'єру.

Цикл наукових праць виконаний в відділі “Квантової електродинаміки сильних полів” відділу теоретичної фізики Інституту прикладної фізики НАН України.

Зокрема, в базах даних містяться публікації: SCOPUS – 4, Google Scholar – 11, Web of Science – 3, із загальною кількістю посилань: SCOPUS – 7, Google Scholar – 19, Web of Science – 3, *h* індекси: SCOPUS – 2, Google Scholar – 3, Web of Science – 1.

Претендент:

к. ф.-м. н.

С. О. Лебединський.

### Перелік публікацій за роботою:

1. Мирошніченко В. І. Квантово-механічний рух електрона в паралельних магнітному та електричному полях / В. І. Мирошніченко, **С. О. Лебединський** // Доповіді НАН України. – 2014. – №9. – С. 61–65.
2. Мирошніченко В. І. Квантово-механічний рух електрона в схрещених однорідних електричному та магнітному полях / В. І. Мирошніченко, **С. О. Лебединський** // Доповіді НАН України. – 2014. – №11. – С. 72–76.
3. Lebedynskiy S. O. The effect of a magnetic field on the motion of electrons for the field emission process description / **S. O. Lebedynskiy**, V. I. Miroshnichenko, R. I. Kholodov, V. A. Baturin. // Probl. of Atomic Science and Technology. – 2015. – №98. – pp. 62–66.
4. DC vacuum breakdown in an external magnetic field / **S. Lebedynskiy**, O. Karpenko, R. Kholodov, V. Baturin, Ia. Profatilova, N. Shipman, W. Wuensch // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2018. – №908. – pp. 318–324.
5. Lebedynskiy S. O. Relativistic correction of the field emission current in the Fowler-Nordheim formalism / **S. O. Lebedynskiy**, O. O. Pasko, R. I. Kholodov // Journal of nano- and electronic physics. – 2019. – №2. – pp. 02022-1–02022-6.
6. Lebedynskiy S. Field emission with relativistic effects in a magnetic field / **S. Lebedynskiy**, R. Kholodov // The European Physical Journal D. – 2019. – № 73 – pp. 190-1–190-5.
7. Лебединський С.О. Рух електрона у паралельних магнітному та електричному полях / **С. О. Лебединський** // Матеріали III Міжрегіональної науково-практичної конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики». – СПЕТФ'2014, 16-17 квітня 2014: тези. – Суми, Україна, 2014. – С. 41-43.
8. Lebedynskiy S. O. Quantum-mechanical movement of the electron in electric and magnetic fields / **S. O. Lebedynskiy**, V. I. Miroshnichenko // Trans-European School of High Energy Physics – TESHER'2014, 17-24 July 2014: proceeding. – Basivka, Lviv Region, Ukraine, 2014. – P. 117-119.
9. Лебединський С.О. Потенціальний бар'єр на межі метал-вакуум при наявності схрещених електричного та магнітного полів / **С. О. Лебединський** // Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики та методики навчання фізики». – СПЕТФ+МНФ'2015, 15-16 квітня 2015: тези – Суми, Україна, 2015. – С. 58-60.
10. Lebedynskiy S.O. Decreasing of the field emission current by the external magnetic field / **S.O. Lebedynskiy**, **R.I. Kholodov** // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики та методики навчання фізики». – СПЕТФ+МНФ'2016, 13-14 квітня 2016: тези – Суми, Україна, 2016. – С. 127-129.

11. Лебединський С.О. Релятивістська поправка до струму польової емісії електронів/ **С. О. Лебединський** // Матеріали XVI Конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів, 20-23 березня 2018 р.: тези. – Харків, Україна, 2018. – С.86 .
12. Lebedynskiy S.O. Relativistic correction to the field electron emission current / **S. O. Lebedynskiy**// Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики та методики навчання фізики». – СПЕТФ+МНФ'2018, 24-25 квітня 2018: тези – Суми, Україна, 2018. – С. 77-78.
13. Лебединський С.О. Релятивістський підхід до тунелювання електронів з конструкційних матеріалів прискорювачів/ **С. О. Лебединський**, Р. І. Холодов // Матеріали XVII Конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів, 26-29 березня 2019 р.: тези. – Харків, Україна, 2019. – С.87 .
14. Лебединський С.О. Вплив зовнішнього магнітного поля на польову електронну емісію / **С. О. Лебединський**, Р. І. Холодов // Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики та методики навчання фізики». – СПЕТФ+МНФ'2019, 23-24 квітня 2019: тези – Суми, Україна, 2019. – С. 42-43.
15. Lebedynskiy S. Field electron emission in an external magnetic field parallel to the surface / **S.O. Lebedynskiy**, R. I. Kholodov, Yu. S. Lebedynska// 8th International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs, MeVArc'2019. – Padova, Italy. September 16-19, 2019. – P. 26.