

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
ННІ «Фізико-технічний факультет»
Кафедра фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

МАГІСТРА

на тему

укр.: «Експериментальне дослідження вторинної термостимульованої емісії
сплаву Cu-Al-Mg»

англ.: «Experimental study of secondary thermally stimulated emission
of Cu-Al-Mg alloy»

Виконав: студент 2 курсу навчання
за ОПП магістр
спеціальності 105 «Прикладна фізика та
наноматеріали»
освітня програма: «Експериментальна ядерна
фізика та фізика плазми»

Ляцов М.С.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Керівник к.ф.-м.н. Щусь О.П.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Науковий консультант к.ф.-м.н.,с.н.с.

Карпусь С.Г.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Харків – 2025 рік

АНОТАЦІЯ

На основі експериментальних даних було виконано детальний аналіз вольт-амперних характеристик (ВАХ) та енергетичних спектрів сплаву Cu-Al-Mg при опроміненні його пучком первинних електронів. За допомогою математичної обробки знайдено спектри вторинних електронів та роботу виходу електронів із мішені. Енергія первинного пучка електронів становила 600 еВ. Розглянуто поведінку енергетичного розподілу вторинних електронів із мішені в залежності від температури. Також надано аналіз роботи виходу вторинних електронів із мішені в залежності від температури.

ABSTRACT

Based on the experimental data, a detailed analysis of the current-voltage characteristics (C-V) and energy spectra of the metal when a beam of primary electrons passes through the target was performed. Using mathematical processing, this spectrum of secondary electrons and the work function of the target were found. The energy of the primary electron beam is 600 eV, which is sufficient to neglect the influence of X-ray radiation. First, the behavior of the energy distribution of secondary electrons from the target depending on the temperature was considered. The C-V characteristic was also used to analyze the role of the work function of the secondary electron from the target depending on the temperature. Among the available experimental data, one feature can be distinguished: when the sample is heated, the physical properties of the secondary electron output change.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	5
Вступ.....	6
1 Експериментальне обладнання.....	9
2 Аналіз вольт-амперних характеристик та енергетичних спектрів вторинних електронів.....	12
2.1 Апроксимація вольт-амперних характеристик.....	12
2.2 Енергетичний розподіл вторинних електронів.....	17
3. Робота виходу вторинних електронів	30
Висновки	44
Перелік використаних джерел	47

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

e – елементарний заряд електрона

k – стала Больцмана

T – температура зразка, К

$e\phi$ – робота виходу електрона (в еВ)

БЕЕ – вторинна електронна емісія

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ВСТУП

Термоелектронна емісія – це явище випромінювання електронів з поверхні металу або іншого матеріалу під дією теплової енергії. Коли речовина нагрівається до високої температури, частина електронів отримує достатньо енергії для подолання потенціального бар'єру на поверхні (роботу виходу) та залишити матеріал

Дослідження термоелектронної емісії протягом останнього сторіччя нерозривно пов'язане із розвитком промисловості (термоемісійні охолоджувачі), електротехніки (електронні лампи), для фундаментальних досліджень (прилади СВЧ, кінескопи та електронно-променеві трубки, електронні мікроскопи, прискорювачі заряджених частинок тощо).

Вторинна електронна емісія – явище вибивання електронів із твердого тіла пучками швидких заряджених частинок. При дослідженні вторинної електронної емісії важливою характеристикою процесу є не тільки коефіцієнт вторинної емісії, а також енергетичні спектри вторинних електронів та значення їх роботи виходу з урахуванням властивостей матеріалу (хімічний склад, аморфний чи монокристалічний, наявність окисного прошарку, тощо). Знання емісійних властивостей матеріалів дозволяє оптимізувати режими вторинної емісії електронів, що використовуються в якості термокатодів та передбачити їх параметри експлуатації, що важливо при розробці та побудові електротехнічних вакуумних приладів, ефективної роботи прискорювачів заряджених частинок, прогнозування стабільної роботи мікро- та наноелектронних компонентів при умовах радіаційного та теплового навантаження, тощо.

І тому дослідження як термоелектронної емісії різноманітних матеріалів, так і їх вторинної електронної емісії продовжують бути актуальними і в теперішній час.

Метою дипломної роботи є дослідження спектрів вторинних електронів сплаву Cu-Al-Mg (Cu-93%, Al-6%, Mg-1%) в залежності від температури при енергії первинного пучка електронів 600 eV та оцінка роботи виходу ($e\phi$) в залежності від температури.

Cu-Al-Mg (мідь-алюміній-магній) – трикомпонентний сплав, що поєднує високу електропровідність міді, схильність алюмінію до оксидоутворення та зміцнюючу дію магнію. Його особливості:

- утворення інтерметалідних фаз (наприклад Cu_9Al_4 , Mg_2Cu), що впливають на термічну стабільність та морфологію поверхні;

- окислення: алюміній дає стабільну плівку Al_2O_3 із високою ϕ ; мідь утворює Cu_2O та CuO , менш стабільні, але з нижчою ϕ ;

- температурна еволюція: при нагріванні можлива реорганізація фаз, оксидів та зміна емісійних властивостей.

Сплав Cu-Al-Mg широко застосовується в різних галузях завдяки поєднанню високої міцності, термостійкості та корозійної стійкості. Ось основні сфери його застосування:

- авіакосмічна промисловість: сплави на основі Cu-Al-Mg, особливо серії 2xxx (наприклад, 2024, 2219, 2618), використовуються в конструкціях фюзеляжів, обшивці, деталях двигунів та паливних баках; вони забезпечують високу питому міцність та хорошу термостійкість; наприклад, сплав 2195 застосовувався в паливних баках космічного шатла та ракетах Falcon 9;

- автомобільна промисловість: завдяки високій міцності та гарній оброблюваності, сплави Cu-Al-Mg знаходять застосування у виробництві компонентів двигунів, таких як поршні та циліндри, а також у деталях підвіски та кузова; їхня здатність витримувати високі температури робить їх ідеальними для цих цілей.

- машинобудування: сплави Cu-Al-Mg використовуються у виробництві підшипників, втулок, зубчастих коліс та інших деталей, що працюють при

високих навантаженнях та температурах; їх висока зносостійкість та міцність забезпечують тривалий термін служби цих компонентів;

- енергетика та електротехніка: завдяки хорошій електропровідності та термостійкості, сплави Cu-Al-Mg застосовуються у виробництві струмопровідних вузлів, контактів та інших компонентів, де потрібне поєднання цих властивостей;

- наукові дослідження: у наукових установках та дослідженнях сплави Cu-Al-Mg використовуються для вивчення термоелектронної емісії, фазових перетворень та інших фізичних властивостей; їх здатність змінювати структуру за різних температур робить їх цінними об'єктами для фундаментальних досліджень.

Завданням цієї роботи є аналіз експериментальних вольт-амперних характеристик (ВАХ) виходу вторинних електронів зі зразків Cu-Al-Mg, побудова енергетичних спектрів електронів з урахуванням особливостей ВАХ, дослідити вплив температури на зміну роботи виходу.

Об'єкт дослідження: явище термоелектронної емісії, вторинної електронної емісії, робота виходу.

Предмет дослідження: вольт-амперні характеристики виходу вторинних електронів з зразків Cu-Al-Mg при одночасному опроміненні пучком електронів з енергією 600 eV та нагріванні в діапазоні температур 293 К...673 К.

Дана робота складається зі вступу, трьох розділів, висновку та переліку використаної літератури

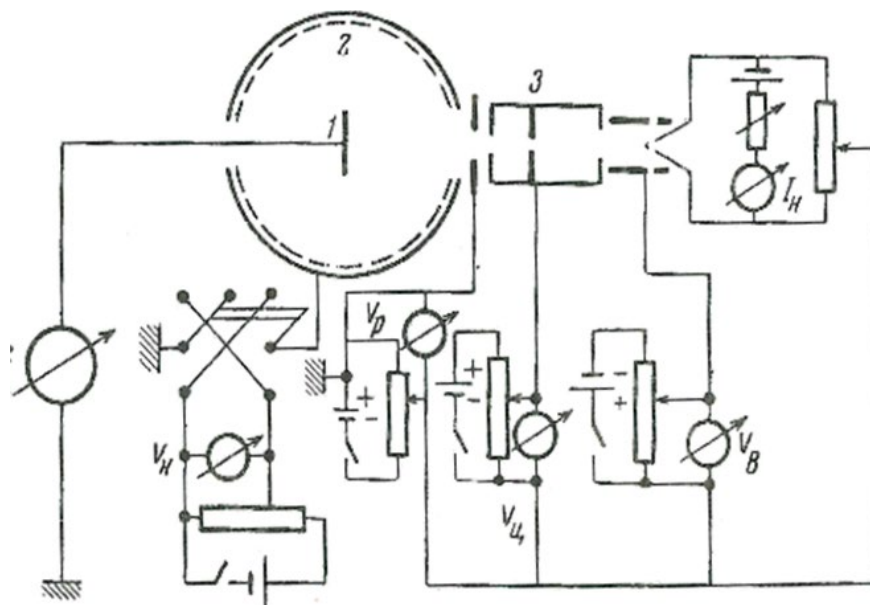
1 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ

Експериментальні дані, що аналізувалися в дипломній роботі, взяті з робіт [1,2].

В роботі [1] представлені дослідження режимів активування сплавних емітерів Cu-Al-Mg та Cu-Al-Be. Отримані вольт-амперні характеристики електронів вторинної емісії та температурні залежності коефіцієнтів ВЕЕ.

Принципова схема обладнання, яке використовувалося для вимірювання виходів електронів вторинної емісії від енергії первинного пучка електронів та термоемісії представлена на рис. 1.1. Експериментальні дані отримані за допомогою електростатичного сферичного аналізатора в режимі сканування по енергії вторинних електронів (потенціали гальмування та прискорення вторинного потоку). В якості колектора використовувалися шар аквадагу й антидинаatronної молібденової сітки, які нанесені на внутрішню поверхню сферичного аналізатора. Аналізуюче поле прикладалося між сіткою та мішенню. Струми вимірювалися гальванометром типу М-91 (чутливість $0,8 \cdot 10^{-8}$ А/под.) Сама мішень є електрично нейтральною. Первинний струм вимірювався при подачі на сітку -100 В відносно мішені. Прикладаючи +100 В на сітку, вимірювали різницю струмів $I_1 - I_2$ (або вторинний струм I_2).

Максимальна величина вторинного струму була порядку $(2-4) \cdot 10^{-7}$ А. Між антидинаatronною сіткою і шаром аквадага прикладалася напруга 60 В для затримки третинних електронів (третинні електрони або Оже-електрони як правило утворюються при енергії, не більшої, ніж 50 еВ). Електронна пушка мала звичайну чотирьохелектродну конструкцію, яка дозволяє отримувати гарно сфокусований пучок електронів за енергії (60-1750) еВ. Для дослідження ділянки кривої в діапазоні 10-150 В, застосовувалася пушка спеціальної конструкції, типу Майерса.



1 – мішень, 2 – колектор, 3 – електронна пушка, G – гальванометр для вимірювання первинного струму та їх різниці, V_K , V_P , V_C та V_B – вольтметри, що вимірюють відповідно напругу на колекторі, швидкість первинних електронів, напругу на прискорювальному та фокусуємучому циліндрах; I_H – струм розжарювання

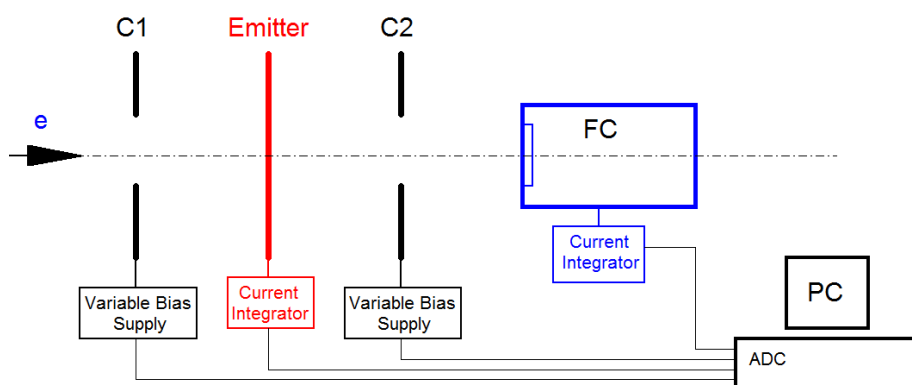
Рисунок 1.1 – Експериментальне обладнання для вимірювання виходів вторинної емісії

При вимірюваннях тиск в камері був порядку 10^{-5} - 10^{-4} Па (для цього використовувався масляний дифузійний насос і дві пастки із рідким азотом). Вимірювання тиску та температури проводилося за допомогою термопарного і іонізаційного манометрів. Температура мішені контролювалася за допомогою вольфрам-нікелевої термопари.

Енергія первинного пучка електронів, сформованого електронною гарматою дорівнювала 600 еВ для того, щоб запобігти появі рентгенівського випромінювання, що виникає при енергіях більше, ніж 2 кеВ.

В роботі [2] виконані дослідження вторинної емісії електронів з тонких алюмінієвих мішеней при використанні пучка прискорених електронів на

лінійному прискорювачі ІФВЕЯФ ННЦ ХФТІ ЛПЕ-30. Схема експерименту приведена на рис. 1.2.



FC - циліндр Фарадея; Emitter – мішень, PC – персональний комп'ютер, ADC – аналогово-цифровий перетворювач, C1 і C2 – змінні зміщення живлення з передньої та задньої поверхонь відповідно

Рисунок 1.2 – Загальна схема експерименту із роботи [2]

В цій роботі отримані експериментальні дані по виходах вторинної емісії електронів з тонких мішеней алюмінію товщиною 8 і 50 мкм для енергії первинного пучка електронів 16 і 25 МеВ. Струм первинного пучка електронів в експериментах вимірювався за допомогою циліндра Фарадея і не перевищував 2 мкА. Діаметр електронного пучка був порядку 7 мм.

2 АНАЛІЗ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ СПЕКТРІВ ВТОРИННИХ ЕЛЕКТРОНІВ

2.1 Апроксимація вольт-амперних характеристик

В роботі [1] було приділено увагу кількісним параметрам вторинної емісії – пошуку оптимальних режимів генерації вторинних електронів сплаву Cu-Al-Mg як матеріалу катодів. Отримані ВАХ нами були використані для дослідження еволюції спектрів вторинних електронів в залежності від нагріву зразка.

На рис. 2.1-2.4 представлено серію вольт-амперних характеристик (ВАХ) отриманих для сплаву Cu-Al-Mg відповідно до значень температури зразка: 293, 523, 623, 673 К. Всі точки ретельно відцифровані та виведені до більш точних показників. Характерним для даного типу ВАХ є те, що в області затримуючих потенціалів (-50 В), струм вторинної емісії дорівнює нулю. В області додатніх значень потенціалів (від 0...100 В) вихід на насичення струму, також має місце, незважаючи на зміну поведінки ВАХ в залежності від температури зразка. На усіх цих рисунках (■) – експериментальні дані, суцільна пряма – апроксимація за формулою подвійної функції Больцмана [3]:

$$SEYield, \% = \left[\frac{p}{1+10^{(LOGU_{max1}-U)h_1}} + \frac{1-p}{1+10^{(LOGU_{max2}-U)h_2}} \right], \quad (1)$$

де $SEYield, \% = \frac{I-I_0}{I_H-I_0}$ – відсоткове значення виходу вторинної емісії в залежності від емісійного струму;

I_0 – значення струму, що відповідає повному затриманню емісійних електронів з поверхні в області затримуючих потенціалів;

I_H – значення струму, що відповідає струму насичення в області потенціалів витягування;

p – коефіцієнт пропорційності розподілів вторинних електронів;

U – потенціал колектора;

U_{max1} – потенціал, при якому фіксується найбільш інтенсивний вихід вторинних електронів із першого розподілу;

$U_{\max 2}$ – потенціал найбільш інтенсивного виходу вторинних електронів з другого розподілу;

h_1, h_2 – повна ширина видимості спектру для першого та другого розподілів;

$I_H - I_0$ – загальна емісійна характеристика досліджуваного зразка;

$\frac{p}{1+10^{(\text{LOG } U_{\max 1} - U)h_1}}$ – параметр розподілу;

Ця функція є коректною, оскільки під час прострілу пучками вторинних електронів спостерігаються два перехідні процеси протікання вторинної емісії в різних енергетичних областях вимірювання емісійного струму.

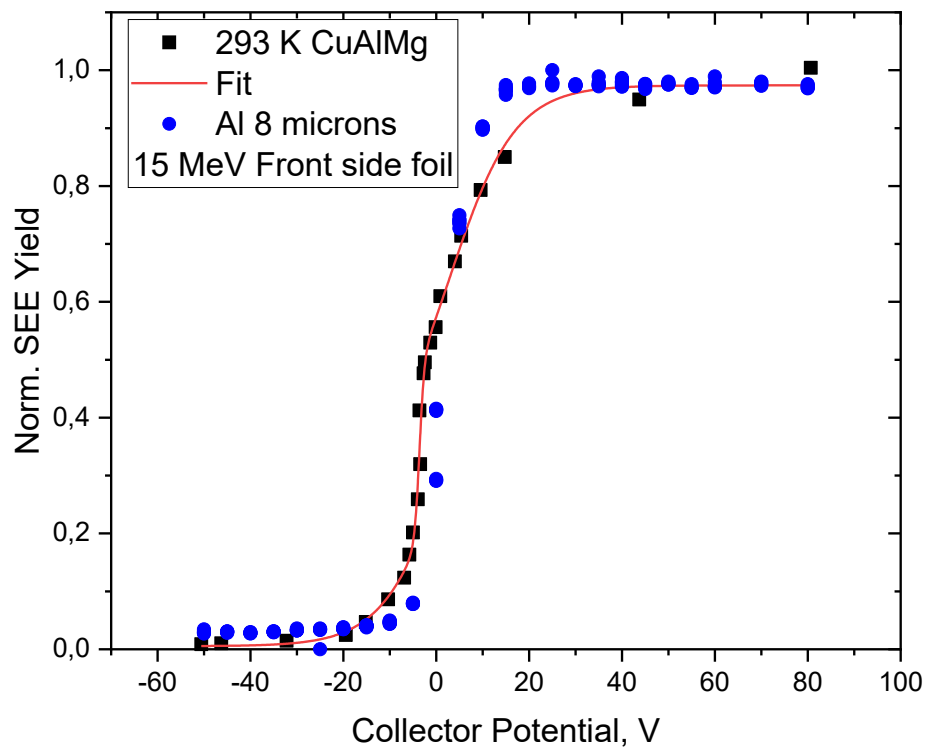


Рисунок 2.1 – Вольт-амперна характеристика емісійного струму вторинних електронів при температурі 293 К для сплаву Cu-Al-Mg

На рис. 2.1 додатково приведені нормовані дані зі статті [2], отримані в ННЦ ХФТІ на лінійному прискорювачі електронів ЛПЕ-30 з енергією 15 MeV

при проходженні пучка електронів крізь тонку плівку алюмінію, товщиною 8 мкм. Подібність ходу ВАХ двох експериментальних даних спонукає більш детально дослідити процеси, що відбуваються при збудженні зразків як первинним пучком електронів широкого діапазону енергій, так і термостимуляції вторинної емісії електронів. Це, можливо, свідчить про близьку природу виходу вторинних електронів в цих процесах.

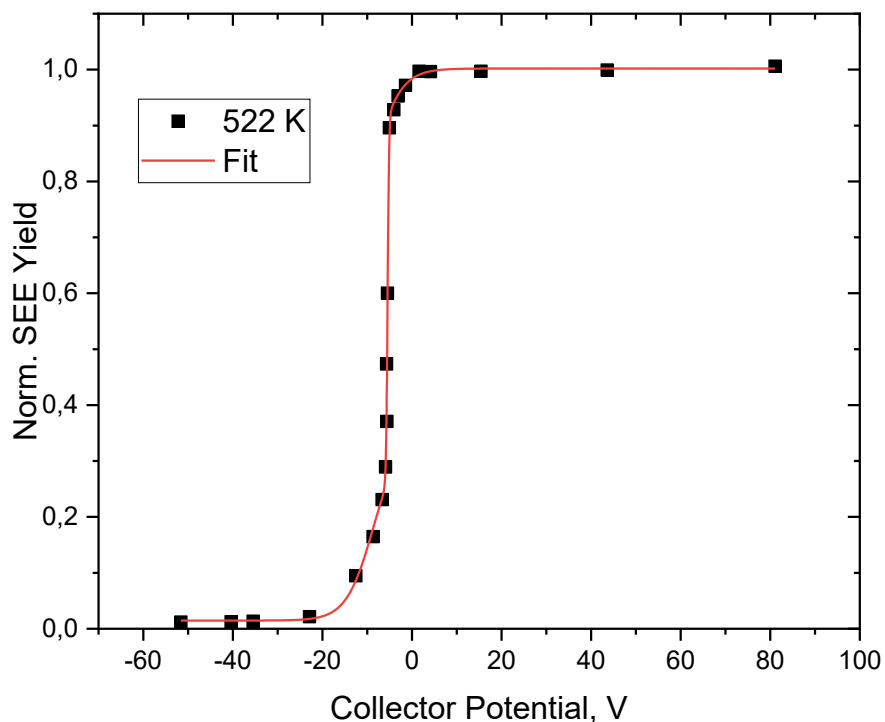


Рисунок 2.2 – Вольт-амперна характеристика емісійного струму вторинних електронів при температурі 523 К для сплаву Cu-Al-Mg

При зростанні температури до 523 К спостерігається зростання значення струму в області затримки (U_k від -50 до 0 В) (представлено на рис. 2.2), що має початок від -25 В. Стрімкий ріст струму видно при подачі на колектор потенціалу до -5 В, далі йде спад приросту струму до потенціалу витягування. Вихід на насичення відбувається при подачі потенціалу більше, ніж 5 В.

Порівняно із ВАХ сплаву при температурі 293 К, наявний більш стрімкий приріст струму при меншому діапазоні потенціалів, що подаються на колектор.

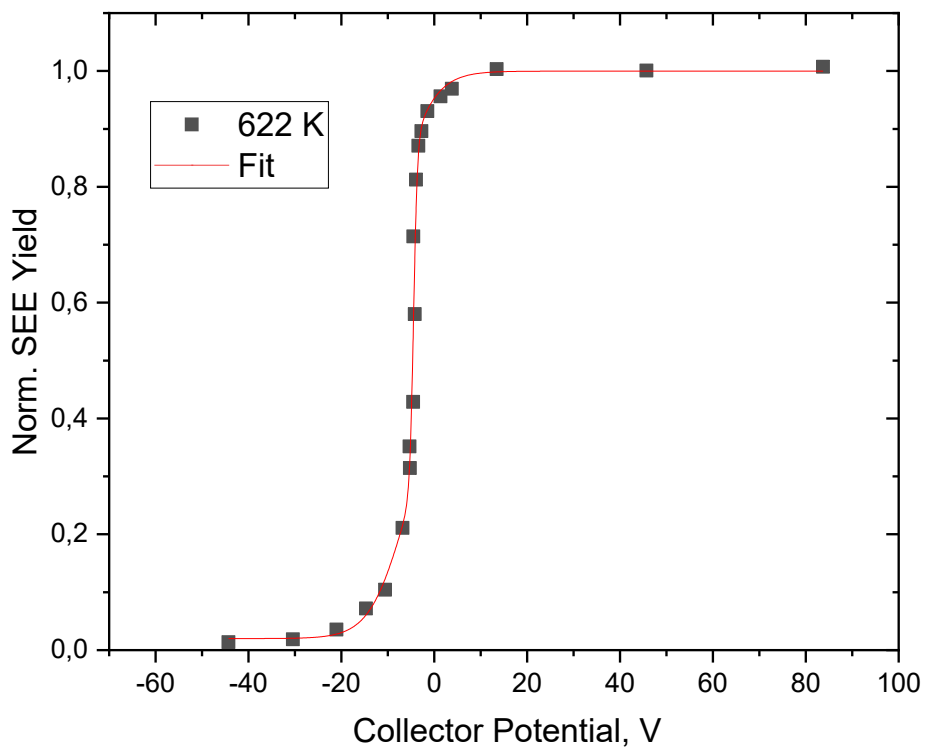


Рисунок 2.3 – Вольт-амперна характеристика емісійного струму вторинних електронів при температурі 623 К для сплаву Cu-Al-Mg

Тенденція поведінки ВАХ на рис. 2.3 зберігається у порівнянні із рис. 2.2, але наявний вихід на насичення відбувається вже при подачі на колектор потенціалу +3 В.

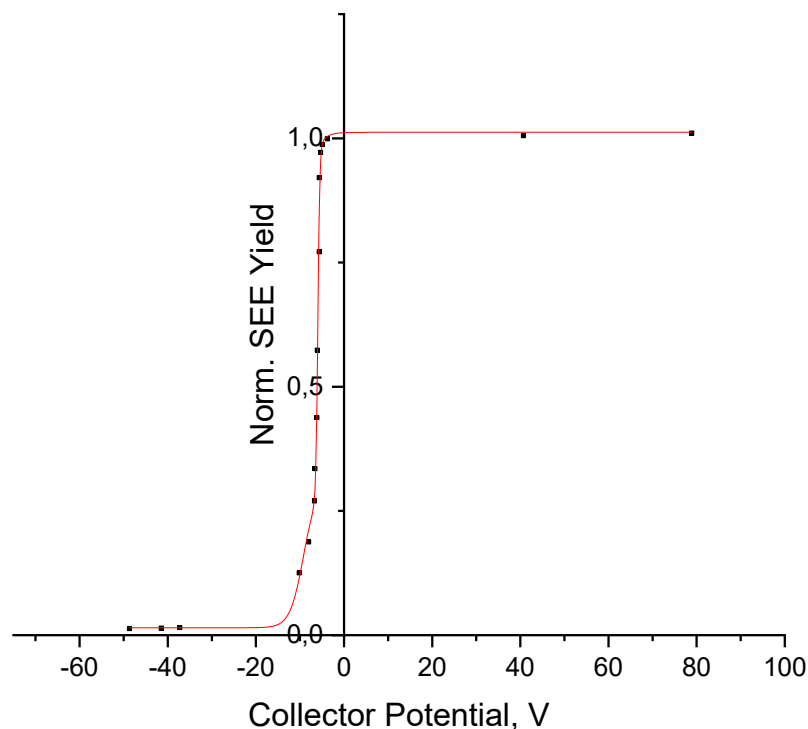


Рисунок 2.4. – Вольт-амперна характеристика емісійного струму вторинних електронів при температурі 673 К для сплаву Cu-Al-Mg

На рис. 2.4 зображена ВАХ сплаву при температурі 673 К. Струм, що виходить на насичення, знаходиться в області затримуючих потенціалів. Як наслідок є межа, при якій електрони виходять на насичення. Ця межа становить (-15...0 В), що не спостерігалось при температурах 293 К, 523 К і 623 К

З вищенаведених даних, видно, що при зростанні температури вихід на насичення відбувається зі зменшенням потенціалу витягування колектора. Як наслідок, при температурі 673 К насичення відбувається при від'ємному потенціалі колектору, що свідчить про те, що енергія вторинних електронів значно вища роботи виходу й біля поверхні не утворюється просторовий об'ємний заряд.

2.2 Енергетичний розподіл вторинних електронів

При диференціюванні ВАХ (див. рис. 2.6-2.9), отримано розподіл вторинних електронів для всього діапазону напруги на колекторі від -50 до +100 В. В розподілах присутні два максимуми, положення та інтенсивність яких залежить від температури зразка Cu-Al-Mg (в нашому випадку, для $T = 293 \text{ K}, 523 \text{ K}, 623 \text{ K}, 673 \text{ K}$). Область затримуючих потенціалів (U_k від -50 до 0 В) дає можливість оцінити енергетичні характеристики вторинних емісійних електронів (положення максимуму виходу вторинних електронів, їх кількість та максимальну енергію), що мають достатню енергію для подолання роботи виходу, подвійного шару та сили дзеркального зображення. Область витягування ($U_k = 0 \dots +100 \text{ В}$) – оцінити кількість електронів, що знаходяться в подвійному шарі (об’ємний заряд та поверхні).

На рис. 2.6-2.9 спостерігаються два процеси протікання вторинної емісії, кожен із яких залежить від температури. Синя лінія характеризує повний енергетичний розподіл електронів, червоний – енергетичний спектр за першим розподілом, зелений – енергетичний спектр за другим розподілом.

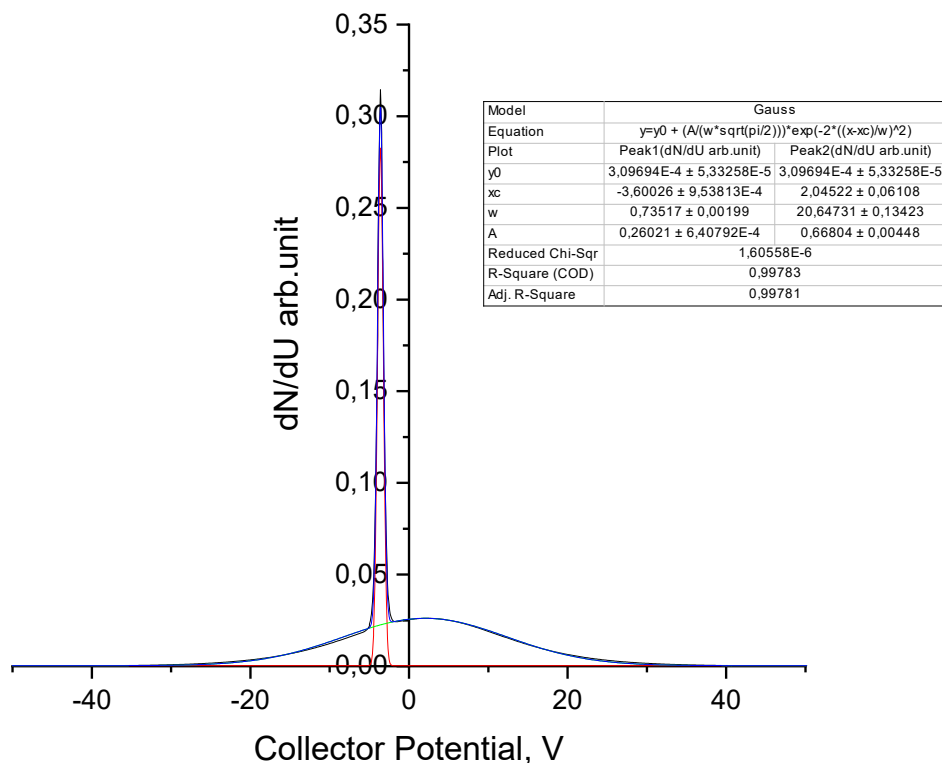


Рисунок 2.6 – Енергетичний розподіл вторинних електронів при температурі 293 К від потенціалу колектора

При температурі 293 К (рис. 2.6) видно два максимуми, що відповідають найбільш ймовірній енергії відповідних розподілів. Максимум першого розподілу знаходиться в області затримки, натомість другий розподіл має найбільшу інтенсивність в області витягування за рахунок емісії, що суттєво впливає на розподіл вторинних електронів.

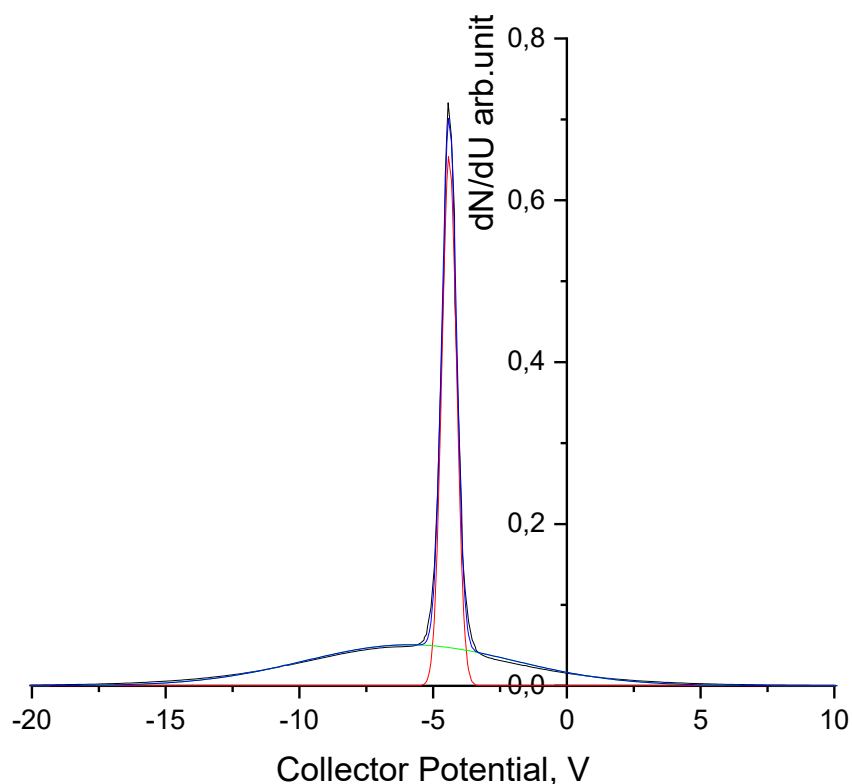


Рисунок 2.7 – Енергетичний розподіл вторинних електронів при температурі 523 К від потенціалу колектора

При переході від температури 293 К до температури 523 К (рис. 2.7), максимум другого розподілу перейшов із області витягування в область затримки за рахунок нагріву зразка. Як наслідок, вторинна емісія згасає, натомість посилюється окислення сплаву.

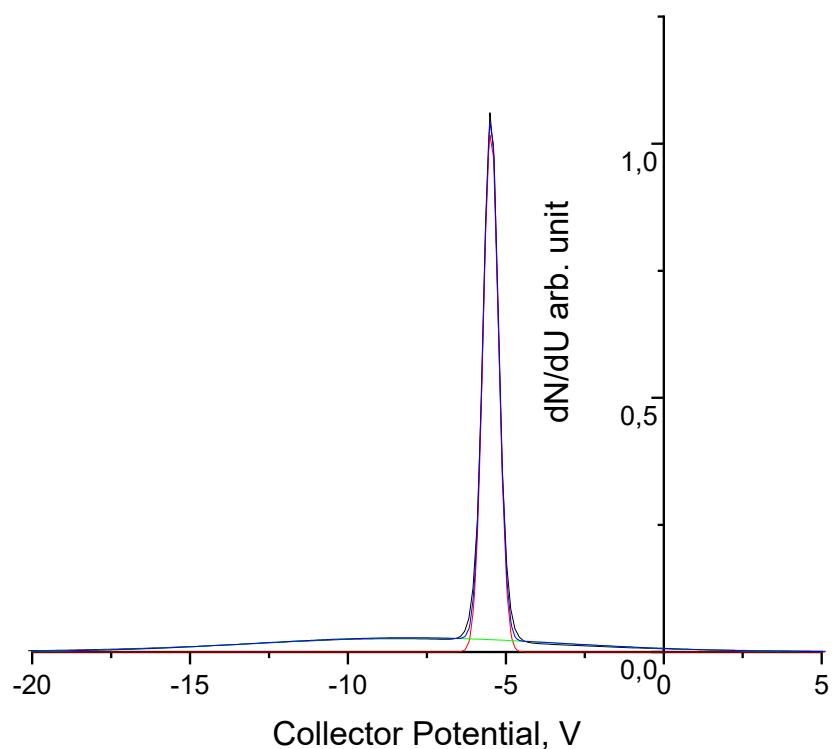


Рисунок 2.8 – Енергетичний розподіл вторинних електронів при температурі 623 К від потенціалу колектора

При температурі 623 К (рис. 2.8) тенденція, порівняно із розподілами по температурам 293 К і 523 К не змінюється. Вторинна емісія мала, порівняно із емісією оксидів, який спостерігається через посилення товщини окисного прошарку. Також спостерігається вклад оксиду алюмінію, під час активування зразка при високих температурах.

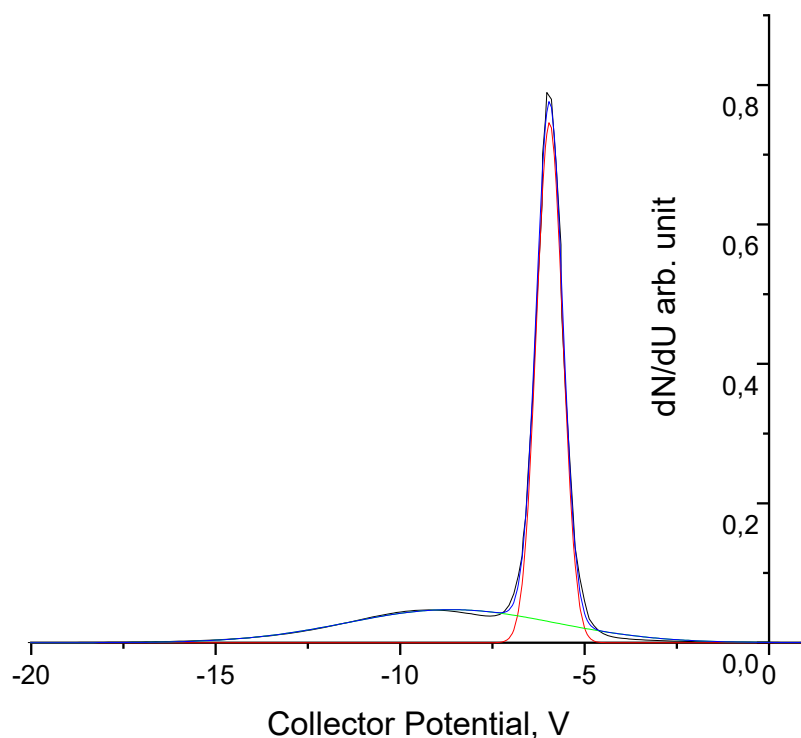


Рисунок 2.9 – Енергетичний розподіл вторинних електронів при температурі 673 К від потенціалу колектора

З даних, що наявні на рис. 2.9, всі вторинні електрони знаходяться в області затримки. В емісійному спектрі за енергії 2 еВ вторинні електрони повністю покидають емісійну поверхню, що є результатом термостимуляції, внаслідок поверхневої дифузії Cu із Al і Mg.

Була проведена оцінка площ обох розподілів. Видно спектр, що зосереджений біля енергії найбільш інтенсивного виходу вторинних електронів при опроміненні пучком, й широкий спектр, що характеризує видимість спектру, наявному в подвійному шарі. Лівий кінець спектру дає характеристику початку виходу вторинних електронів із мішені, так як правий кінець дає кінцеву поведінку виходу вторинних електронів. Для повної характеристики розподілу треба прикладати потенціали обох знаків:

негативного й позитивного потенціалів на колектор, для того, щоб побачити загальну кількість вторинних електронів, що вилітають із подвійного шару колектора. Методом інтегрування енергетичних спектрів надається оцінка ступеню окиснення даного зразка.

Як результат, підвищення температури досліджуваного зразка впливає на спектр електронів в області потенціалів затримання та суттєво змінює розподіл в області потенціалів витягування, що свідчить про наявну залежність виходу на насичення вторинних витягнутих електронів від температури зразка сплаву.

Таким чином, аналіз енергетичних спектрів, наявних на рис. 2.6.-2.9. показує, що є частка електронів, яка знаходиться в розподілі з найбільшою інтенсивністю, й найменш інтенсивний розподіл, що дає загальний діапазон енергій, при якій вторинні електрони вільно виходять зі сплаву. Незважаючи на розділення площі другого розподілу на дві енергетичні області, весь спектр описується суперпозицією двох гаусіанів.

При аналізі енергетичних спектрів електронів, що отримані з ВАХ знайдено значення положення максимумів розподілу, що відповідає найбільшій інтенсивності виходу вторинних електронів в певному розподілі, діапазон видимості спектру певного енергетичного розподілу і кількісна частина електронів, що знаходиться в певному енергетичному розподілі разом та окремо для електронів вторинної емісії та електронів, що знаходяться в області затримки. Дані представлені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1. Повна площа розподілу вторинних електронів області негативного та позитивного потенціалів, площа другого розподілу в області затримки в залежності від температури

Температура зразка, К	Area ($V_k < 0$), arb.unit	Area ($V_k > 0$), arb.unit	Area2 ($V_k < 0$), arb.unit
293	0,56	0,44	0,3
523	0,93	0,07	0,47
623	0,97	0,03	0,33
673	1	0	0,33

Таблиця 2. Енергетичний максимум, площа піку та ширина напіввисоти вторинних електронів для обох розподілів в залежності від температури

Температура зразка, К	E_{max1} , eВ	Area 1, arb. Units	HWHM ₁ , eВ	E_{max2} , eВ	Area 2, arb. Units	HWHM ₂ , eВ
293	-3,6	0,26	0,74	2,05	0,67	20,65
523	-4,4	0,45	0,55	-5,88	0,5	7,87
623	-5,48	0,63	0,49	-8,08	0,34	9,72
673	-5,95	0,66	0,71	-8,62	0,33	5,62

В таблиці 2 $E_{max1} = eU_{max1}$ – енергія фіксації найбільшої інтенсивності виходу вторинних електронів із першого розподілу, $E_{max2} = eU_{max2}$ – енергія фіксації найбільшої інтенсивності виходу вторинних електронів із другого розподілу, HWHM₁ (скор. від half width at half maximum — ширина напіввисоти) – діапазон енергій, при якому видно спектр першого розподілу (в eВ), відповідно HWHM₂ – діапазон енергій другого розподілу (в eВ), Area 1 – повна кількісна частина вторинних електронів першого розподілу, Area 2 позначає повну кількісну частину вторинних електронів другого розподілу.

В якості прикладу візьмемо рис. 2.6. Інформацію про енергетичний спектр беремо з обох колонок. Ліва колонка дає нам інформацію про перший розподіл, відповідно справа – про другий. Енергія найбільш інтенсивного виходу вторинних електронів зі зразка певного енергетичного розподілу позначено як x_c , A – загальна кількісна частина вторинних електронів, що знаходиться в конкретному розподіл, відповідно w – діапазон енергій виходу вторинних електронів з певного матеріалу. Завдяки цим трьом параметрам по кожній температурі була подана інформація, згідно якої була заповнена таблиця.

Таким чином, при аналізі зведених табличних даних по розподілам вторинних електронів слідує наступне: в залежності від температури змінюється енергія найбільш інтенсивного виходу вторинних електронів в конкретному розподілі, діапазон енергій видимості спектру певного розподілу кількісна частина електронів певного розподілу, кількісна частина електронів вторинної емісії, загальна кількість електронів, що випромінюються за рахунок окису металу та кількість таких самих електронів другого розподілу (рис. 2.10-2.12).

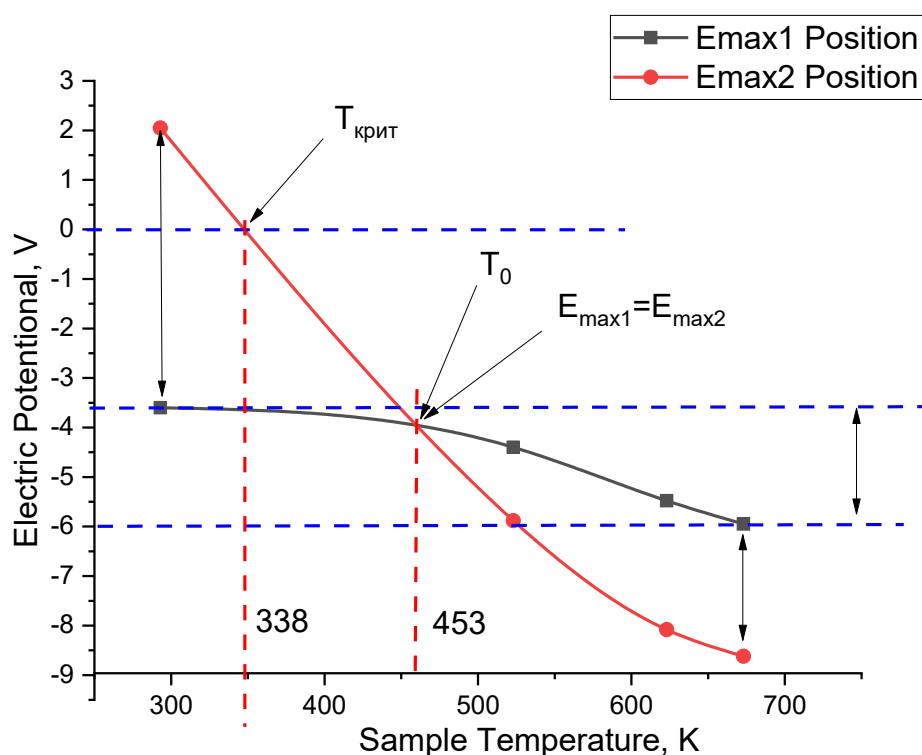


Рисунок 2.10 – Залежність положення максимумів вторинних електронів від температури

З аналізу графіка, що представлений на рис. 2.10, бачимо, що залежність від температури експоненційна, оскільки при нагріванні зразка збільшується енергія найбільш інтенсивного пучка вторинних електронів з першого розподілу й відповідно зменшується енергія найбільш інтенсивного пучка вторинних електронів з другого розподілу для емісії електронів із поверхнею. Для другої кривої розподілу електронів із збільшенням температури максимум зміщується з області позитивних потенціалів в область негативних потенціалів.

Як результат нульовий потенціал для найбільш інтенсивного пучка вторинних електронів, що знаходиться в другому енергетичному розподілі, досягається при температурі $T = 338,53$ К [4]. При вказаній температурі найбільш інтенсивний пучок електронів вторинної емісії зникає. Подання

одного виміру для потенціалу затримки (перетин положень максимумів знаходиться саме в області затримки) відбувається при $T_{01} \approx 453,41$ К. При зазначеній температурі енергія найбільш інтенсивного виходу вторинних електронів дорівнює:

$$E_{max1} = E_{max2} \approx -4.09 \text{ eV}$$

В цьому випадку спектр стає близьким до моноенергетичного спектру, оскільки перший та другий розподіли мають спільну точку найбільш інтенсивного виходу вторинних електронів.

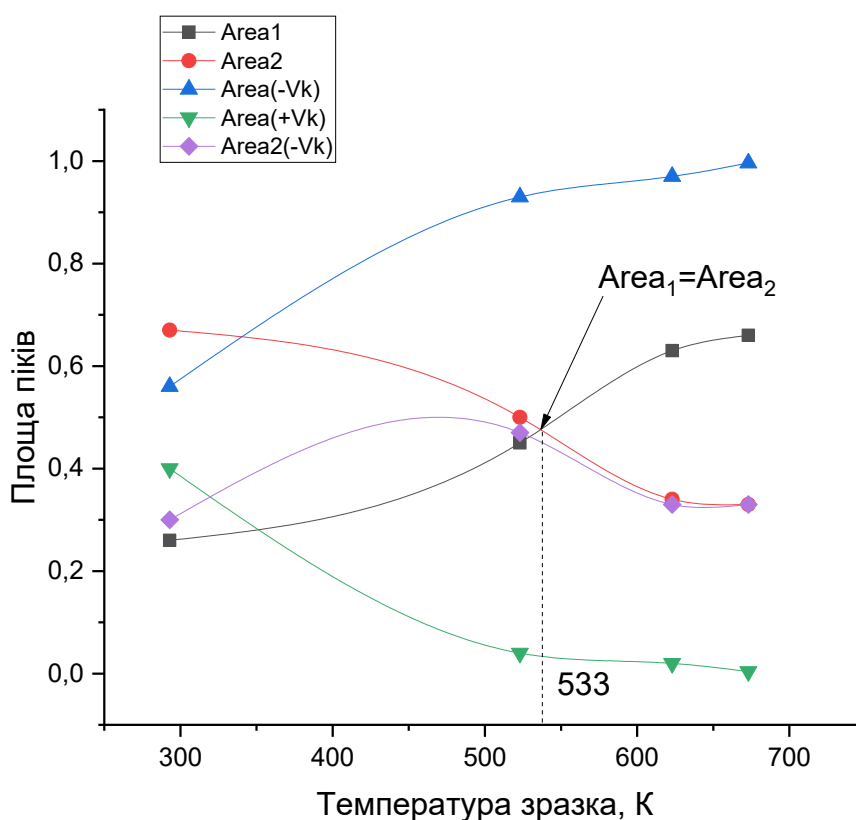


Рисунок 2.11 – Залежність площі розподілів вторинних електронів від температури.

Із табличних даних 1 та 2, що були представлені на рис. 2.11, слідує наступне: при підвищенні температури потрібно затримувати більше електронів. Згідно представлених результатів видно, що при температурі $T_{02} =$

533,18 К площі двох розподілів вирівнюються, що свідчить про рівність між кількісним вильотом вторинних електронів як з першого енергетичного розподілу, так із другого. Частка низькоенергетичних електронів другого розподілу при температурі 293 К на поверхні становить приблизно 50% від усієї кількості вторинних електронів, що знаходяться на поверхні. При підвищенні температури електрони переходять із другого розподілу в перший розподіл, а також перехід низькоенергетичних електронів з другого розподілу переходять в область високих енергій. Отже, при нагріві зразка йде кількісний перехід вторинних електронів із першого енергетичного розподілу до другого. Також важливо відмітити, що вклад електронів вторинної емісії в спектральний розподіл при зростанні температури зменшується.

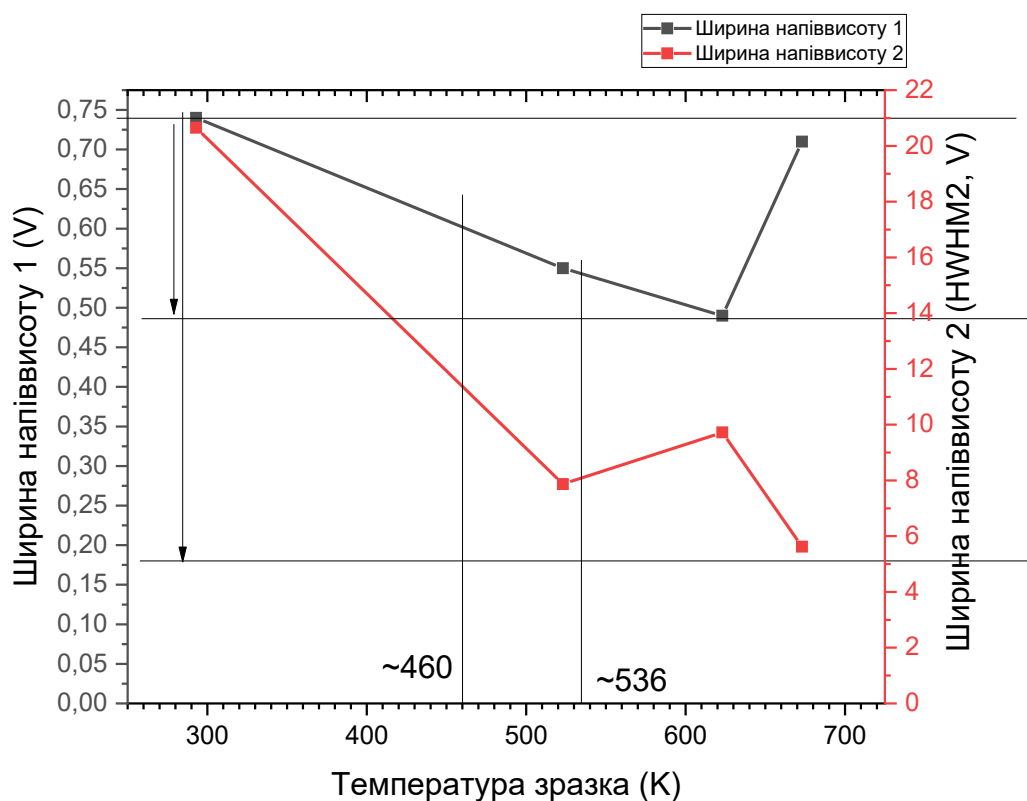


Рисунок 2.12. – Залежність ширини напіввисоту обох розподілів вторинних електронів від температури

Діапазон зміни енергії в спектрі між обома розподілами різняться. Для першого розподілу цей діапазон становить 0,25 В (рис. 2.12). Більш широкий діапазон має для другого піку, оскільки поверхнева емісія має більший вплив на діапазон енергій. Згідно наявних даних, спостерігаються два перехідні процеси протікання вторинної емісії. Спершу йде збудження енергетичним пучком електронів, потім – термостимуляційний перехід, оскільки вторинних електронів поверхневої емісії стає менше (див. рис. 2.11).

Аналіз графічних даних, які представлені на рис. 2.12, показує тенденцію енергетичного розкиду вторинних електронів. Для першого енергетичного спектру діапазон видимості спочатку має поступове звуження енергетичного спектру, при перехідному процесі збудження енергетичним пучком – різке звуження. В діапазоні температур T_{02} і 673 К відбувається розширення енергетичного спектру, внаслідок термалізації.

Для ширини на половині висоти другого розподілу поведінка енергетичного розкиду відрізняється від попереднього. Перший діапазон (від температури 293 К до T_{01}) йде різке звуження широкого діапазону енергій, під час другого температурного діапазону ($T_{01} \dots T_{02}$) відбувається розширення енергетичного спектру, внаслідок падіння інтенсивності електронного сигналу. В третьому температурному діапазоні (від T_1 до температури 673 К) спостерігається звуження енергетичного спектру, внаслідок деградації енергетичних спектрів другого розподілу.

Отже, для ширини напіввисоти обох розподілів вторинних електронів спостерігається дві різні поведінки. Для першого енергетичного розподілу в діапазоні температур 293 К, 523 К і 623 К електрони упорядковуються, при переході до температури 673 К через дифузію із двома хімічними елементами діапазон енергетичного розкиду розширюється. Натомість другий діапазон енергетичного спектру показує деградацію вторинної емісії в залежності від температури.

Таким чином, в результаті обробки раніше отриманих експериментальних даних вдалося дослідити динаміку енергетичних спектрів термостимульованої емісії в залежності від температури.

Аналіз даних з отриманих спектрів показав, що в діапазоні температур 293...673 К при опроміненні зразка Cu-Al-Mg електронами в енергетичних спектрах присутні по два максимуми $E_{\max 1}$ та $E_{\max 2}$, інтенсивність яких і положення по енергії змінюється від температури.

З таблиці зведених даних по розподілах слідує, що при температурі 338,5 К поверхня зразка не потребує додаткового потенціалу витягування найбільш інтенсивного пучка вторинних електронів з другого енергетичного розподілу. При температурі 673 К всі вторинні електрони виходять з поверхні мішені, тому при енергії менше 2 еВ електронів вторинної емісії не існує, що є результатом дій термостимуляції.

3. РОБОТА ВИХОДУ ВТОРИННИХ ЕЛЕКТРОНІВ

Представлено результати аналізу роботи виходу вторинних електронів зі сплаву Cu (93%)-Al (6%)-Mg (1%) на основі вольт-амперних характеристик [1]. Запропонована в ній методика визначення виходів вторинної емісії дозволяє досліджувати їх залежності від температури нагріву зразків та впливу опромінення пучком електронів з енергією до 600 eV. Використання електростатичного аналізатора сферичного типу дало змогу отримати та дослідити ВАХ, які складаються з двох ділянок: затримуючого потенціалу (-50...0) В та потенціалу витягування (0...100) В. Експериментально отримані ВАХ при температурах 293 К (рис. 3.1, 3.5.), 523 К (рис. 3.2., 3.6), 623 К (рис. 3.3, 3.7) та 673 К (рис. 3.4, 3.8) при попередній обробці [4] представлено у вигляді залежності $\ln(I)$ від $U^{0.5}$ (рис. 3.1-3.8, де I – емісійний струм, U – потенціал колектора), з якої графічним способом знайдено значення напруги, що відповідає лінійним ділянкам залежності $\ln(I)$ від $U^{0.5}$.

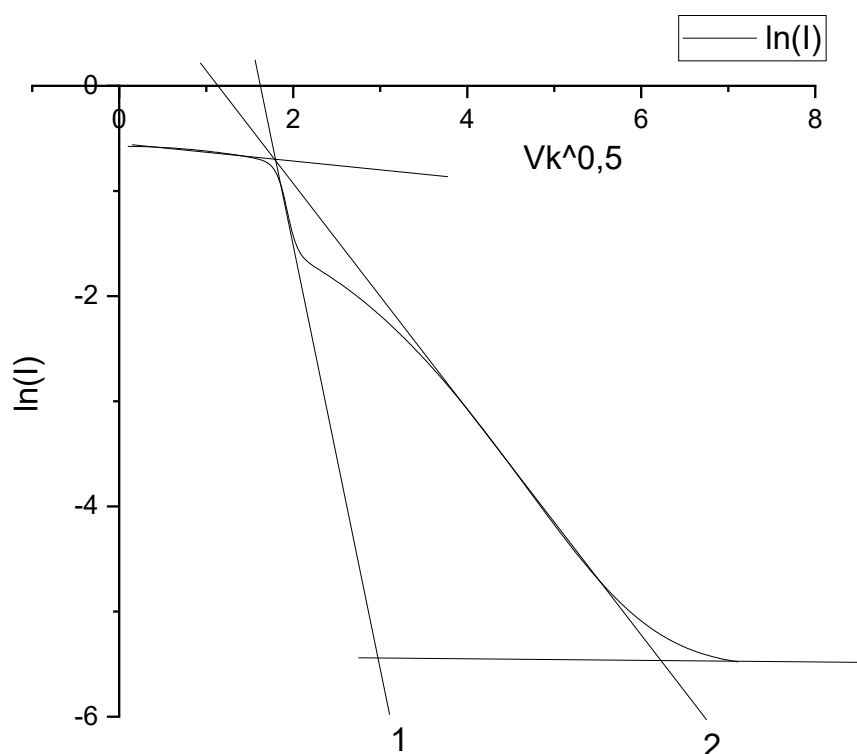


Рисунок 3.1 – Залежність логарифму емісійного струму при температурі 293 К від напруги в області затримки

На рис. 3.1-3.4 представлені 2 лінійні ділянки залежностей ВАХ, кожен із яких відповідає за певну хімічну сполуку, що міститься в сплаві. Із отриманих результатів є наступне: найдовша лінійна ділянка відповідає оксиду міді (частка хімічного елементу Cu в сплаві становить 93%), а інша лінійна ділянка – оксиду алюмінію (частка Al – 6%).

Для високоенергетичного емісійного струму електронів характерний ріст струму, подібний до ВАХ. На рис. 3.1 ріст струму незначний, що свідчить про те, що потрібно прикладати менше енергії для виходу вторинного електрона з поверхні мішені.

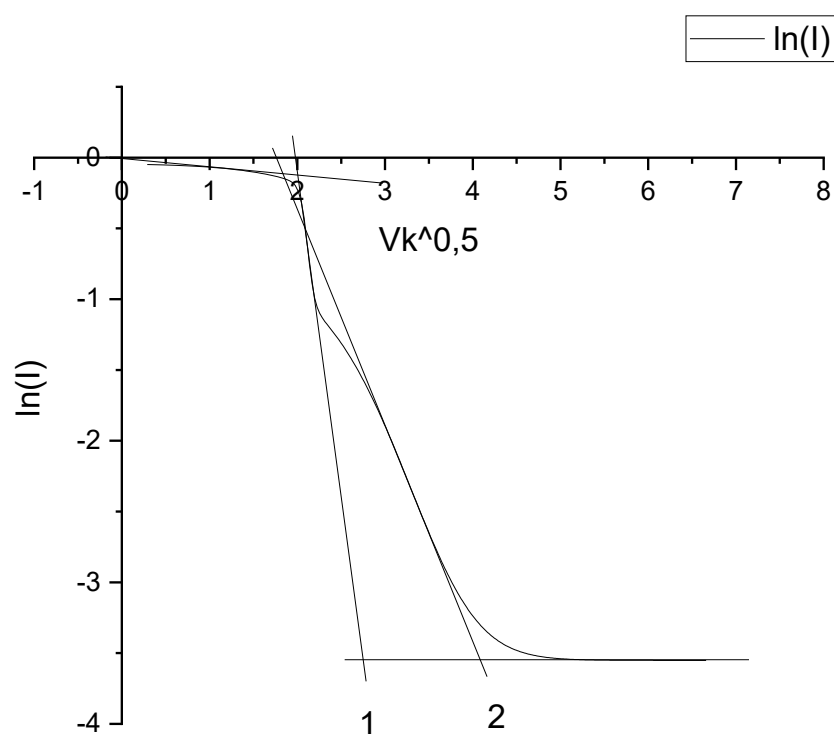


Рисунок 3.2 – Залежність логарифму емісійного струму при температурі 523 К від напруги в області затримки

При переході із температури 293 К до температури 523 К (рис. 3.2) спостерігається стрімке зростання емісійного струму від напруги зовнішнього поля зазначених хімічних елементів (гострий кут нахилу двох лінійних ділянок збільшується), як наслідок чутливість струму до зовнішнього поля є значущою характеристикою виходу вторинних електронів зі зразка.

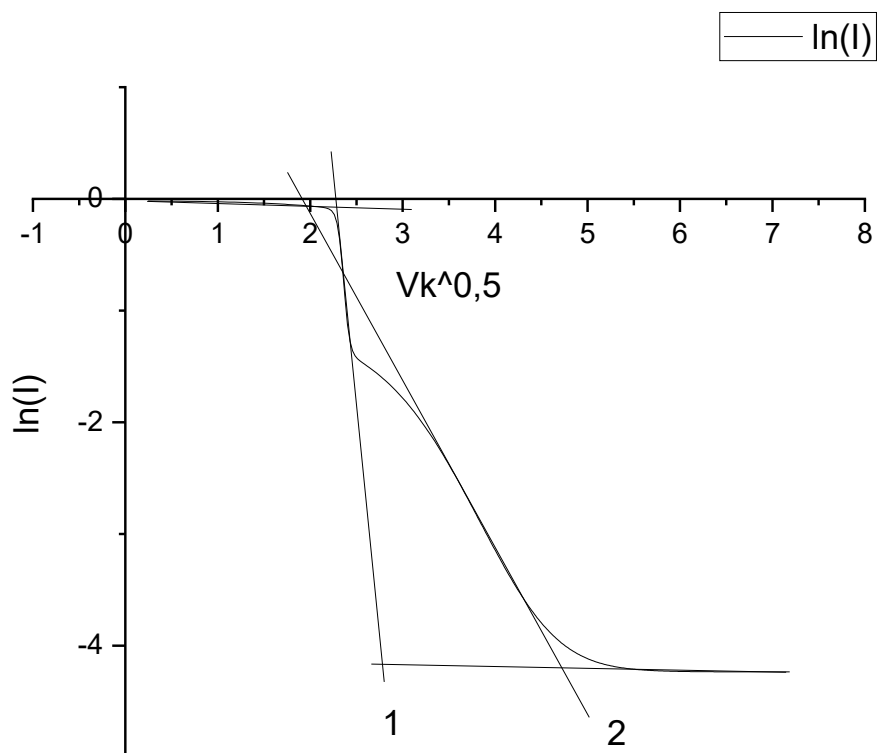


Рисунок 3.3 – Залежність логарифму емісійного струму при температурі 623 К від напруги в області затримки

При температурі 623 К лінійна ділянка оксиду алюмінію стала довшою, відповідно робота виходу окисного прошарку стає більшою (рис. 3.3). При визначенні величини важливо враховувати довжину лінійної ділянки залежності емісійного струму від потенціалу зовнішнього поля.

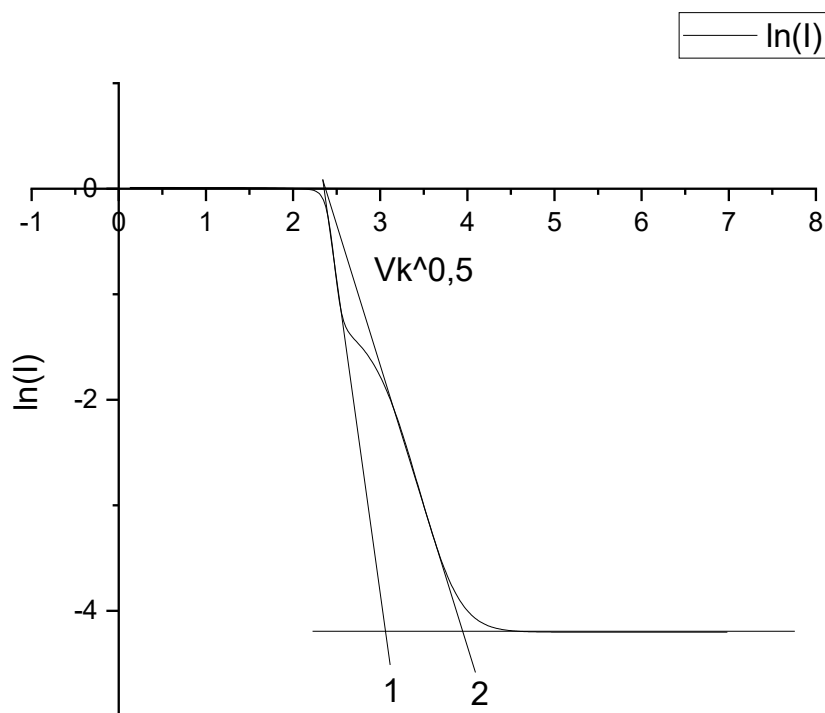


Рисунок 3.4. – Залежність логарифму емісійного струму при температурі 673 К від напруги в області затримки

При температурі 673 К (рис. 3.4) відстань між лінійними ділянками мінімальна, тому різниця роботи виходу вторинного високоенергетичного електрона з поверхні мішені між двома окисними речовинами найменша. Вторинних електронів за енергії менше 0,5 еВ при пострілу пучками первинних електронів по мішені, випромінюється більше, ніж первинних електронів, що вилітають із електронної пушки.

Таким чином, в результаті обробки експериментальних даних залежностей емісійного струму від напруги зовнішнього поля за методикою Дешмана, знайдено дві лінійні ділянки, довжина яких відповідає дійсному значенню роботи виходу вторинних електронів з поверхні окисного металу. При зміні температури довжина лінійної ділянки речовини збільшується, а, отже, йде зростання роботи виходу в динаміці від температури.

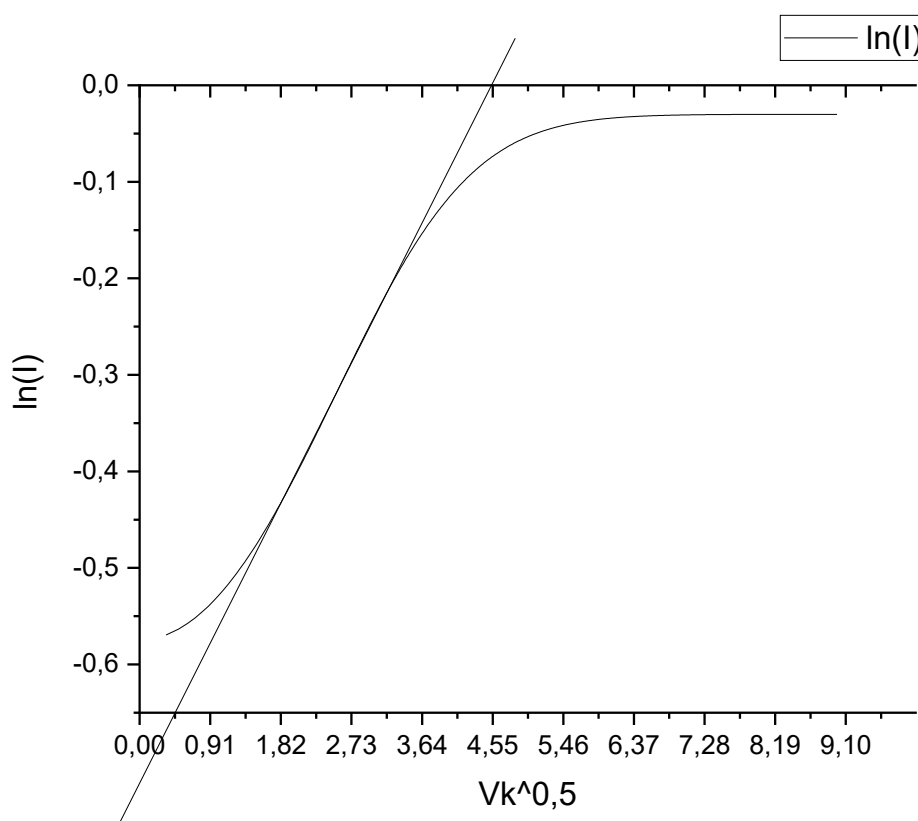


Рисунок 3.5 – Залежність логарифму емісійного струму при температурі 293 К від позитивного потенціалу колектора

На рис. 3.5 зображено типову залежність емісійного струму від температури в області витягування. Аналіз представлених даних на графіку, показує лише одну лінійну ділянку для роботи виходу вторинних електронів в даній енергетичній області, як результат, спостерігається робота виходу чистого матеріалу без впливу різного типу оксидів на сплав.

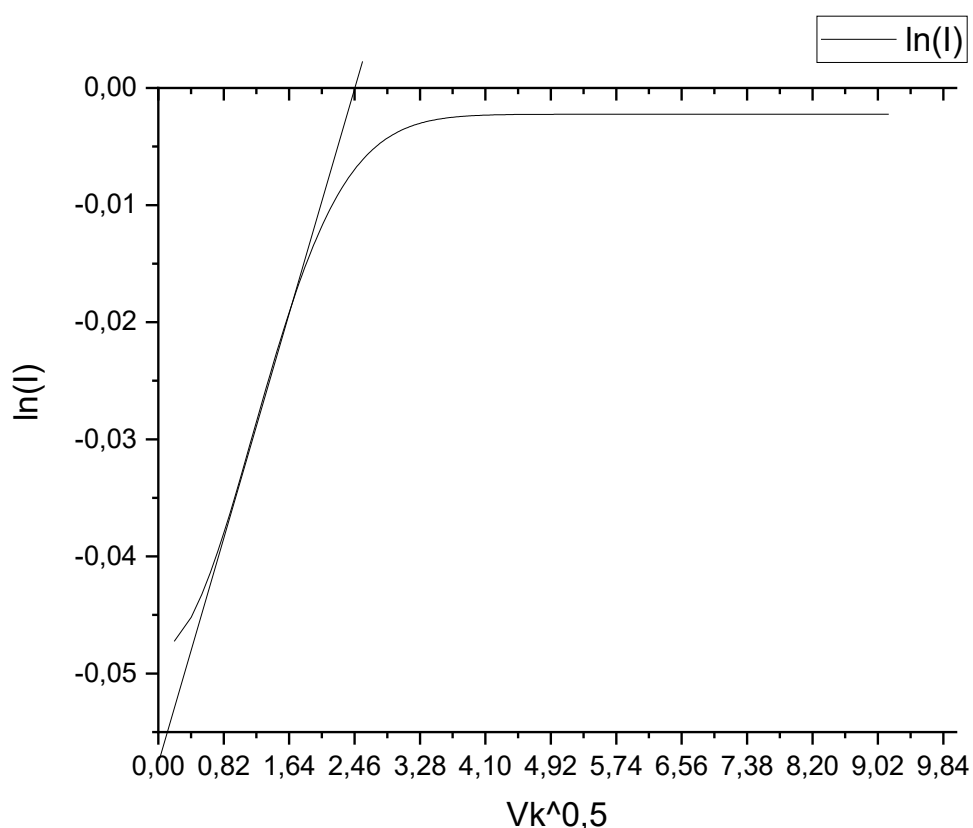


Рисунок 3.6. – Залежність логарифму емісійного струму при температурі 523 К від позитивного потенціалу колектора

З переходом від температури 293 К до 523 К (рис. 3.6) лінійна ділянка стає крутішою за попередню, тобто тенденція на спадання роботи виходу зберігається. Вихід на насичення при температурі 523 К стає швидше, ніж при температурі 293 К. Отже, при визначенні роботи виходу електрона з чистої поверхні потрібно враховувати вихід струму на насичення в динаміці від температури.

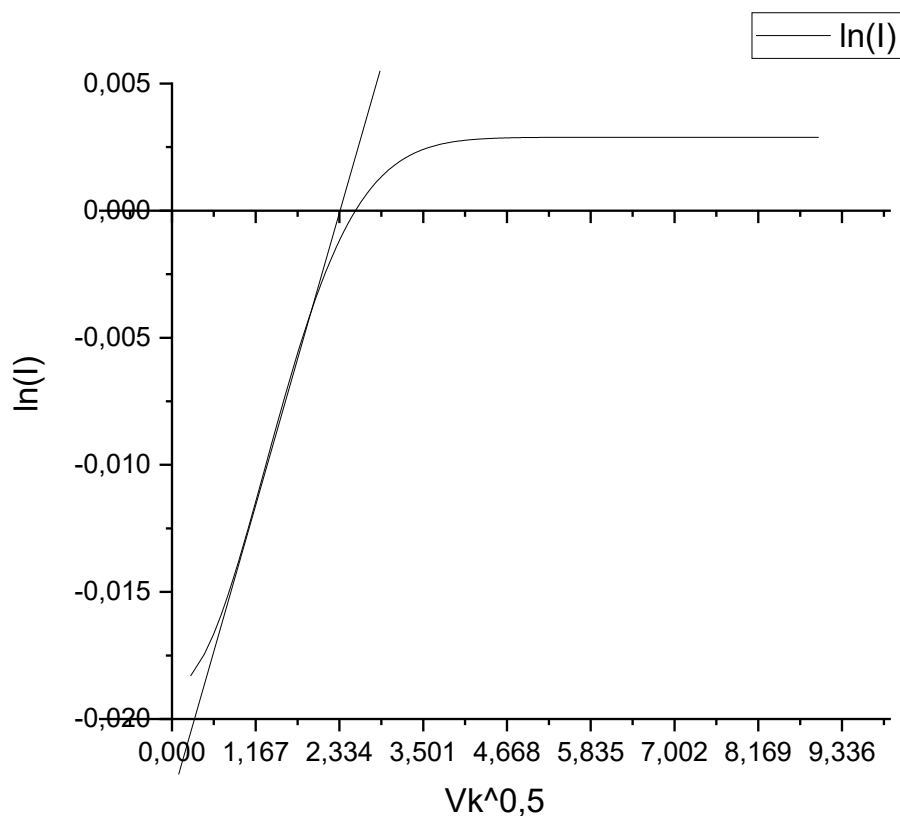


Рисунок 3.7. – Залежність логарифму емісійного струму при температурі 623 К від позитивного потенціалу колектора

На рис. 3.7 графік перетинає вісь x в конкретному значенні, але не є істинним значенням роботи виходу, оскільки враховується чітка лінійна ділянка залежності емісійного струму від потенціалу зовнішнього поля в області витягування. Згідно аналізу лінійних ділянок емісійного струму від зовнішнього поля при температурах 293 К і 523 К тенденція на спад потенціалу виходу на насичення в області витягування зберігається.

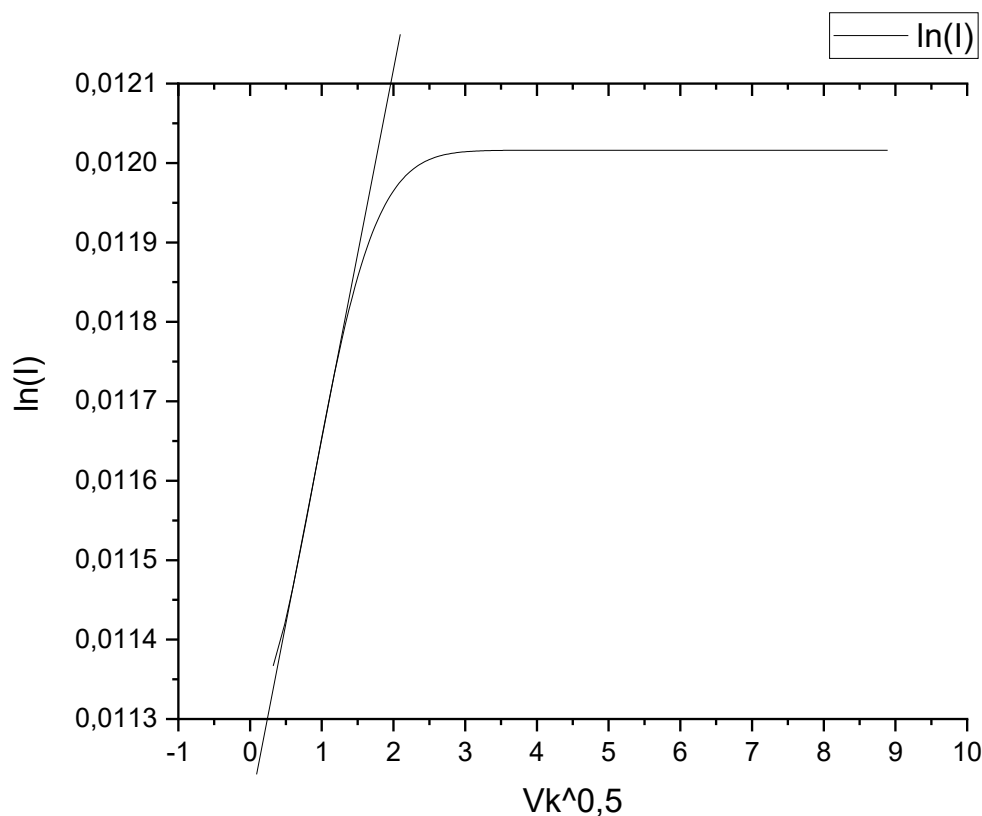


Рисунок 3.8 – Залежність логарифму емісійного струму від позитивного потенціалу колектора

При температурі 673 К переважає вторинний струм над первинним емісійним струмом на всій енергетичній області витягування. Оскільки вторинних електронів вже не існує при подачі на колектор потенціалу більше, ніж -2 В, роботу виходу електрона з поверхні визначити неможливо, тому при зазначеній температурі об'ємний заряд, що наявний в подвійному шарі, зникає.

Таким чином, в результаті обробки ВАХ, представленої у вигляді залежностей $\ln I$ від $\sqrt{U_k}$ проаналізовано залежність емісійного струму від потенціалу колектора в двох різних енергетичних областях.

Для області затримуючого потенціалу видно дві лінійні ділянки окисних матеріалів, кожен із яких залежить від температури. Натомість в області витягування спостерігається лише зміна однієї лінійної ділянки. Для області

позитивних потенціалів колектора вимірювання роботи виходу відбувається з чистого металу.

З аналізу даних в діапазоні температур 293 К...673 К слідує, що в області витягування при температурі 673 К роботу виходу електрона із чистого матеріалу визначити неможливо, що є результатом впливу окисної поверхні при визначенні роботи виходу зі сплаву.

Згідно наявних експериментальних даних, які представлені на рис. 3.1-3.8, за допомогою лінійних ділянок, знайдено роботу виходу електрона з поверхні як чистого матеріалу в області потенціалів витягування, так і для оксидів металу в області затримуючих потенціалів.

Результати аналізу та значення роботи виходу представлені в таблиці 3.

Таблиця 3. Робота виходу вторинних електронів з Cu-Al-Mg для трьох областей ВАХ в залежності від температури

Температура, К	ϕ (-50...0), eV (1)	ϕ (-50...0), eV (2)	ϕ (0...100), eV (3)
293	2.43	1.34	20.6
523	3.96	3	6
623	4.92	3.76	5.74
673	5.56	5.76	--

Згідно представлених даних та отриманих значень роботи виходу для трьох лінійних ділянок залежності $\ln(I)$ від $U^{0.5}$ слідує, що при опроміненні електронами зразків Cu-Al-Mg, які мають неоднорідність розподілу елементів по поверхні та по об'єму (слід також врахувати вплив оксидного прошарку на поверхні) з підвищенням температури спостерігається зростання значення роботи виходу.

З урахуванням літературних даних по роботі виходу електронів з поверхні [5] для полікристалів, представлених в таблиці 4, слідує, що в області затримуючого потенціалу лінійна ділянка 2 відповідає оксиду міді певної

валентності (слід зауважити що вміст Cu складає 93% і лінійна ділянка найдовша), а лінійна ділянка 1 – оксиду алюмінію, (вміст Al – 6%)

Таблиця 4. Значення роботи виходу полікристалів, оксидів та сплавів [5]

Речовина	ϕ , eV
MgO	2,73-4,4
Al ₂ O ₃	2,86-8
Cu ₂ O	4,9-5,15
CuO	1,8-5,34
CuMg	3,7-3,8
Cu	4,4
Al	4,23
Mg	3,64

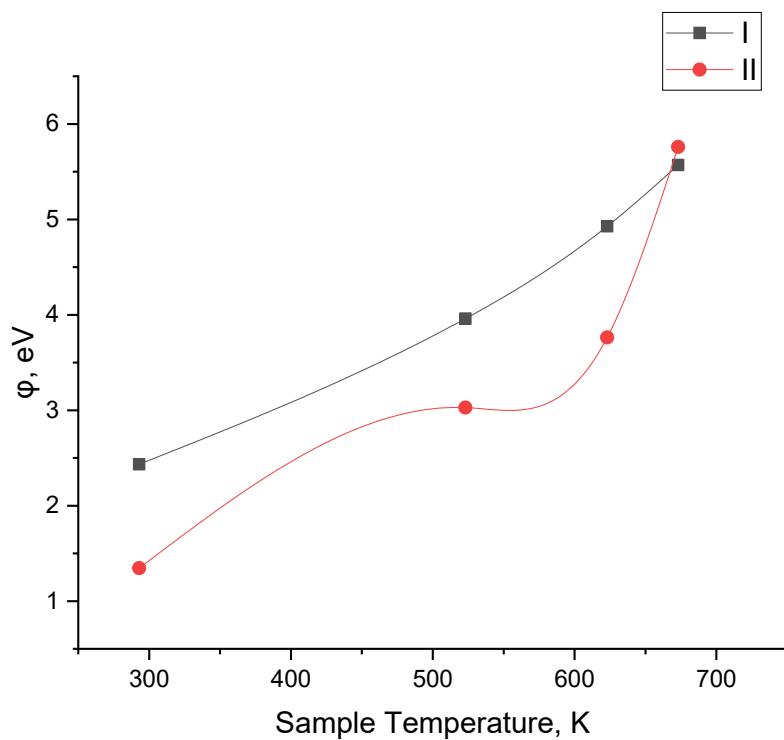


Рисунок 3.9 – Залежність роботи виходу від температури в області затримуючих потенціалів

На рис. 3.9 надано поведінку роботи виходу електронів з окисної поверхні при гальмівному потенціалі. Робота виходу при температурі 293 К є сильно заниженою, порівняно із роботою виходу, представленого в таблиці 4. Таке значення роботи виходу пов'язане з дефектами прошарку Cu_2O , яке в свою чергу, дає вагомий вплив на формування просторового об'ємного заряду в області потенціалів витягування. При підвищенні температури робота виходу електрона з поверхні мішені збільшується, так як товщина окисного прошарку також зростає при нагріві зразка. За температури 673 К різниця між роботами виходу діелектрика Cu_2O та напівпровідника Al_2O_3 найменша ($\Delta\varphi = 0,2$ eV), що дозволяє оптимізувати вихід вторинних електронів з поверхні анода

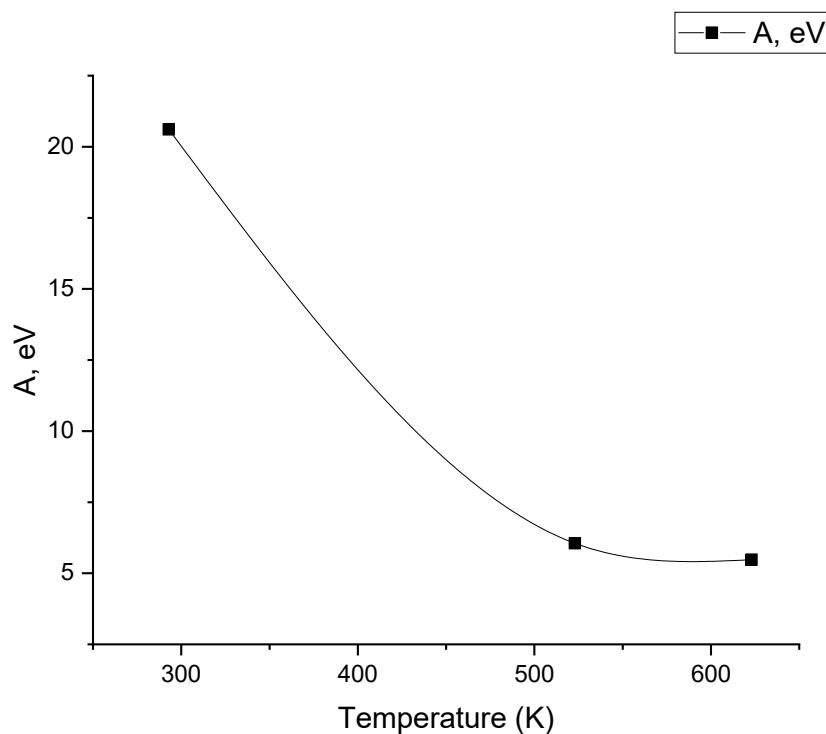


Рисунок 3.10 – Залежність роботи виходу вторинних електронів від температури в області витягування

На основі представлених даних третьої колонки таблиці 3, графік якої зображений на рис. 3.10, слідує, що в області витягування електронів при

кімнатній температурі біля поверхні зразка утворюється просторовий об'ємний заряд, що заважає вторинним електронам вийти зі зразка. При температурі 523, 623 К поверхня зразка звільняється від просторового об'ємного заряду, що дозволяє описати роботу виходу електрона з поверхні катода. При температурі 673 К, як зазначено вище, просторовий об'ємний заряд зникає, оскільки струм виходу на насичення спостерігається в області негативних потенціалів колектора.

Таким чином, було проведено аналіз ВАХ сплаву Cu-Al-Mg у вигляді залежностей $\ln I$ від \sqrt{U} за методикою роботи Річардсона-Дешмана в динаміці від температури зразка.

Аналіз залежностей емісійного струму від зовнішнього поля надає можливість дослідити залежність роботи виходу вторинного електрона зі сплаву або його окисного матеріалу в залежності від температури.

В діапазоні температур 293 К, 523 К, 623 К та 673 К присутні дві лінійні ділянки залежностей емісійного струму електронів в області затримуючих потенціалів та одна лінійна ділянка в області витягування довжина яких впливає на роботу виходу вторинних електронів з поверхні й залежить від його нагріву.

Згідно представлених даних залежностей роботи виходу від температури, в області затримки відбувається зростання роботи виходу через вплив різного типу оксидів, що формується на поверхні катода. Натомість при подачі додатного потенціалу на колектор спостерігається спад роботи виходу з температурою зразка, що є результатом дослідження вторинної термостимульованої емісії з чистого металу.

При визначенні роботи виходу зі зразка у вигляді заданої залежності, слід зазначити, що існує похибка при визначенні роботи виходу електрона з мішені. Неточність визначення викликана ефектом Шоттки, що значно впливає на емісію сплаву.

В області потенціалів витягування при температурі 673 К на поверхні сплаву спостерігається повне окиснення матеріалу. Як результат:

- струм виходу на насичення спостерігається в області затримки;
- при подачі на колектор контактного потенціалу менше, ніж 0,25 В в області негативних потенціалів спостерігається вихід більшої частини електронів з металу при опроміненні пучком первинних електронів;
- роботу виходу електрона з поверхні металу визначити неможливо;
- просторовий об'ємний заряд, наявний в подвійному шарі повністю зникає

ВИСНОВКИ

Таким чином, було проведено аналіз даних сплаву Cu-Al-Mg при взаємодії пучка первинних електронів з енергією 600 eV з мішенню в залежності від потенціалу колектора (ВАХ, енергетичний спектр та робота виходу вторинного електрона). Показано, що при зміні температури змінюються властивості емісії сплаву. Як результат досліджено вплив електронів за рахунок випромінювання та термостимуляційні процеси, що утворюються при нагріванні зразка.

Згідно даних розділу 2, слід зауважити наступне, що з ростом температури:

1. для повної затримки емісійних електронів потрібно зменшувати потенціал затримки;
2. діапазон росту ВАХ звужується, що в подальшому впливає на емісійні властивості електронів;
3. вихід на насичення відбувається зі зменшенням позитивного потенціалу колектора.

На основі представлених даних, вихід на насичення в області затримки спостерігається при температурі 673 К.

При обробці ВАХ за допомогою диференціювання емісійного струму на потенціал колектора представлено енергетичний спектр електронів в діапазоні температур 293 К, 523 К, 623 К та 673 К в залежності від потенціалу колектора. Аналіз енергетичних спектрів показує наявність двох енергетичних розподілів, інтенсивність та ступінь окиснення металу яких залежить від температури.

З аналізу табличних даних 1 та 2 слідує, що при температурі 673 К метал повністю покривається окисним матеріалом, тому вторинні електрони повністю покидають поверхню зразка. Емісійних електронів не існує з енергією менше 2 eV, що є результатом термостимуляції.

Також знайдено роботу виходу вторинних електронів із мішені методом обробки ВАХ у вигляді залежностей $\ln I$ та $\sqrt{U_k}$ для двох енергетичних областей. Для залежностей емісійного струму від потенціалу колектора в діапазоні зазначених температур в області затримуючих потенціалів спостерігається дві лінійні ділянки для даного сплаву, в області витягування – одна. Із представлених даних визначено залежність роботи виходу для двох енергетичних діапазонів в залежності від температури. Слід зазначити, що:

1. в області затримки спостерігається ріст роботи виходу від температури, що є результатом наявності окисного матеріалу в мішені;

2. при температурі 293 К робота виходу деяких окисних елементів є сильно заниженою, порівняно із літературними даними, наявних в [5], для полікристалів; як результат, для чистого металу спостерігається просторовий об'ємний заряд, що наявний в подвійному шарі колектора;

3. із ростом температури в області робота виходу спадає, що характерне для металів, які не мають товщини окисного прошарку або впливом окисної поверхні можна знехтувати; за температури 673 К просторовий об'ємний заряд зникає, що є результатом термостимуляції, внаслідок повного окиснення поверхні мішені; як результат, відбувається дифузія міді із алюмінієм і магнієм або їхніми окисними елементами, таких, як Al_2O_3 або MgO .

Запропоновані зауваження можуть бути розглянуті під час проведення дослідження в рамках підготовки кандидатської дисертаційної роботи.

Автор висловлює щирі вдячність директору Інституту фізики високих енергій та ядерної фізики ННЦ ХФТІ професору Коваленку Г.Д. за допомогу у підготовці та обговорення проблематики дослідження, своєму науковому консультанту с.н.с. ІФВЕЯФ, а донині доценту Луцького національного технічного університету Карпусю С.Г. за надані матеріали для дослідження, постановку завдання, допомогу у формалізації основних положень дослідження, с.н.с. ВФЯП ІЕФ НАНУ Боровику О.О. за надання додаткової

літератури, Директору ІЕФ НАНУ Гомонай Г.М. за надання можливості реалізувати певні дослідження в даній науковій установі, і звичайно силам оборони України, завдяки яким є можливість проводити дослідження.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Secondary Emission and Structural Properties of Solids. Springer, 1971
2. S.H. Karpus, G.D. Kovalenko, Yu.H. Kazarinov, V.M. Dubina, V.Y. Kasilov, S.S. Kochetov, O.O. Shopen, I.N. Shliakhov. Secondary electron emission from thin aluminum foils produced by high-energy electron beams // Problems of Atomic Science and Technology. 2021. № 6. С. 38-41.
3. Double Boltzmann function fit. URL:
<https://www.originlab.com/doc/de/Origin-Help/BiDoseResp-FitFunc>
4. М. Лящов, С. Карпусь, О. Шопен, Є. Цяцько, І. Шляхов «Спектральні характеристики термостимульованих вторинних емісійних електронів сплаву Cu-Al-Mg». Ядерна фізика на Закарпатті. Матер. допов. міжн. конф. до 55-річчя ВФЯП ІЕФ НАН України, м. Ужгород, 2024 р., с. 172
5. Handbook of Physical Quantities. Edited by Igor S. Grsgoriev, Evgenii Z. Melikhov, CRC Press LLC, 1997, 1548 p.