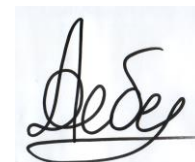


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ

Лебединський Сергій Олександрович



УДК 530.145, 537.533.2

**ПОЛЬОВА ЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ З ВРАХУВАННЯМ
ВПЛИВУ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ
ТА РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕФЕКТІВ**

01.04.02 - теоретична фізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті прикладної фізики НАН України.

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник, доцент
Холодов Роман Іванович,
заступник директора з наукової роботи, завідувач
відділу квантової електродинаміки сильних полів
Інституту прикладної фізики НАН України.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Лисенко Олександр Володимирович,
завідувач кафедри прикладної математики
та моделювання складних систем
Сумського державного університету МОН України;

доктор фізико-математичних наук, професор
Маслов Василь Іванович
провідний науковий співробітник
ННЦ Харківський фізико-технічний інститут
НАН України.

Захист відбудеться «05» грудня 2019 року о 14⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради К55.250.01 при Інституті прикладної фізики НАН України за адресою: 40000, м. Суми, вул. Петропавлівська, 58.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту прикладної фізики НАН України за адресою: 40000 м. Суми, вул. Петропавлівська, 58.

Автореферат розісланий «02» листопада 2019 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат фізико-математичних наук

 В. М. Недорешта

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження явища польової електронної емісії, як самостійного напрямку експериментальних та теоретичних досліджень, бере свій початок з 20-х років минулого століття, що пов'язано зі зростанням експериментальних можливостей отримання високих струмів та необхідністю створення теорії «холодної» емісії. Польова емісія має велике застосування і в даний час: польова електронна мікроскопія, польова електронна спектроскопія, польові джерела електронів та електронні гармати, холодні катоди, вакуумна наноелектроніка. Тому, виявлення нових властивостей польової емісії електронів є, безумовно, актуальним завданням теоретичної фізики, незважаючи на глибоке дослідження цього питання.

Зі зростанням експериментальних потужностей, з'явилась змога використовувати екстремально високі значення напруженостей електричного поля, внаслідок чого рух електрона може ставати релятивістським, але наявні теоретичні дослідження не враховують вплив релятивістських факторів на процес польової емісії електронів. Також польова емісія електронів за екстремально високих значень напруженостей електричного поля відбувається і з полярної області замагнічених нейтронних зірок, однак описується у даний час без врахування релятивістських ефектів.

Можливості збільшення густини струму польової емісії ретельно досліджені, що пояснюється широким використанням цього явища для холодних катодів, мікроскопії та джерел електронів. Проте, з розвитком прискорювальної техніки виникла необхідність використання все більших прискорювальних градієнтів. Разом з цим, польова емісія може бути негативним чинником у процесі прискорення, викликаючи вакуумний пробій всередині прискорювальної структури.

Експерименти на макетних установках прискорювальних структур компактного лінійного електрон-позитронного прискорювача в проєкті CLIC (Compact Linear Collider) показали, що при введенні потужності високочастотного електромагнітного поля, яка забезпечує напруженість електричного поля на осі прискорювальної структури величину порядку 100 МВ/м, на поверхні прискорювальної структури виникають високочастотні високовакуумні пробіи.

Виходячи із викладеного вище, стає зрозуміло, що необхідно більш детально дослідити польову емісію електронів з металу, як початковий етап високовольтного високовакуумного пробію, вплив магнітного поля, на порядок меншого від відсікаючого (cut-off magnetic field), та врахування релятивістських ефектів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась у відділі № 10 «Пучків заряджених частинок» та в відділі №40 «Квантової електродинаміки сильних полів» Інституту прикладної фізики НАН України і є частиною досліджень, які проводилися за темами: «Дослідження фізичних факторів, що впливають на виникнення високовакуумних пробіїв в структурах CLIC при градієнтах прискорюючих полів до 100 МВ на метр» (державний реєстраційний номер 0113U006188, термін виконання 2013-2014 рр.), «Дослідження фізичних факторів, що впливають на виникнення високовакуумних пробіїв в структурах CLIC при градієнтах прискорюючих полів до 100 МВ на метр» (державний реєстраційний номер 0114U006582, термін виконання 2014 р), «Теоретичні та експериментальні

дослідження впливу зовнішнього магнітного поля на імовірність виникнення високовакуумного пробою» (державний реєстраційний номер 0114U002952, термін виконання 2014-2015 рр.), «Розробка методів підвищення стійкості матеріалів прискорюючих структур до високовакуумних електричних розрядів в структурах коллайдера CLIC та експериментальні дослідження впливу зовнішнього магнітного поля на імовірність виникнення високовакуумного пробою» (державний реєстраційний номер 0116U006687, термін виконання 2016 р.), «Квантово-електродинамічні і колективні процеси в надсильних полях, зокрема при зіткненнях важких іонів та в задачі електронного охолодження» (державний реєстраційний номер 0111U010612, термін виконання 2012-2016 рр.), «Розробка методів підвищення стійкості матеріалів прискорюючих структур до високовакуумних електричних розрядів в структурах коллайдера CLIC та експериментальні дослідження впливу зовнішнього магнітного поля на імовірність виникнення високовакуумного пробою» (державний реєстраційний номер 0117U003562, термін виконання 2017 рр.), «Квантово-польові підходи в задачах зіткнення важких іонів і електронів в електромагнітних полях» (державний реєстраційний номер 0116U005848, термін виконання 2017-2021 рр.), «Дослідження впливу модифікації поверхневих шарів матеріалів для прискорюючих структур коллайдера CLIC на струм польової емісії та вірогідність високовакуумних пробойів» (державний реєстраційний номер 0118U006150, термін виконання 2018 р.).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є побудова релятивістської теорії польової емісії електронів із металів у присутності зовнішнього магнітного поля.

Для досягнення поставленої мети в дисертації вирішено такі завдання:

- визначення руху електрона у міжелектродному проміжку при довільній конфігурації електричного та магнітного полів;
- релятивістське узагальнення теорії польової емісії електронів з металу;
- вивчення впливу зовнішнього магнітного поля, паралельного поверхні металу, на протікання польової емісії електронів;
- встановлення залежності протікання передпробійних процесів у міжелектродному проміжку від магнітного, поля паралельного поверхні металу;
- пояснення експериментів ЦЕРН та Інституту прикладної фізики НАН України з вивчення електростатичних високовакуумних пробойів, де невелике магнітне поле зменшує градієнтну стійкість.

Об'єктом дослідження є процес утворення струму польової емісії електронів у присутності зовнішніх однорідних електричного та магнітного полів та з урахуванням релятивістських поправок.

Предметом дослідження є релятивістські ефекти та вплив зовнішнього магнітного поля на коефіцієнт проходження потенціального бар'єру.

Методи дослідження. При виконанні роботи використовується математичний апарат квантової механіки та квантової електродинаміки. Процес польової емісії електронів розглядається в рамках підходу Фаулера-Нордгейма: потенціальний бар'єр на межі метал-вакуум вважається трикутним, а рух електрона одновимірним.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше доведено припущення про незалежність коефіцієнта проходження електронем 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 пробую, 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 дисертації 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 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 вірогідності пробую.

У дисертації пояснено експериментально отримане зменшення стійкості до пробойів 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 пробую шляхом прикладення магнітного поля, більшого за відсікаюче.

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.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно або при його безпосередній участі. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать основні розрахунки, побудова графічних залежностей, активна участь у постановці деяких завдань, обговоренні отриманих результатів та написанні текстів статей.

Особистий внесок дисертанта в опублікованих роботах полягає у наступному. У роботі [1] розв'язана квантово-механічна задача про рух електрона в зовнішніх

колінеарних електричному та магнітному полях. У роботі [2] розв'язана квантово-механічна задача про рух електрона в зовнішніх однорідних схрещених електричному та магнітному полях. Знайдено спектр можливих значень енергії електрона. У роботі [3] розв'язане 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 передпробієнні процеси, які протікають у міжелектродному проміжку та можливість впливу на них магнітним полем. У [5] виконане релятивістське узагальнення виразу для струму польової емісії електронів у випадку малих міжелектродних відстаней. У роботі [6] зроблене релятивістське узагальнення виразу для коефіцієнта проходження потенціального бар'єру, що дало змогу також врахувати вплив зовнішнього магнітного поля, паралельного поверхні.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наукових семінарах в Інституті прикладної фізики НАН України, на 4 міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференціях: Trans-European School of High Energy Physics, Basivka, Lviv Region, Ukraine (2014); XIII International conference "Plasma electronics and new acceleration methods", Kharkiv, Ukraine (2015); Конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів, Харків, Україна (2018, 2019); Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики, Суми, Україна (2014-2019); 8th International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs (MeVArc 2019), Padova, Italy.

Роботи [1-3] увійшли до циклу наукових праць «Вплив магнітного поля на процес польової емісії», що був відзначений Почесною грамотою Президії НАН України, від 2 березня 2016 року.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 15 наукових роботах, з яких 6 статей опубліковано в спеціалізованих наукових журналах, що входять до переліку ДАК МОН України, і 9 у вигляді тез доповідей у збірниках наукових праць конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, в якому міститься 129 найменувань. Обсяг дисертації складає 124 сторінки машинописного тексту та містить 8 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність вибраної теми, формулюється мета і визначаються основні завдання дослідження, відображається новизна отриманих результатів, їх наукове, практичне значення, зв'язок роботи з науковими програмами і темами, особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів роботи, основних публікацій, а також щодо структури дисертації.

Перший розділ «**Польова електронна емісія**» містить опис процесу польової емісії електронів з металу, який розглядається у дисертаційному дослідженні з висвітленням основних методів його вивчення та аналізу. Обговорено сучасний стан досліджуваної проблеми та відповідні математичні моделі, результати попередніх

досліджень у вибраному напрямку. З оглянутих літературних джерел зроблено висновок про незавершеність теоретичних досліджень процесу польової емісії електронів при наявності зовнішнього магнітного поля та врахування релятивістських ефектів у випадку прикладення високих напруг. На підставі зроблених висновків визначені завдання дослідження.

У другому розділі «**Квантово-механічний рух електрона в електричному та магнітному полях**» розглядається вільний рух електрона в присутності різних можливих конфігурацій постійних і однорідних електричного та магнітного полів. Для вирішення питання про квантово-механічний рух електрона в зовнішніх постійних і однорідних електричному $\vec{E}$ та магнітному $\vec{B}$ полях при довільному куті між ними вибрано проєкції напруженості електричного поля $\vec{E}$, магнітного поля $\vec{B}$, вигляд потенціалу $\varphi(\vec{r})$, потенціальної енергії електрона $U(\vec{r})$ та векторного потенціалу магнітного поля $\vec{A}(r)$ наступним чином:

$$\begin{aligned} \vec{E}(-E\sin\alpha, -E\cos\alpha, 0), \vec{B}(0, B, 0), \varphi(x, y) = E(x\sin\alpha + y\cos\alpha), \\ U(x, y) = -eE(x\sin\alpha + y\cos\alpha), \vec{A}(0, 0, -Bx). \end{aligned} \quad (1)$$

Вихідним рівнянням руху електрона у вибраній суперпозиції електричного та магнітного полів є рівняння Шрьодінгера для хвильової функції електрона [1*], де оператор Гамільтона має наступний вигляд:

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} \left[-\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \left(-i\hbar \frac{\partial}{\partial z} - eBx \right)^2 \right] - eE(x\sin\alpha + y\cos\alpha). \quad (2)$$

Для розв'язання рівняння Шрьодінгера хвильову функцію електрона $\tilde{\psi}(x, y)$ знайдено у вигляді добутку двох функцій, кожна з яких залежить тільки від однієї змінної:

$$\tilde{\psi}(x, y) = X(x)Y(y) \quad (3)$$

Отримано диференціальне рівняння квантового осцилятора:

$$\frac{d^2 X(\xi)}{d\xi^2} + (\tilde{\varepsilon}_x - \xi^2) X(\xi) = 0 \quad (4)$$

де, введено наступні позначення: $x - x_0 = x'$, $x_0 = \frac{p_z}{m\omega_B} + \frac{eE\sin\alpha}{m\omega_B^2}$, $x' = a\xi$,

$a = \left(\frac{\hbar}{m\omega_B} \right)^{\frac{1}{2}}$, $\xi = \left(\frac{m\omega_B}{\hbar} \right)^{\frac{1}{2}} \left(x - \frac{p_z}{m\omega_B} - \frac{eE\sin\alpha}{m\omega_B^2} \right)$, ω_B – циклотронна частота обертання електрона в класичному випадку. Постійна $\tilde{\varepsilon}_x$ визначається наступним виразом:

$$\tilde{\varepsilon}_x = \frac{1}{\hbar\omega_B} \left[2\varepsilon_x + \frac{e^2 E^2 \sin^2 \alpha}{m\omega_B} + \frac{2eE\sin\alpha}{m\omega_B} p_z \right], \quad (5)$$

де $\varepsilon_x = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_B + \frac{mv_d^2}{2} - eEx_0$, $v_d = \frac{E}{B} \sin\alpha$ – швидкість дрейфу центру ларморовського кола електрона в суперпозиції електричного та магнітного полів при

наявності кута α між їхніми напрямками при класичному описі його руху. Зупинимося на фізичному змісті окремих доданків:

- $\left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_B$ – представляє дискретний ряд значень енергії електрона,

пов'язаної з його трансверсальним рухом відносно магнітного поля;

- $\frac{m v_d^2}{2}$ – енергія електрона, пов'язана з дрейфом його класичного центру ларморівської орбіти та визначається значеннями напруженості електричного та магнітного полів;

- $-eEx_0$ – потенціальна енергія електрона, який рухається в постійному однорідному електричному полі та визначається x -координатою центра ларморівської орбіти електрона.

Отримано явний вид тієї частини хвильової функції електрона, яка описує його рух у площині, перпендикулярній магнітному полю:

$$\psi(x, z) = X(x) \exp\left(\frac{ip_z z}{\hbar}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi 2^n n!}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right) H_n(\xi) \exp\left(\frac{ip_z z}{\hbar}\right), \quad (6)$$

де $H_n(\xi)$ – поліном Ерміта n -го порядку.

Рівняння, яке описує рух електрона вздовж магнітного поля, може бути приведено до вигляду:

$$\frac{d^2 Y}{d\eta^2} - \eta Y = 0, \quad (7)$$

де безрозмірна координата η пов'язана з координатою y наступним співвідношенням:

$$\eta = \left(\frac{2meE\cos\alpha}{\hbar}\right)^{1/3} \left(y - \frac{\varepsilon_y}{eE\cos\alpha}\right). \quad (8)$$

Розв'язок рівняння (7) відомий і виражається через функції Ейрі [1*]:

$$Y(\eta) = A\Phi(\eta), \quad (9)$$

де $\Phi(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{+\infty} \cos\left(\frac{u^3}{3} + u\eta\right) du$, A – константа, яка визначається із умов нормування хвильової функції.

У випадку паралельності електричного та магнітного полів ($\alpha = 0$) для постійної ε_y отримано наступне значення:

$$\varepsilon_y = \varepsilon - \varepsilon_x = \varepsilon - \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_B. \quad (10)$$

Рівняння (7) за своїм виглядом співпадає з рівнянням Фаулера та Нордгейма, яке вони використовували для знаходження коефіцієнта проникнення потенціального бар'єру за відсутності зовнішнього магнітного поля. Враховуючи те, що $\varepsilon - \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_B$ визначає складову енергії, яка пов'язана з рухом вздовж магнітного поля, з формули (7) випливає, що у випадку паралельних електричного та магнітного

полів, коефіцієнт проникнення електроном металу потенціального бар'єру, дійсно, не залежить від величини магнітного поля. Таким чином, строго доведено справедливості припущення Блатта, зроблене ним у роботі [2*], про незалежність коефіцієнта проникнення електроном металу потенціального бар'єру на межі метал-вакуум від величини магнітного поля у випадку паралельних електричного та магнітного полів. До теперішнього часу ні теоретичних, ні експериментальних доведень цього припущення, ні експериментальних результатів у літературі не знайдено.

У третьому розділі «Релятивістське узагальнення теорії польової емісії» враховано релятивістську поправку до густини струму польової емісії електронів з металу та вплив зовнішнього магнітного поля, паралельного поверхні металу. У випадку міжелектродного проміжку порядку 1 см та напруженості зовнішнього електричного поля близько $E = 100 \text{ MB/M}$ рух електрона є релятивістським:

$\gamma = \varepsilon / mc^2 \approx 2$. Тому розрахунки коефіцієнту проходження потенціального бар'єру та відповідно струму польової емісії потребують доповнення, яке б враховувало релятивізм. Для знаходження хвильових функцій електрона, що рухається з релятивістськими швидкостями використано рівняння Клейна-Гордона. Використання рівняння Клейна-Гордона дало можливість врахувати не лише релятивістські ефекти, а й присутність зовнішнього однорідного магнітного поля, паралельного поверхні металу. При розв'язанні цього рівняння використовувались розв'язки, котрі передбачають нехтування спіном електрона.

Хвильова функція електрона у вакуумі у присутності електричного поля $\vec{E}(-E, 0, 0)$ задовольняє рівнянню Клейна-Гордона вигляду:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{(\varepsilon - U_0 + eEx)^2}{\hbar^2 c^2} - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \right] \psi_{II}(x) = 0, \quad (11)$$

де U_0 – висота потенціального бар'єру.

Для використання підходу Фаулера та Нордгейма необхідно, щоб виконувалась умова $\frac{1}{2} \frac{eE}{mc^2} \left(x - \frac{\varphi}{mc^2} \right) \ll 1$, де φ – робота виходу електронів з металу. Це означає, що

для напруженості електричного поля $E \approx 10^8 \text{ B/M}$ міжелектродна відстань повинна не перевищувати 1 см. Тоді з достатньою точністю коефіцієнт проходження потенціального бар'єру записується у вигляді:

$$D(W) = \frac{4e^{-\frac{4}{3}(k^2 eE)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{U_0 - W}{eE} \right)^{\frac{3}{2}}}}{U_0} (W(U_0 - W))^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{5} \left(\frac{U_0 - W}{mc^2} \right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{E_s}{E} \right) \right), \quad (12)$$

де $E_s = \frac{m_e^2 c^3}{e\hbar}$ – швінгерівський ліміт.

Формулу для густини струму польової емісії можна записати у вигляді:

$$j = \frac{e^3}{4\pi^2\hbar} \frac{\mu^{\frac{1}{2}}}{(\varphi + \mu)\varphi^{\frac{1}{2}}} E^2 e^{\frac{4\sqrt{2m}\varphi^{\frac{3}{2}}}{3\hbar eE}} \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{5} \left(\frac{\varphi}{mc^2} \right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{E_s}{E} \right) \right), \quad (13)$$

де E – напруженість постійного електричного поля; φ – робота виходу; μ – електрохімічний потенціал.

Добуток перед дужками у даній рівності повністю співпадає із формулою, отриманою Фаулером та Нордгеймом [3*], а доданок у дужках є суто релятивістським і не може бути отриманим з розрахунків [3*].

Коефіцієнт проходження потенціального бар'єру у більш загальному випадку без накладання обмежень на міжелектродну відстань знаходиться шляхом розв'язання рівняння Клейна-Гордона (11). Розв'язком (11) є функція параболічного циліндра. Коефіцієнт проходження потенціального бар'єру приймає вигляд:

$$D_{rel} = \frac{2\sqrt{2}\beta \frac{p_1}{\hbar} \left(\frac{\hbar c}{eE} \right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{p_1^2}{2\hbar^2} \frac{\hbar c}{eE} + \sqrt{2}\beta \frac{p_1}{\hbar} \left(\frac{\hbar c}{eE} \right)^{\frac{1}{2}} + \beta^2 + \alpha^2}, \quad (14)$$

де α і β дійсні та визначаються як $\alpha + i\beta = \frac{d}{dQ} D_{-0.5-ia} \left[e^{-i\pi/4} Q \right]$, $D_\nu[Q]$ – функція параболічного циліндра, p_1 – компонента імпульсу $p_1 \parallel \vec{E}$.

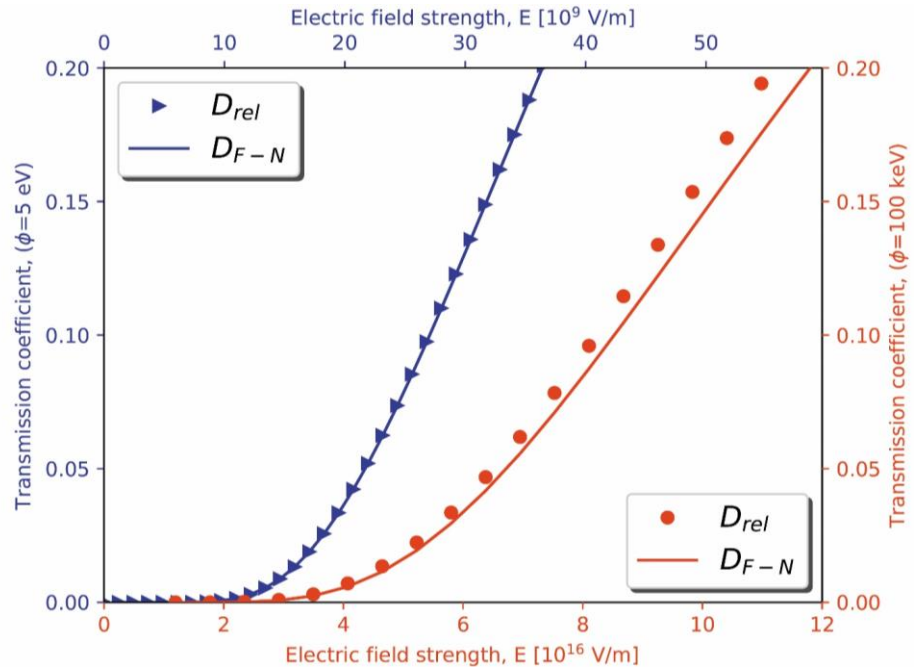


Рисунок 1. Залежність величини релятивістськи-узагальненого D_{rel} та отриманого Фаулером і Нордгеймом D_{F-N} коефіцієнтів проходження потенціального бар'єру від електричного поля при різних роботах виходу.

У загальному випадку коефіцієнт проходження потенціального бар'єру (14)

може бути знайдений лише чисельно. На рисунку 1 легко побачити, що у випадку польової емісії з металів графіки майже співпадають. Величина релятивістської поправки у такому випадку буде становити $< 0.1 \%$. Звичайно, експериментально побачити такий вплив буде дуже важко. У випадку полів близьких до швінгерівського ліміта $E_s \approx 1.32 \times 10^{18} \text{ В/м}$ і роботи виходу 100 кеВ відмінність складає $> 10 \%$ і може вносити помітний внесок у густину струму.

Простий аналітичний вираз для формули (14) можна знайти у випадку, коли $\left(\frac{\varphi}{mc^2}\right) \ll 1$ та $\left(\frac{\varphi^2}{e\hbar Ec}\right) \sim 1$. Коефіцієнт проходження потенціального бар'єру на межі метал-вакуум можна записати у наступному вигляді:

$$D_{rel} = D_{F-N} \left[1 + \frac{\sqrt{2}}{5} \frac{(U_0 - W)^{\frac{5}{2}}}{\sqrt{mc^2} e E \hbar} + \frac{\sqrt{2}}{48} \frac{(7U_0 - 12W) e E \hbar}{U_0 \sqrt{m} (U_0 - W)^{\frac{3}{2}}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{1536} \frac{(49U_0^2 - 216U_0W + 192W^2) e^2 E^2 \hbar^2}{U_0^2 m (U_0 - W)^3} + \frac{1}{120} \frac{37U_0 - 79W + 12 \frac{W^2}{U_0}}{mc^2} \right], \quad (15)$$

$$\text{де } D_{F-N} = \frac{4\sqrt{U_0 - W} \sqrt{W} e^{-\frac{4(U_0 - W)^{\frac{3}{2}} \sqrt{2m}}{3\hbar E}}}{U_0} \quad - \text{ коефіцієнт проходження потенціального}$$

бар'єру, отриманий Фаулером та Нордгеймом [3*]. При цьому, варто звернути увагу, що другий та третій доданки виразу у дужках, які не містять у собі швидкості світла c , – доданки, що уточнюють вираз для коефіцієнта проходження потенціального бар'єра, отриманий Фаулером та Нордгеймом, і можуть бути отримані з їхніх розрахунків. Разом з тим, перший та останній доданки є суто релятивістськими та не можуть бути отримані в рамках підходу Фаулера та Нордгейма. Окремо відмітимо, що перший доданок повністю співпадає з отриманим у (12).

Для пояснення отриманого ефекту підвищення коефіцієнту проходження потенціального бар'єру при врахуванні релятивістських ефектів розглянуто простішу задачу – проходження електрона крізь прямокутний потенціальний бар'єр.

Вираз для коефіцієнту відбиття можна записати у формі:

$$R = \frac{U_0^2 (ch(2\rho h) - 1)}{U_0^2 ch(2\rho h) - 8W^2 + 8WU_0 - U_0^2}, \quad (16)$$

$$\text{де } \rho = \rho_{nonrel} \sqrt{1 - V^2/c^2}, \quad \rho_{nonrel} \equiv \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (U_0 - W)}, \quad V^2 = \frac{U_0 - W}{2m}.$$

Формулу для коефіцієнта відбиття (16) у загальному випадку можна представити у вигляді:

$$R(\rho h) = R(\rho_{nonrel} h_{rel}), \quad (17)$$

$$\text{де } h_{rel} = h \sqrt{1 - V^2/c^2}.$$

Тобто коефіцієнт відбиття описується нерелятивістською формулою, а ширина

потенціального бар'єру зменшується, оскільки $h_{rel} < h$. Даний ефект можна порівняти з лоренцовим стисненням ширини потенціального бар'єру. Оскільки товщина потенціального бар'єру зменшується, то коефіцієнт проходження, відповідно, зростає, що і пояснює отриманий ефект.

Використання рівняння Клейна-Гордона дало можливість врахувати не лише релятивістські ефекти, а й присутність зовнішнього однорідного магнітного поля, паралельного поверхні металу. Компоненти напруженості електричного поля та магнітної індукції обирались наступним чином: $\vec{E}(-E, 0, 0)$, $\vec{B} = (0, B, 0)$. Використовуючи ту саму логіку, що і раніше, коефіцієнт проходження потенціального бар'єру знайдено у такому вигляді:

$$D_B = \frac{4\sqrt{U_0 - W}(E^2 - B^2c^2)^{3/4} E^{3/2} \sqrt{W}}{WE^3 + (E^2 - B^2c^2)^{3/2}(U_0 - W)} \exp\left(-\frac{4}{3} \frac{\sqrt{2}\left(E^2 - 2\left(\frac{U_0 - W}{mc^2}\right)c^2 B^2\right) \sqrt{m}(U_0 - W)^{3/2}}{E^3 e \hbar}\right). \quad (18)$$

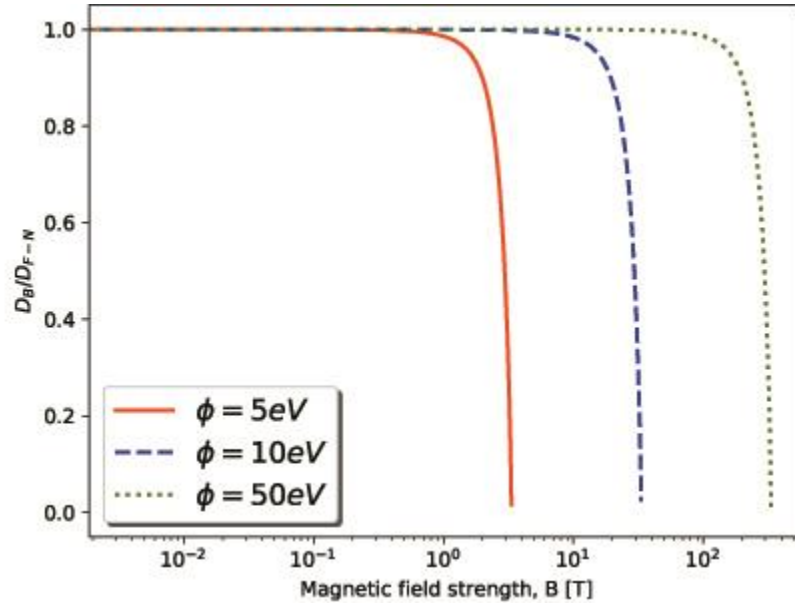


Рисунок 2. Залежність коефіцієнта проходження потенціального бар'єру від величини магнітного поля для різних значень роботи виходу.

У випадку, коли $B = 0$ формула (3.90) переходить у коефіцієнт проходження потенціального бар'єру отриманий Фаулером та Нордгеймом у відсутності магнітного поля D_{F-N} .

На рисунку 2 зображено залежність коефіцієнта проходження потенціального бар'єру на межі метал-вакуум від величини індукції зовнішнього магнітного поля, паралельного поверхні металу. Таким чином, при малих значеннях магнітного поля його вплив на коефіцієнт проходження незначний. Проте, зі зростанням індукції до величини $B = E/c$ коефіцієнт проходження зменшується до нуля.

У четвертому розділі «Дослідження впливу магнітного поля на польову емісію та інші процеси в вакуумному проміжку» проведено аналіз та теоретичне пояснення експериментів проведених у Інституті прикладної фізики НАН України та

Європейській організації з ядерних досліджень (ЦЕРН) по вивченню впливу магнітного поля, перпендикулярного електричному, на процеси, що відбуваються при прикладанні високої напруги у міжелектродному проміжку у високому вакуумі [4*].

Для дослідження впливу магнітного поля, паралельного поверхні електродів, на ймовірність високовольтних пробів у ЦЕРНі була створена компактна вакуумна система, що містить два електроди з відносно великою площею поверхні та міжелектродним проміжком 15 мкм. Доступна електрична схема дозволяє прикладати напругу з частотою 1 кГц. Напруженість магнітного поля дорівнювала 0,5 Тл, а напруга дорівнювала 2,16 кВ, що відповідає напруженості електричного поля 144 МВ/м. У результаті проведених експериментів було відзначено, що деякі з отриманих даних, схоже, вказують на невелике збільшення ймовірності виникнення пробів через наявність магнітного поля.

В Інституті прикладної фізики НАН України для дослідження впливу магнітного поля, паралельного поверхні електродів, на ймовірність високовольтних пробів була створена спеціальна магнітна система на базі самарій-кобальтових магнітів. Магнітне поле в області розрядного проміжку становило 0,33 Тл, розрядний проміжок становив 100 мкм, значення напруги плавно збільшувалося, від 1 до 100 кВ. Експерименти, проведені в ІФ НАН України, показали, що наявність магнітного поля призводить до зменшення напруги пробом на 10 % для практично всіх зразків катоду, незалежно від способу обробки їх поверхні.

Для пояснення отриманих результатів розглянуто компоненти темного струму, що протікає в міжелектродному проміжку, для виявлення можливості впливу магнітного поля на високоградієнтний пробій. Весь потік частинок, що протікає у міжелектродному проміжку перед пробом, можна розділити на потік заряджених і нейтральних частинок. Тоді потік заряджених частинок буде:

$$j_{dark} = j^{(-)} + j^{(+)} + j^{(++)} + j^{add}, \quad (19)$$

де $j^{(-)}$ – струм з катоду, $j^{(+)}$ – струм з аноду, $j^{(++)}$ – струм, що формується у міжелектродному проміжку (іонізаційний струм), j^{add} – додатковий струм, що виникає під дією інших зовнішніх факторів (космічне випромінювання і т.д.).

Потік нейтральних частинок можна записати у наступному вигляді:

$$j^{(0)} = j_{rest}^{(0)} + j_{desor}^{(0)} + j_{diff}^{(0)} + j_{T,avap}^{(0)} + j_{Ion,atom}^{(0)}, \quad (20)$$

де $j_{rest}^{(0)}$ – потік залишкових газів, $j_{desor}^{(0)}$ – потік десорбованих атомів і молекул, $j_{diff}^{(0)}$ – потік дифундованих атомів та молекул, $j_{T,avap}^{(0)}$ – потік частинок, що випарувалися, внаслідок локального нагрівання електродів частинок, $j_{Ion,atom}^{(0)}$ – потік частинок, вибитих іонами, які бомбардують електроди. Перші три доданки можна зменшити підвищуючи вакуумні умови та ступінь очистки катодів і вакуумної камери. Останні два доданки виникають лише внаслідок протікання струмів між електродами.

Катодний струм складається зі струму польової емісії $j_{emis,e^-}^{(-)}$, струму викликаного іонами, які бомбардують поверхню аноду $j_{Ion,bombar}^{(-)}$ та струму емітованих іонів з матеріалу катоду $j_{emis,Me^-}^{(-)}$. Отже,

$$j^{(-)} = j_{emis,e^{-}}^{(-)} + j_{Ion,bombar}^{(-)} + j_{emis,Me^{-}}^{(-)}. \quad (21)$$

Анодний струм можна записати так:

$$j^{(+)} = j_{emis,Me^{+}}^{(+)} + j_{e^{-},bombar}^{(+)}, \quad (22)$$

де $j_{emis,Me^{+}}^{(+)}$ – струм емітованих позитивних іонів з аноду, $j_{e^{-},bombar}^{(+)}$ – струм частинок, які вивільняються внаслідок бомбардування поверхні аноду емітованими електронами.

Іонізаційний струм буде складатись зі струму утвореного атомами металу, які були іонізовані електронами у міжелектродному проміжку $j_{e^{-},Me^{+}}^{(-)}$ і молекулами газу, який іонізується в міжелектродному проміжку $j_{e^{-},gas^{+}}^{(-)}$:

$$j^{(-+)} = j_{e^{-},Me^{+}}^{(-+)} + j_{e^{-},gas^{+}}^{(-+)}. \quad (23)$$

У формулах (19-23) найбільше значення приймає струм польової емісії електронів, тому було проаналізовано вплив на нього зовнішнього магнітного поля, паралельного поверхні катоду.

Рівняння, що описує рух електрона через потенціальний бар'єр у присутності зовнішнього магнітного поля в безрозмірних змінних має вигляд:

$$\frac{d^2 X}{d \xi^2} - k^2(\xi) X = 0, \quad (24)$$

де $k^2(\xi) = C + \xi^2 - \varepsilon_z \xi - \varphi \xi - \frac{\varphi_m}{\xi}$. Вигляд бар'єру визначається параметрами:

1) $\varepsilon_z = 2\sqrt{p_z^2 / m\hbar\omega_B}$ – характеризує відношення енергії електрона, що пов'язана з його рухом вздовж осі z до величини значення енергії електрона між двома сусідніми рівнями $\hbar\omega_B$,

2) $C = \frac{2}{\hbar\omega_B} \left(U_0 - + \frac{p_y^2}{2m} + \frac{p_z^2}{2m} \right)$ – значення перевищення висоти потенціального бар'єру над енергією електрона, пов'язаною з його рухом вздовж вісі x , в одиницях енергії $\hbar\omega_B$,

3) $\varphi = \frac{2eE}{\omega_B} \left(\frac{\hbar}{m\omega_B} \right)^{\frac{1}{2}}$ – коефіцієнт, який характеризує потенціальну енергію електрона в зовнішньому електричному полі,

4) $\varphi_m = \frac{e^2}{4} \left(\frac{m\omega_B}{\hbar} \right)^{\frac{1}{2}}$ – коефіцієнт, що характеризує потенціальну енергію електрона, пов'язану з його взаємодією з «дзеркальним» позитивним зображенням в тілі металу,

5) $x = a\xi$, $a = \sqrt{\hbar / (m\omega_B)}$ – вибрана одиниця довжини для даної задачі.

На рисунку 3 приведено графік залежності висоти потенціального бар'єру від повздовжньої координати.

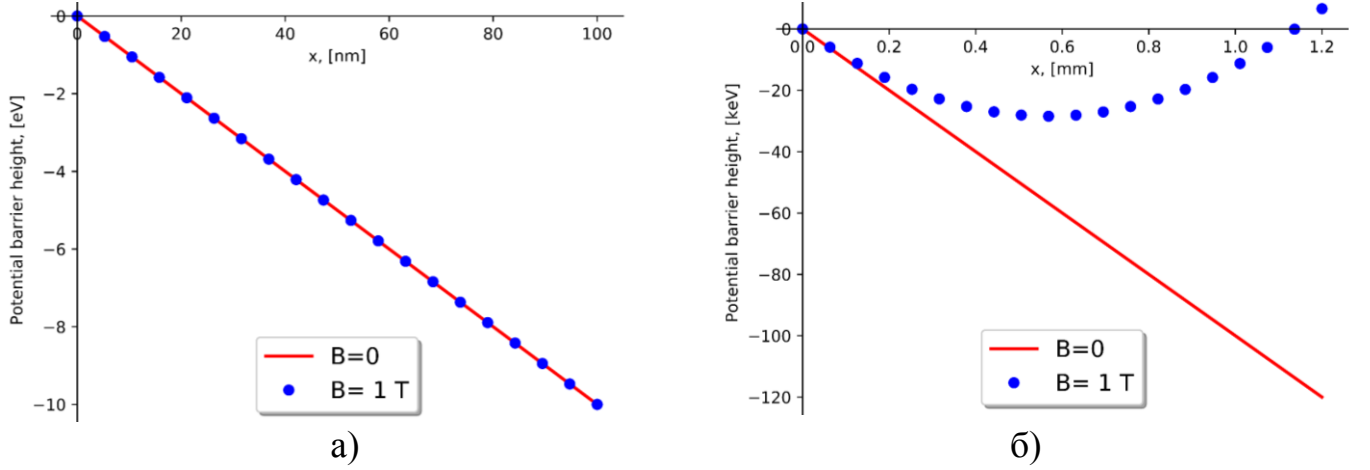


Рисунок 3. Ефективна потенціальна енергія $V(x)$ електрона біля поверхні металу у різних масштабах: а) від 0 до $6 \cdot 10^{-8}$ м, б) від 0 до $1.2 \cdot 10^{-3}$ м. Лінією позначено випадок $E=100$ МВ/м, $B=0$. Точками позначено $E=100$ МВ/м, $B=1$ Тл.

З рисунка 3 видно, що поблизу межі метал-вакуум форма потенціального бар'єру співпадає з потенціальним бар'єром у випадку відсутності магнітного поля. Але зі збільшенням відстані від межі металу потенціальний бар'єр у присутності зовнішнього магнітного поля починає зростати і стає нескінченним. У результаті процес польової емісії у присутності зовнішнього магнітного поля паралельного поверхні металу відбуватиметься лише для обмеженого міжелектродного проміжку. Величину відсікаючого магнітного поля (при якому струм між електродами припиняється) можна знайти за формулою [5*]:

$$B_H = \sqrt{\frac{2mU}{ed^2} + \left(\frac{mv_0}{ed}\right)^2}, \quad (25)$$

де m – маса електрона, U – напруга між електродами, e – заряд електрона, d – відстань між електродами, v_0 – початкова швидкість електрона.

Використовуючи проектний прискорюючий градієнт майбутнього компактного лінійного прискорювача CLIC, що становить 100 МВ/м, було оцінено, що для міжелектродної відстані у 100 мкм відсікаюче поле становить $B_H = 3.4$ Тл. Тому «вимкнення» струму польової емісії за допомогою зовнішнього магнітного поля паралельного до поверхні металу є можливим способом боротьби з високовакуумними високоградієнтними пробоями. Під час проведення експериментів у ЦЕРН та ІПФ НАН України досліджувався вплив магнітного поля, на порядок меншого за відсікаюче, на ймовірність виникнення пробою та пробійну напругу. Для врахування впливу такого поля було узагальнено вираз Фаулера-Нордгейма для струму польової емісії [3*] на випадок присутності зовнішнього магнітного поля, паралельного до поверхні металу. Для цього було використано коваріантний підхід, тобто, твердження про те, що процеси у вакуумному проміжку підпорядковуються законам фізики, які описуються співвідношенням між фізичними величинами, однаковими в будь-якій інерціальній системі відліку. Густина струму в 4-коваріантній формі має вигляд:

$$j^i = AF^{ik} u_k \cdot \sqrt{I_1} \cdot \exp(-b / \sqrt{I_1}), \quad (26)$$

де $A = \frac{1}{4\pi^2\hbar} \frac{\sqrt{\mu}}{(\varphi + \mu)\sqrt{\varphi}}$, $b = \frac{4\sqrt{2m}\varphi^{\frac{3}{2}}}{3\hbar}$, $u_k = \left(\gamma, \frac{\vec{V}}{c} \gamma \right)$ – чотири-швидкість частинки,

I_1 – інваріант поля. Враховуючи, що $V = \frac{cB}{E}$, γ приймає форму $\gamma = \frac{E}{\sqrt{E^2 - c^2 B^2}}$.

Абсолютна величина просторових компонент цього виразу дає потрібну величину густини струму з урахуванням впливу магнітного поля $(\vec{V} \parallel \vec{B})$:

$$|\vec{j}| = AE^2 \exp\left(-b / \sqrt{E^2 - c^2 B^2}\right). \quad (27)$$

Отримане модифіковане рівняння Фаулера-Нордгейма (27) є узагальненням на випадок присутності зовнішнього магнітного поля, перпендикулярного до електричного. За відсутності магнітного поля це рівняння перетворюється на відоме рівняння Фаулера-Нордгейма [3*].

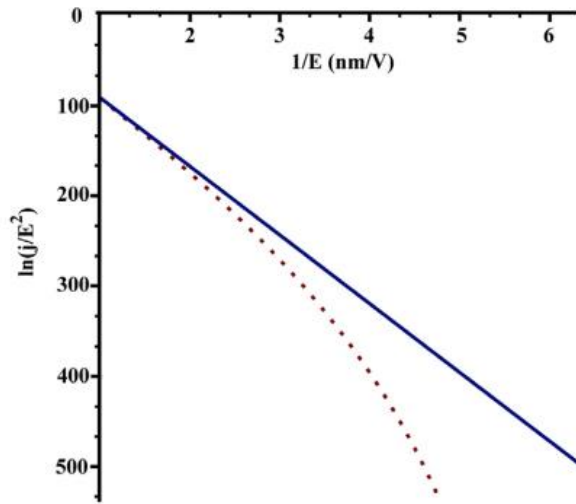


Рисунок 4. Вплив магнітного поля на струм польової емісії у координатах Фаулера-Нордгейма виходячи з узагальненої формули Фаулера-Нордгейма. Лінією показано струм польової емісії у відсутності магнітного поля. Штрихами – струм у присутності зовнішнього магнітного поля паралельного до поверхні величиною 0,5 Тл.

На рисунку 4 показано графік залежності струму польової емісії від величини напруженості електричного поля та індукції магнітного поля, отриманий з рівняння (27) в координатах Фаулера-Нордгейма. Вплив магнітного поля на густину струму зменшується зі збільшенням напруженості електричного поля.

Враховуючи, що електричне поле може збільшуватися на вістрях в $\beta = 30 \div 100$ разів, для оцінки використане реальне значення, яке дорівнює: $E' = \beta E$ (β – коефіцієнт підсилення поля) та значення електричного та магнітного полів, які використовувались в експерименті в Інституті прикладної фізики НАН України $E = 100 \text{ MB}_m$, $B = 0,33 \text{ Тл}$. Відзначимо, що чим більшим є коефіцієнт підсилення, тим менше проявляється вплив магнітного поля, тому для оцінки було використане мінімальне значення $\beta = 30$. Вплив магнітного поля на струм польової емісії поля становить:

$$|\vec{j}_B| = j_{FN} \cdot \left(e^{-\frac{b}{\beta E}} \right)^{1/2 \beta^2} \left(1 - \frac{1}{2\beta^2} \right) \approx j_{FN} \cdot (1 - 5 \cdot 10^{-4}). \quad (28)$$

Можна побачити, що порівняно невеликі значення індукції магнітного поля не впливають на величину струму польової емісії. Очевидно, що вплив такого магнітного поля на струм емітованих іонів взагалі значно менший.

Також було розглянуто вплив магнітне поле на електрони, які утворюються в міжелектродному проміжку. Електрон у взаємно перпендикулярних електричному і магнітному полях рухається по троході. Тим самим збільшується довжина пробігу електрона, що утворився у міжелектродному проміжку та рухається у напрямку катода. Довжина траєкторії знаходилась за формулою:

$$l = \int_0^{\tau_{hd}} d\tau \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \approx h_d + v_0 \sqrt{2h_d}, \quad (29)$$

де $h_d \equiv h|_{y=d} = \frac{d}{L_{dr}}$, $L_{dr} = v_{dr} t_0$, $v_{dr} = c$, $t_0 = \frac{2\pi}{\omega_B}$, ω_B – циклотронна частота, v_0 – початкова швидкість. Для значення експерименту проведеного в Інституті прикладної фізики НАН України ($B = 0.33$ Тл, $E = 100$ МВ/м і $d = 100$ мкм), параметри мають значення: $t_0 = 10^{-10}$ с, $L_{dr} = 3.25$ см і $h_d = 0.003$.

Магнітне поле істотно змінює траєкторію електронів іонізації з енергією декількох еВ, спрямованих до катода. Максимальна іонізація відбувається для електронів з енергією порядку десяти еВ [6*]. З цього випливає (з урахуванням енергії іонізації), що електрони, які утворюються в проміжку, мають енергію кілька еВ. Як приклад, вибрано електрон з енергією $\varepsilon = 2$ еВ. Відносне подовження траєкторії електрона становить:

$$\Delta l / l = v_0 \sqrt{2/h_d} \approx 0,1. \quad (30)$$

Таким чином, подовження траєкторії електронів призводить до посилення струму за рахунок збільшення іонізації.

Магнітне поле також змінює кут входження електрона в метал і це може вплинути на процес десорбції. Оцінка зміни кута входження електрона у поверхню анода дає: $\theta \approx \frac{v_x}{v_y} = \sqrt{h_d/2} \approx 2^\circ$. Можна припустити, що така зміна кута входження дає майже непомітний ефект на процеси десорбції та виникнення пробою.

З проведених оцінок, можна зробити висновок, що причиною зменшення напруги пробою на 10% у експериментах ІПФ НАН України, найбільш вірогідно є зростання темного струму j_{dark} внаслідок збільшення довжини траєкторії руху електрона на 10% відсотків від початкової. У випадку підвищення величини магнітного поля до відсікаючого B_H , усі утворені в міжелектродному проміжку електрони (як емітовані, так і іонізовані) не досягають анода. Тому застосування магнітного поля більшого за відсікаюче є одним з шляхів запобігання виникнення високовакуумного високоградієнтного пробою.

ВИСНОВКИ

1. Розв'язана задача про квантово-механічний рух електрона в зовнішніх електричному та магнітному полях при довільному куті між ними. Знайдено енергетичний спектр електрона, що рухається в такій конфігурації полів, та пояснено фізичний зміст окремих складових цього спектру. Показано, що коефіцієнт проходження потенціального бар'єру електроном металу при паралельній орієнтації електричного та магнітного полів не залежить від величини магнітного поля. Цим самим строго доведено припущення Блатта [2*], про незалежність коефіцієнта проходження електроном потенціального бар'єру у випадку колінеарності електричного та магнітного полів.

2. 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. Показано, що збільшення коефіцієнта проходження потенціального бар'єру у випадку польової емісії з металів складає 0,015 %. У випадку польової емісії з полярного регіону нейтронної зірки збільшення коефіцієнта тунелювання складе близько 15 %.

3. 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.

4. Знайдено загальний вигляд та спрощену аналітичну формулу коефіцієнта проходження потенціального бар'єру на межі метал-вакуум у випадку впливу зовнішнього магнітного поля, перпендикулярного електричному. Показано, що магнітне поле зменшить коефіцієнт проходження менше ніж на 0,015 % для типових значень електричного та магнітного полів ($E = 100 \text{ MB/M}$, $B = 0,33 \text{ Тл}$), що узгоджується з раніше отриманими результатами.

5. Проаналізовано вплив магнітного поля, паралельного поверхні катоду, на компоненти темнового струму у процесі формування пробою в експериментах ЦЕРН та ІПФ НАН України [4*]. Показано, що зовнішнє магнітне поле збільшує довжину траєкторії електрона, утвореного в міжелектродному проміжку, на 10 %. Зростання темнового струму внаслідок збільшення довжини траєкторії електрона пояснює зменшення напруги пробою в експериментах ІПФ НАН України.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

- [1*] Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, Теоретическая физика в 10 т. Т. 3, Москва: Наука, 1969.
- [2*] F. J. Blatt, «Field emission in a magnetic field,» *Phys. Rev*, v. 131, № 1, pp. 166-169, 1963.
- [3*] R. H. Fowler, L. Nordheim, «Electron emission in intense electric fields,» *Proc. Royal Soc. Lond. Series A*, v. 119, № 781, pp. 173-181, 1928.
- [4*] S. Lebedynskyi, O. Karpenko, R. Kholodov, V. Baturin, I. Profatilova, N. Shipman, W. Wuensch, «DC vacuum breakdown in an external magnetic field», *Nuclear*

Instruments and Methods in Physics Research Section A, № 908, p. 318–324, 2018.

[4*] A. W. Hull, «The Effect of A Uniform Magnetic Field on the Motion of Electrons Between Coaxial Cylinders,» *Phys. Rev.*, v. 18, № 1, pp. 31-57, 1921.

[5*] A. von Engel, *Ionized Gases*, Oxford University Press, 1955.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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. Lebedynskyi S. O. The effect of a magnetic field on the motion of electrons for the field emission process description / **S. O. Lebedynskyi**, 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. Lebedynskyi**, 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. Lebedynskyi S. O. Relativistic correction of the field emission current in the Fowler-Nordheim formalism / **S. O. Lebedynskyi**, O. O. Pasko, R. I. Kholodov // *Journal of nano- and electronic physics*. – 2019. – №2. – pp. 02022-1 –02022-6.
6. Lebedynskyi S. Field emission with relativistic effects in a magnetic field / **S. Lebedynskyi**, 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. Lebedynskyi S. O. Quantum-mechanical movement of the electron in electric and magnetic fields / **S. O. Lebedynskyi**, 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. Lebedynskyi S.O. Decreasing of the field emission current by the external magnetic field / **S.O. Lebedynskyi**, **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. Lebedynskyi S.O. Relativistic correction to the field electron emission current / **S. O. Lebedynskyi**// 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. Lebedynskyi S. Field electron emission in an external magnetic field parallel to the surface / **S.O. Lebedynskyi** // 8th International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs, MeVArc'2019. – Padova, Italy. September 16-19, 2019. – P. 26.

АНОТАЦІЯ

Лебединський С.О. Польова електронна емісія з врахуванням впливу зовнішнього магнітного поля та релятивістських ефектів – рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика (104 – фізика та астрономія). – Інститут прикладної фізики Національної академії наук України, Суми, 2019.

Дисертаційна робота присвячена 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 роботі доведено припущення про незалежність коефіцієнта проходження потенціального бар'єру від магнітного поля, паралельного електричному, яке використовувалось при побудові теорії польової емісії у даній конфігурації полів. Виконано релятивістське узагальнення теорії Фаулера-Нордгейма, що описує явище польової емісії електронів з металу, а також узагальнено на релятивістський випадок вираз для коефіцієнта проходження потенціального бар'єру. Виявлено ефект релятивістського стиснення ширини потенціального бар'єру на межі метал-вакуум, що призводить до збільшення величини коефіцієнта проходження потенціального бар'єру. Вперше отримано вираз для коефіцієнта проходження потенціального бар'єру електроном у присутності взаємно перпендикулярних електричного та магнітного полів. Пояснено експериментально отримане зменшення стійкості до пробіїв при наявності зовнішнього магнітного поля, паралельного поверхні електродів, у експериментах проведених в Інституті прикладної фізики НАН України та Європейській організації з ядерних досліджень (ЦЕРН).

Ключові слова: польова емісія, хвильова функція, магнітне поле, рівняння Фаулера-Нордгейма, релятивістське узагальнення.

АННОТАЦИЯ

Лебединский С.А. Автоэлектронная эмиссия с учетом влияния внешнего магнитного поля и релятивистских эффектов - рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика (104 - физика и астрономия).- Институт прикладной физики Национальной академии наук Украины, Сумы, 2019.

Диссертация посвящена теоретическому исследованию влияния внешнего магнитного поля на автоэлектронную эмиссию из металлов и учету релятивистских эффектов, которые могут проявляться при приложении высоких напряжений, а также анализа и интерпретации новых экспериментальных данных полученных в ходе исследования влияния магнитного поля на высоковакуумный пробой.

В диссертационном исследовании решена задача о квантово-механическом движении электрона во внешних электрическом и магнитном полях при произвольном угле между ними. Найден энергетический спектр электрона, движущегося в такой конфигурации полей, и объяснено физический смысл отдельных составляющих этого спектра. Доказано предположение о независимости коэффициента прохождения потенциального барьера от магнитного поля, параллельного электрическому, которое использовалось при построении теории полевой эмиссии в данной конфигурации полей на то время необоснованное ни теоретически, ни экспериментально.

Показано, что в случае достаточно сильных электрических полей и относительно больших межэлектродных расстояний движение электрона в межэлектродном вакуумном промежутке может быть релятивистским, поэтому появляется необходимость учета релятивистской поправки к существующей квантовой теории полевой эмиссии. Выполнено обобщение теории Фаулера-Нордгейма, описывающий явление полевой эмиссии электронов из металла, на релятивистский случай и найдено аналитическое выражение для плотности тока полевой эмиссии в случае малых межэлектродных расстояний и высоких полей, а также обобщено на релятивистский случай выражение для коэффициента прохождения потенциального барьера на границе металл-вакуум в общем случае.

Обнаружен эффект релятивистского сжатия ширины потенциального барьера на границе металл-вакуум, что приводит к увеличению величины коэффициента прохождения потенциального барьера. Осуществлено обобщение теории полевой эмиссии Фаулера-Нордгейма на случай присутствия внешнего магнитного поля, параллельного электрическому, когда электромагнитное поле является полем электрического типа, то есть $cB > E$.

Впервые получено общее выражение для коэффициента прохождения потенциального барьера электроном в присутствии внешнего однородного электрического поля, перпендикулярного поверхности металла, и внешнего однородного магнитного поля, параллельного поверхности металла, а также получено аналитическое выражение коэффициента прохождения в случае автоэлектронной эмиссии при лабораторных значениях напряженности электрического поля и работы выхода электрона из металла, которое справедливо и для автоэлектронной эмиссии с полярной области замагниченных нейтронных звезд.

Выполнен анализ процессов, протекающих в межэлектродном промежутке в высоком вакууме при приложении высоких значений напряженностей электрического поля и исследована возможность влияния на них магнитным полем в разрезе проблемы высоковакуумных высокоградиентных пробоев.

Объяснено экспериментально полученное уменьшения устойчивости к пробоям при наличии внешнего магнитного поля параллельного поверхности электродов в экспериментах, проведенных в Институте прикладной физики НАН Украины и Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН), и даны рекомендации по предотвращению возникновения высоковакуумных высокоградиентных пробоев путем приложения магнитного поля большего отсекающего.

Полученные в диссертации результаты кроме научного, носят и академический характер, поскольку они представляют собой прямое применение методов квантовой механики, квантовой электродинамики и математической физики. Поэтому они могут быть использованы при чтении лекций студентам старших курсов университетов і аспирантов соответствующих специальностей.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, волновая функция, магнитное поле, уравнение Фаулера-Нордгейма, релятивистское обобщение.

ABSTRACT

Lebedynskyi S.O. Field electron emission with regard for an external magnetic field and relativistic effects – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of physical and mathematical sciences by speciality 01.04.02 – theoretical physics (104 – physics and astronomy) – Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, 2019.

The thesis is devoted to a theoretical study of the influence of an external magnetic field on the field emission from metals and taking into account relativistic effects that can occur when high voltages are applied, as well as analysis and interpretation of new experimental data obtained during the study of the influence of a magnetic field on high-vacuum breakdown.

The assumption that the transmission coefficient of the potential barrier is independent of the magnetic field parallel to the electric field, which was used to construct the theory of field emission in this configuration of fields was proved in the thesis. A relativistic generalization of the Fowler-Nordheim theory describing the phenomenon of field emission from a metal was made, and an expression for the transmission coefficient of a potential barrier was generalized to the relativistic case. The Lorentz contraction of a potential barrier at the metal-vacuum interface, which leads to an increasing in the transmission coefficient has been found. An expression for the coefficient of transmission of a potential barrier by an electron in the presence of mutually perpendicular electric and magnetic fields was obtained for the first time. The experimentally obtained decrease in breakdown resistance in the presence of an external magnetic field parallel to the surface of the electrodes in the experiments conducted at the Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the European Organization for Nuclear Research (CERN) was explained.

Key words: field emission, wave function, magnetic field, Fowler-Nordheim equation, relativistic generalization.