

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра мікро- та наноелектроніки
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Дослідження впливу температури на роботу планарного
одноелектронного тріоду»

Виконав: студент IV курсу, групи РТ-319

Спеціальності 153 Мікро- та наносистемна
(код і найменування спеціальності)
техніка

Освітня програма (спеціалізація)
Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої

ЧІЧЕРІН Д.К.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ПОГОСОВ В.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент СНІЖНОЙ В.Л.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
Кафедра Мікро- та наноелектроніки
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МіНЕ
Генадій СНИЖНОЙ
« 22 » 02 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

ЧІЧЕРІНА Данила Костянтиновича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження впливу температури на роботу планарного одноелектронного тріоду

керівник проєкту (роботи) д. ф.-м. н., професор, ПОГОСОВ Валентин Вальтерович

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові,)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 10 » квітня 2023 року № 104

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 05.06.2023

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) рекомендована література, одноелектронні тріоди структур Cu/Al/Cu, Al/Cu/Al, Al/Al/Al з відповідними експериментально отриманими значеннями одноелектронної зарядової енергії E_c , опором тунельних контактів R_t , ємностями між острівцевим електродом і затвором C_g , а також робота виходу W_0 і середня відстань між електронами у матеріалі r_0 для відповідних металів Cu та Au

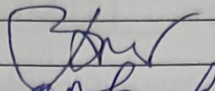
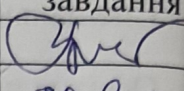
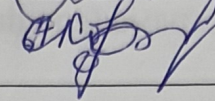
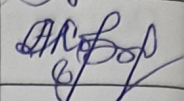
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Оглянути принципи роботи, різновиди, виготовлення та технології, використання одноелектронних приладів в цілому.

Розрахувати вплив температури на роботу одноелектронного тріоду (вплив температури на вольт-амперну характеристику), залежність впливу температури від матеріалу електродів тріоду.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконання завдання
1-3	Погосов В.В., професор каф. МіНЕ		
Нормо-контроль	Коротун А.В., професор каф. МіНЕ		

7. Дата видачі завдання « 22 » Лютого 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Пошук, збір і аналіз інформації для літературної частини	22.03.23 – 14.04.23	Виконано
2	Заповнення літературної частини	15.04.23 – 23.04.23	Виконано
3	Проведення калькуляцій для розрахункової частини	25.04.23 – 06.05.23	Виконано
4	Заповнення та оформлення розрахункової частини	07.05.23 – 11.05.23	Виконано
5	Аналіз розрахункової роботи	12.05.23 – 20.05.23	Виконано
6	Оформлення презентації	21.05.23 – 28.05.23	Виконано

Студент

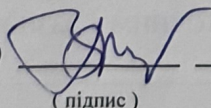


Данило ЧІЧЕРІН

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)



Валентин ПОГОСОВ

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

ПЗ: 46 с., 2 табл., 19 рис., 16 джерел.

ОДНОЕЛЕКТРОНІКА, НАНО, ОДНОЕЛЕКТРОННЕ ТУНЕЛЮВАННЯ,
КУЛОНІВСЬКА БЛОКАДА, ТРІОД.

Мета роботи – вивчити принципи і умови, необхідні для роботи одноелектроніки, розрахувати вольт-амперну характеристику одноелектронного тріоду в залежності від температури структури.

Об'єкт дослідження – одноелектронні тріоди сконструйовані з різних металів.

Метод дослідження – розрахунково-графічний.

Результати: розраховано температурні залежності вольт-амперної характеристики тріодів, продемонстровано кулонівські сходинки струму від напруги, які розмиваються з підвищенням температури.

Рекомендації щодо впровадження – результати роботи можуть бути використані для спрощеного аналізу та тестування експериментальних характеристик новітніх тунельних одноелектронних приладів, які інтенсивно конструюються в наноелектроніці.

Практична цінність – дане дослідження є корисним при моделюванні приладів одноелектроніки різного призначення, наприклад, сенсорів і нановимикачів.

Дипломний проєкт складається з двох розділів.

У першому розділі описані літературний огляд на одноелектронні прилади, їх принципи роботи, різновиди, виготовлення та застосування.

У другому розділі описані умови коректної роботи одноелектронного тріоду, умови, необхідні для спостереження ефекту «кулонівської блокади», а також аналітичний опис роботи тріоду, необхідне для теоретичного розрахунку його вольт-амперної характеристики.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Літературний огляд. Одноелектронні прилади.....	7
1.1 Принцип роботи одноелектронних приладів	7
1.2 Різновиди одноелектронних приладів	9
1.3 Виготовлення одноелектронних приладів	11
1.4 Застосування одноелектронних приладів.....	14
2 Розрахункова частина.....	15
2.1 Основні відомості про одноелектронний тріод	15
2.2 Дослідження вольт-амперної характеристики одноелектронного тріоду	26
Висновки.....	44
Перелік джерел.....	45

ВСТУП

Одноелектронні прилади в сучасній електроніці відкривають нові перспективи в розробці мініатюрних, енергоефективних та високопродуктивних пристроїв. Одноелектронні прилади – це один з етапів розвитку нанотехнологій, в процесі якого люди отримують нові структури дуже малих розмірів. Одноелектронні прилади мають багато особливих властивостей, які відрізняють їх від класичних електронних компонентів. Вони працюють з окремими електронами, забезпечуючи точний контроль над їх рухом та взаємодією. Це дозволяє досягати високої швидкості, мініатюрності та низького енергоспоживання. Але, через їх розміри, вони потребують високого контролю над середовищем довкола них, бо будь які кореляції температури можуть суттєво вплинути на їх роботу. В першій частині роботи буде описано загальну інформацію про ці прилади, їх механізми роботи, різновиди, виготовлення та використання.

У другій частині буде йти мова про одноелектронний тріод – різновид одноелектронних транзисторів. А саме: конструкція обраного тріоду, яка базується на використанні наноструктурних острівців, що виконують функції наногранул та квантових точок; принцип роботи даного одноелектронного тріоду; опис його різновидів, для яких будуть проводитися розрахунки. Ми розглянемо вплив температури на роботу одноелектронного тріода. Опишемо як зміна температури впливає на основний параметр тріоду – вольт-амперну характеристику.

Одноелектронні прилади та їх взаємодія з температурою відкривають нові перспективи в галузі електроніки та нанотехнологій. Вивчення цих ефектів дозволить нам глибше зрозуміти поведінку таких приладів та їх потенціал для застосування. Крім того, аналізуючи залежність параметрів одноелектронних пристроїв від температури, ми зможемо розробляти більш точні моделі та передбачати їх роботу в різних умовах. Розуміння цих процесів є важливим для подальшого розвитку нових технологій та вдосконалення наявних пристроїв.

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД. ОДНОЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ

1.1. Принцип роботи одноелектронних приладів

В основі майже усіх одноелектронних пристроїв стоять механізми кулоновської блокування та тунелювання електронів через бар'єри.

1. Кулоновська блокада є ключовим принципом роботи одноелектронних пристроїв. Вона виникає внаслідок кулоновського відштовхування електронів через невеликі енергетичні бар'єри. Основні складові частини, які сприяють кулоновській блокаді, включають нанопровідники або навантаження, електроди та кількісні точки. Навантаження можуть бути наночастинками, квантовими точками або іншими структурами, що здатні утримувати лише декілька електронів. Електроди використовуються для забезпечення потенціальної різниці, що керує тунелюванням електронів, а кількісні точки допомагають контролювати кількість електронів у системі [1, 2].

Принцип кулоновської блокади полягає у тому, що при надзвичайно низькому рівні струму електрони мають тенденцію залишатися на навантаженні (наприклад, на наночастинці) через кулоновське відштовхування. Коли заряд на навантаженні досягає певного значення (наприклад, додатнього), струм електронів зупиняється, бо додаткові електрони не можуть пройти через бар'єр. Це явище називається блокадою Кулона. Зміна заряду на навантаженні може відбутися через тунелювання електронів через бар'єри або шляхом керування напругою на кількісних точках або електродах.

Візьмемо до прикладу одноелектронний транзистор, який працює за кулонівською блокадою. На рисунку 1.1 показано його енергетичну діаграму, за якою видно дві площини різної енергії та додатковий простір, що розділяє їх. Спочатку носії заряду переходять з області 1 в область 2, заповнюючи її до рівня енергії, що вищий за енергію області 1. Через це відбувається зупинка струму, про яку писалося трохи раніше. Із цього моменту

починається накопичення заряду від енергії першої зони U_1 до певного критичного U_k , після чого електрон з вищого рівня 2-ї зони переходить у 3-тю зону, а на його місце заходить інший електрон з зони 1, повторюючи процес. Таким чином відбувається проходження одного електрона за раз. При цьому, вольт-амперна характеристика даного транзистора буде мати вигляд «сходинок», показуючи на копичення енергії на прямих ділянках (рисунок 1.2).

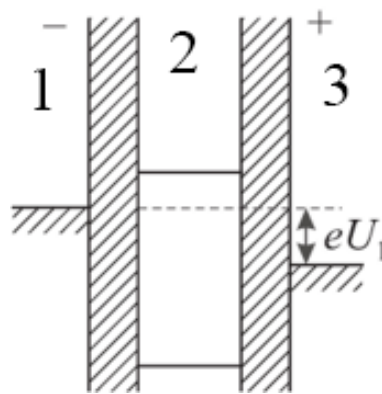
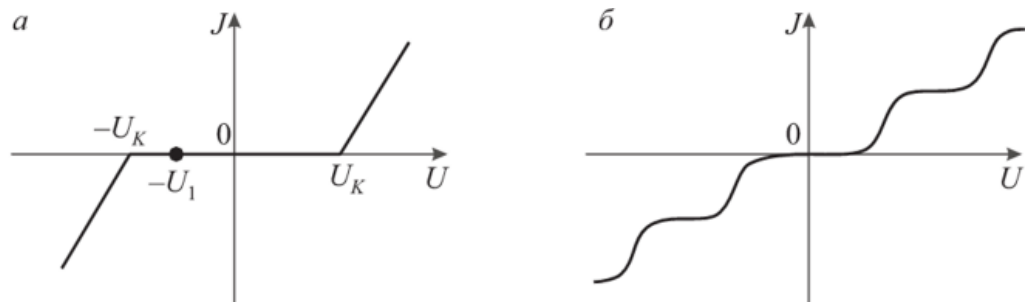


Рисунок 1.1 – Енергетична діаграма одноелектронного транзистору



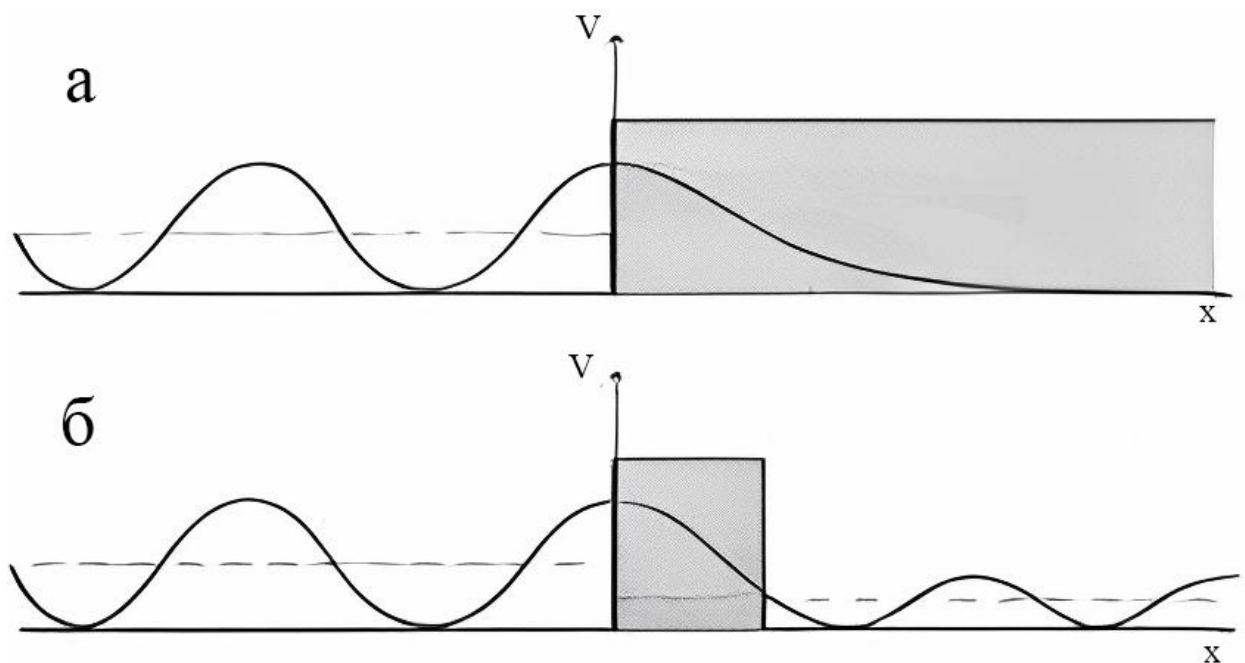
а – ВАХ першого бар'єру, б – ВАХ другого бар'єру

Рисунок 1.2 – Вольт-амперні характеристики одноелектронного транзистору

2. Тунелювання електронів – квантово-механічним ефект, який виникає, коли частинка, така як електрон, проникає через енергетичний бар'єр, який, за класичних умов, вона не могла б подолати. Тунелювання відбувається внаслідок хвильової природи частинок за квантовими законами [3, 4].

У класичній механіці, для того щоб частинка пройшла через бар'єр, вона повинна мати достатню кінетичну енергію для подолання його висоти. Проте, в квантовій механіці, частинка може мати ненульову ймовірність з'явитися за межами бар'єру, навіть якщо її енергія менша, ніж енергія бар'єру. Це явище пояснюється хвильовою природою частинок, що підкоряються рівнянню Шредінгера.

При тунелюванні електрона його хвиля змінюється таким чином, що частина хвилі проникає через бар'єр, а частина відбивається від нього. Ймовірність тунелювання залежить від висоти та ширини бар'єру, а також від енергії електрона. Чим тонша і нижча бар'єрна структура, тим вища ймовірність тунелювання (рис. 1.3).



а – тунелювання крізь нескінченний бар'єр (неможливо) з поступовим зниженням ймовірності проходження; б – тунелювання крізь кінцевий бар'єр з кінцевим зменшенням ймовірності знаходження за ним

Рисунок 1.3 – Процес тунелювання частинки крізь бар'єри

1.2 Різновиди одноелектронних приладів

До основних одноелектронних пристроїв, які досить широко використовуються, можна віднести:

1. Одноелектронний транзистор: складається з нанопровідника (наприклад, квантової точки) між двома електродами - катодом і анодом (стоком та витіком) (рис. 1.4). Завдяки кулоновському відштовхуванню (блокаді) електронів, один або кілька електронів можуть тунелювати через нанопровідник, залежно від заряду на затворі [5].

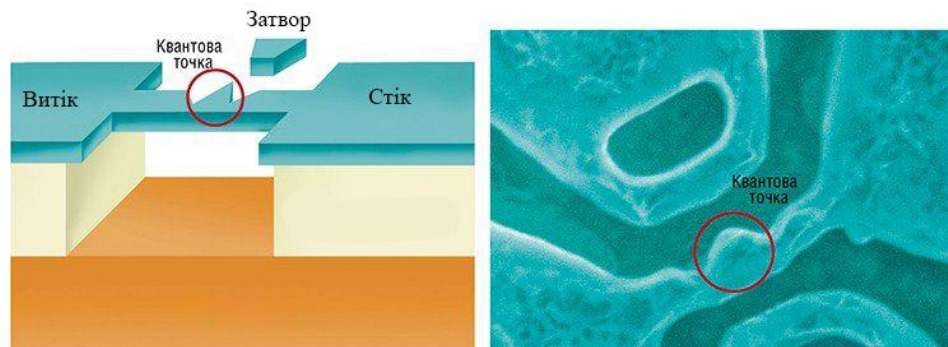


Рисунок 1.4 – Приклад будови одноелектронного транзистора та його вигляд під мікроскопом

2. Одноелектронний тунельний контакт [6]: складається з двох тунельних контактів між електродами. Кулоновське блокування забезпечує відсічення тунелювання електронів через контакт, якщо заряд на ньому невеликий. Зміна заряду на контакті може викликати зміну струму, що проходить через нього.

3. Одноелектронний провідник [7]: це нанопровідник, в якому кулоновське блокування використовується для контролю струму електронів. Він складається з послідовно з'єднаних наночастинок або квантових точок, які діють як острівці. Кожен острівець здатен утримувати лише декілька електронів. Заряди на навантаженнях взаємодіють кулонівськими силами, що впливають на струм, що проходить через провідник. Зміна зарядів на острівцях може викликати зміну струму через провідник.

4. Одноелектронний фотодетектор: використовує одноелектронні ефекти для виявлення одиночних фотонів. Фотони, що падають на

фоточутливий елемент, спричиняють випадкові зміни заряду на ньому. Завдяки кулонівському блокуванню, навантаження на фоточутливому елементі може виявити ці зміни, що дає можливість виявити окремі фотони. Розглянемо схему на рисунку 1.5. Принципово, даний фотодетектор працює на двох квантових точках D1 та D2. Спочатку фотон з допомогою антени G2 потрапляє на D2, звідки у вигляді електрона переходить до D1, який є частиною одноелектронного транзистора (острівець, який контролює перехід), або електрод (reservoir) біля нього. Потрапляння в будь-якого з них буде виявляти окремі фотони [8].

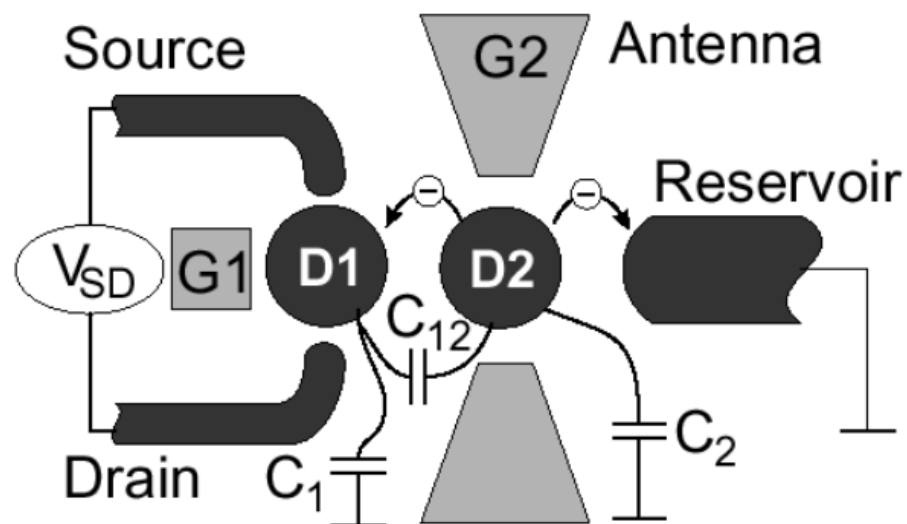


Рисунок 1.5 – Приклад структури одноелектронного фотодетектора

1.3 Виготовлення одноелектронних приладів

Окремо коротко розглянемо процеси виготовлення перелічених пристроїв. Кожен з них потребує дуже високого рівня точності через розміри структур, але при цьому, більшість з них використовують однакові технології виготовлення. Основними з них можна назвати фотолітографію та маскування з подальшим осадженням [9, 10]. Розглянемо детальніше виробництво приладів з розділу 1.2.

1. Одноелектронні транзистори включають такі етапи виготовлення:

- очищення підкладки: починаючи зі шматка підкладки, такої як кремній, спочатку проводиться очищення поверхні від забруднень та органічних речовин. Цей крок може включати процеси, такі як хімічне чищення та термічну обробку;

- нанесення шарів: на очищену підкладку наносяться шари різних матеріалів, які виконують роль електродів, діелектриків та інших компонентів транзисторів. Цей процес виконується за допомогою методів: відпарювання, розпилення або хімічне осадження;

- фотолітографія: цей крок використовується для створення шаблонів чи масок, які дозволяють визначати форму та розташування різних компонентів елементу. Застосовуючи фоточутливий шар та маску зображення, застосовують ультрафіолетове світло для вирізання шаблону на фоточутливому шарі;

- етап травлення: після фотолітографії виконується етап травлення, який видаляє або модифікує матеріали в певних областях відповідно до шаблону. Цей процес може використовувати хімічні розчини, що видаляють або реагують з вибраними матеріалами;

- нанесення іонних масок: для створення одноелектронного ефекту в транзисторі може використовуватись процес іонної маски, де іони впливають на електрофізичні властивості одноелектронного транзистора шляхом введення домішок у певних областях. Це може бути досягнуто шляхом іонної імплантації, де іони направляються на поверхню пристрою з високою енергією і вбираються у матеріал транзистора;

- фінальна обробка: після виконання основних кроків виготовлення, транзистор може пройти різні додаткові обробки. Це може включати нанесення захисного шару, розташування контактів для зовнішнього підключення та проведення додаткових перевірок та налаштувань пристрою.

2. Одноелектронні тунельні контакти – передбачається створення тонких діелектричних шарів між електродами. Ці шари можуть бути

отримані шляхом відкладання діелектричних матеріалів методом хімічного осадження чи розпилення. Відстань між електродами в тунельних контактах дуже мала, що сприяє явищу квантового тунелювання електронів, яке використовується для контролю струму.

3. Одноелектронні провідники, такі як одноелектронні точки звуження, виготовляються з подібних матеріалів, що використовуються в транзисторах. Однак, їх основна різниця полягає в геометрії та розташуванні електродів. Одноелектронні провідники мають звужені області, які забезпечують кулонівську блокаду, тобто обмеження перенесення заряду через них на рівень окремих електронів.

Основним методом виготовлення таких провідників є нанолітографія. Вона використовує фоточутливі резисти та світлову експозицію для створення маски з певними шаблонами на поверхні матеріалу. Цей шаблон визначає розмір та форму провідника. Після експозиції резисту він піддається процесу травлення або осадження, щоб створити провідник заданої форми та розміру. Нанолітографія дозволяє створювати провідники з розмірами від кількох нанометрів.

4. Процес виготовлення одноелектронних фотодетекторів включає в собі кроки, що дуже схожі на процес виготовлення одноелектронних транзисторів, а саме:

- підготовка підкладки – проводиться підготовка підкладки, яка може бути напівпровідниковим матеріалом, таким як кремній або германій. Підкладка може бути покрита прошарком діелектрика для створення ізоляційного шару;

- Нанесення активного шару – на підкладку наноситься активний шар, який здатний абсорбувати фотони та генерувати електрони-діри. Це може бути напівпровідниковий шар, який має оптимальні властивості для фоточутливості в заданому діапазоні довжин хвиль.

- формування електродів – для збору і вимірювання струму, який виникає внаслідок фотогенерації. Електроди можуть бути виготовлені з

металів, таких як алюміній або платина, і наносяться на поверхню активного шару;

- пасивація та захист — для покращення ефективності фотодетектора може бути виконана пасивація, яка включає в себе покриття активного шару діелектриком для зменшення поверхневих станів, шуму та нерівностей. Крім того, можуть бути застосовані захисні шари, що допомагають захистити фотодетектор від зовнішнього впливу та забруднень.

1.4 Застосування одноелектронних приладів

Одноелектронні прилади використовуються в різних областях, таких як електроніка, квантова обчислення і дослідження квантової фізики. Деякі приклади:

- квантові біти (кубіти) [11, 12] — вони є основною одиницею інформації в квантових обчислювальних системах (квантових комп'ютерах). Квантові біти засновані на контролюванні одиночними електронами або зарядженими об'єктами, роль яких можуть виконувати квантові точки та одноелектронні транзистори. При випадку квантових точок, створення кубіту відбувається за допомогою зміни енергетичних рівнів електронів на ній. Для транзисторів — залежить від кількості електронів на островці. Сама ідея кубітів можлива через квантову природу електронів, а точніше — суперпозиція, коли вони можуть приймати значення «0» та «1» одночасно. Це дозволяє виконувати розрахунки на більших швидкостях, ніж при використанні класичними комп'ютерами;

- одноелектронна мікроелектроніка [13] — створення мікросхем, де рух окремих електронів контролюється електричними полями. Вони можуть бути використані для створення дуже чутливих сенсорів, які виявляють навіть найменші зміни заряду або струму. До таких систем можна віднести квантові

датчики. За їх допомогою вимірюють малі зміни електричного заряду, напруженості електричного поля або електромагнітне випромінювання;

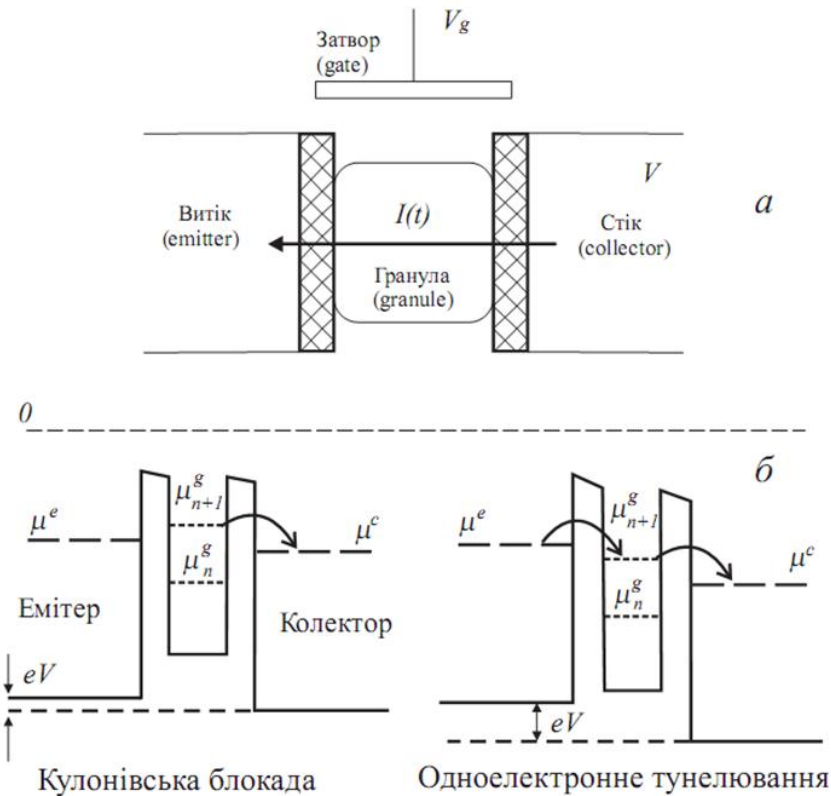
- дослідження квантової фізики [14] – використання в наукових дослідженнях квантової фізики для вивчення одноелектронних тунелювань, кулоновської блокади, квантових точок та інших феноменів.

Одноелектронні пристрої часто використовуються в експериментальних лабораторних умовах при низьких температурах для забезпечення стабільності та контролю окремих електронів. Це дозволяє досягти високої ефективності та надійності роботи цих пристроїв. Враховуючи це, подальше вивчення впливу температури на роботу цих пристроїв є досить важливим. Далі розберемо на окремому прикладі цей вплив.

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Основні відомості про одноелектронний тріод

Одноелектронний тріод є електронним пристроєм, що використовується в нанoeлектроніці для контролю та маніпуляції руху одиничних електронів. Основна структура тріода складається з трьох елементів: витоку (емітеру), затвору та стоку (колектора). Між стоком та витоком ставиться наночастинка, яка виконує роль острівця, через який переміщуються носії заряду (рис. 2.1.а). Принцип роботи одноелектронного тріода базується на двох явищах: Кулонівської блокади та тунелюванні. Протікання цих процесів залежить від прикладеної напруги між емітером та колектором (рис. 2.1.б) [15, 16].



a – Острівець, зв’язаний тунельними переходами з електродами; *б* – тунелювання електрона на острівець приводить до блокади переміщення інших електронів (перехід замкнений). Праворуч – при підвищенні зовнішньої напруги (між емітером і колектором) блокада знімається.

Рисунок 2.1 – Схематичне зображення тріоди і енергетичні діаграми структури, які демонструють ефект «кулонівської блокади» та її зняття.

Без врахування емітера і колектора вільна енергія гранули на якій вже знаходиться n «зайвих» електронів рівна:

$$F_n = F_0 + \mu^g n + \frac{(-en)^2}{2C} \quad (2.1)$$

де μ^g – хімічний потенціал острівця;

n – кількість електронів на острівці;

C – ємність острівця;

e – заряд електрона.

Сума другого і третього доданка – робота по перенесенню «n» електронів з нескінченності на острівця. При цьому заряд потрібно ввести в острівця (другий доданок), а потім перерозподілити його по поверхні острівця (третій доданок).

При додаванні чи видаленні одного електрона ця енергія зміниться на:

$$\begin{aligned}\Delta F &= F_{n\pm 1} - F_n = \mu_0^g (n \pm 1) + \frac{e^2 (n \pm 1)^2}{2C} - \mu_0^g n - \frac{e^2 n^2}{2C} = \\ &= \pm \mu^g + \tilde{E}_C (\pm n + \frac{1}{2})\end{aligned}\quad (2.2)$$

де введена характеристична зарядова енергія:

$$\tilde{E}_C \equiv \frac{e^2}{C}$$

Якщо електрони переносяться не з нескінченності, а з емітера, ємність якого дорівнює нескінченності, наведений вираз перепишеться

$$\Delta F = F_{n\pm 1} + F_n = \pm \mu^g \mp \mu^g + \tilde{E}_C (\pm n + \frac{1}{2}) \quad (2.3)$$

Але величина «n» у цій формулі не може бути довільною. Це визначається конкуренцією суми перших двох доданків з останнім доданком (вони різного знаку). При визначеному $n = n^*$ величина ΔF стає негативною, тобто $n^* + 1$ -ий електрон не може "прилипнути" до гранули, тому що його ємність "переповнена". Цікаво відзначити, що критичний заряд $-n^*$ навіть для гранул, що містять більше тисячі атомів, не перевищує декількох одиниць елементарного заряду.

Цей ефект для триелектродної структури блокує протікання струму, підвищуючи різницю потенціалів V між крайніми електродами, можна

допомогтися зняття блокади з острівця після протікання першого електрона, потім другого і т.д., тому вольт-амперна характеристика такої структури являє собою чергу сходинок (рис. 2.2).

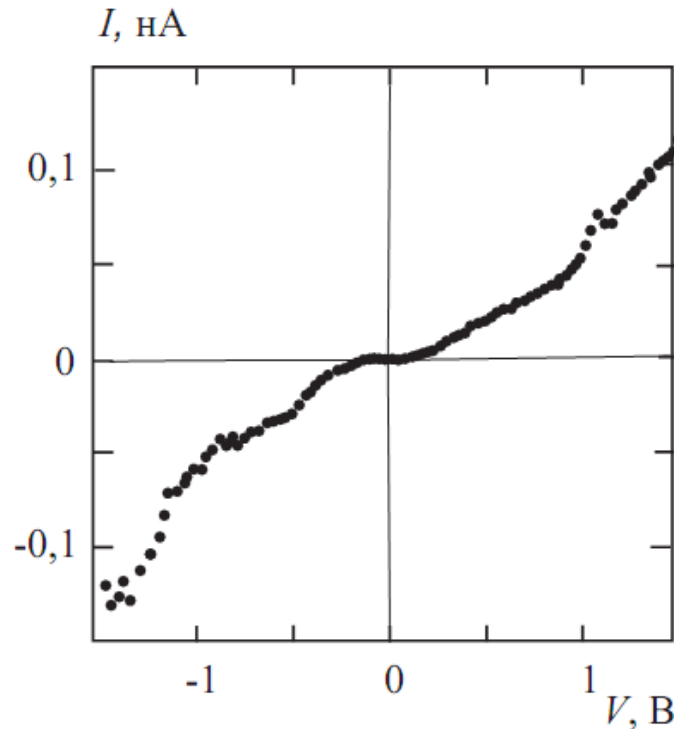


Рисунок. 2.2 – Експериментальна вольт-амперна характеристика тріоди

Лівий і правий електроди (емітер і колектор) є резервуарами електронів з неперервними енергетичними спектрами, зайнятими відповідно до функції розподілу Фермі:

$$f(\varepsilon^{e,c}) = \{1 + \exp[\beta(\varepsilon^{e,c} - \mu_0^{e,c})]\}^{-1} \quad (2.4)$$

де $(-\mu_0^{e,c}) = W_0^{e,c} > 0$ – робота виходу електронів з емітера або колектора (нижній індекс "0" означає напівнескінченний метал), $\beta = \frac{1}{k_B T}$. В усіх випадках енергії електронів $\varepsilon < 0$ відраховуються від вакуумного рівня, тобто від потенційної енергії електрона вдалині від усієї триелектродної структури, де поле відсутнє (рисунок 2.2).

Хімічний потенціал електронів острівця μ^g , якщо він квазімакроскопічний, можна прирівняти до хімічного потенціалу електронів напівскінченного металу, з атомів якого складається острівець, тобто $\mu^g = \mu_0 < 0$. Але, якщо розміри частинки менші, тобто якщо вона складається з тисячі і менше атомів, проявляються розмірні ефекти:

$$\mu^g = \mu_0 + \frac{\mu_1}{R} \quad (2.5)$$

де $\frac{\mu_1}{R}$ – розмірна поправка до хімічного потенціалу.

R – радіус цієї сферичної гранули.

$$\mu_1 = 1,9 \text{ eV} \cdot a_0$$

Електрони в острівці підпорядковуються розподілу за енергіями

$$f(\varepsilon_p) = \{1 + \exp[\beta(\varepsilon_p - \mu^g)]\}^{-1} \quad (2.6)$$

Усі рівні ε_p нумеруються в порядку зростання.

Для виготовлення всіх структур використовувалася фото- і електронно променева літографія, плазмове сухе травлення та методика кутового напилення.

Схематичне зображення цієї конструкції приводиться на рис. 2.3.

Острівцевий електрод зв'язаний із двома масивними електродами (емітер і колектор) невеликими тунельними контактами, а електрод затвора "з'єднаний" з острівцевим електродом ємнісним способом.

Напруга затвору на одноелектронному тріоду регулює провідність через обидва контакти, змінюючи електростатичний потенціал острівцевого електрода.

Еквівалентна схема такої конструкції показана на рис. 2.4: острівцевий електрод зв'язаний за допомогою двох тунельних контактів з генератором

напруги V , що і забезпечує протікання струму. Острівцевий електрод ємнісно зв'язаний з електродом затвора, через який подається напруга V_g .

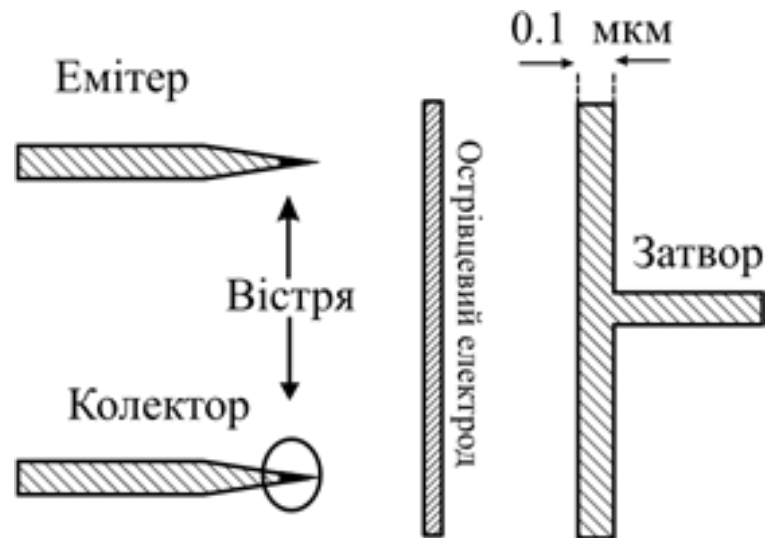
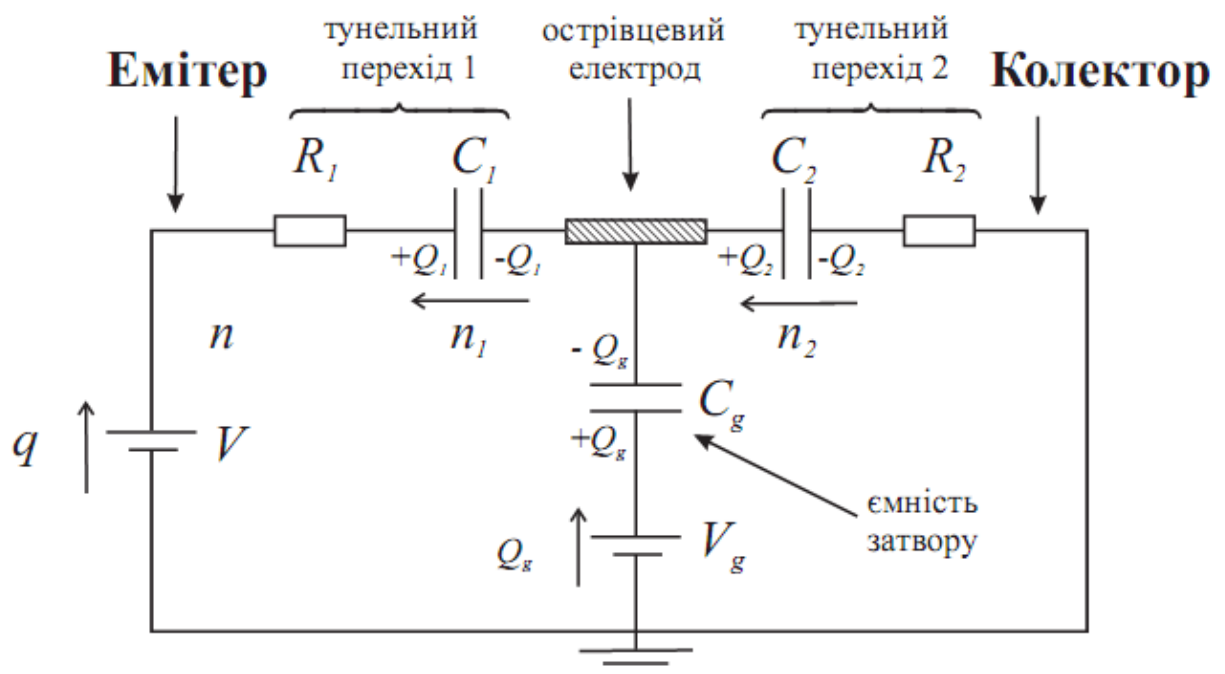


Рисунок 2.3 – Схема конструкції одноелектронного тріоду.

Зовнішні електроди виготовлялися у вигляді "олівців", що лежали на підшарку. Потім кінчики олівців окислялися для створення ізолюючої плавки. Острівцевий електрод (у вигляді "перемички") переносився й укладався поверх окисного шару на кінцях олівців. Тим самим конструювалися два точкових тунельних контакти.



R_t – опір обох тунельних контактів одноелектронного тріоду; C_g – ємність між острівцевим електродом і затвором.

Рисунок 2.4 – Еквівалентна електрична схема тріоду

Між острівцем і електродами виникає контактна різниця потенціалів

$$\delta\varphi = \frac{(\mu^g - \mu_0^e)}{e} \quad (2.7)$$

Рівновага буде досягатися шляхом електричної зарядки кластера, якщо його електрична ємність є кінцевою. Одержимо:

$$Q_0 = C_{\Sigma} \delta\phi \quad (2.8)$$

де C_{Σ} – сумарна ємність всіх контактів.

Оцінимо Q_0 для сферичного острівця, що знаходиться далеко від електродів. Тоді C_{Σ} трансформується в його власну ємність $C_{self} = 4\pi\epsilon_0 R$ ($\epsilon_0 = 8,82 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$), а взаємні ємності дорівнюють 0.

Тоді отримуємо (E_c – одноелектронна зарядова енергія):

$$\tilde{E}_c = \frac{e^2}{C} \Rightarrow C = \frac{e^2}{\tilde{E}_c} = 3,2698 \cdot 10^{-16} \Phi$$

$$Q_0 = 1,2098 \cdot 10^{-16} \text{ Кл}$$

$$N = \frac{Q_0}{e} = 755,102$$

Знак заряду отримали додатнім, це означає, що на острівці були присутні зайві електрони, які після приєднання до електродів пішли з острівця у зовнішнє коло, а сам острівець став позитивно зарядженим.

Дрібність заряду пояснюється тим, що в структурах із проникними бар'єрами хвильові функції електронів не зовсім локалізовані, і електрони не

можуть трактуватися як класичні частинки, тому фракція електрона (і його заряду) може бути виявлена в іншому електроді.

Умови кулонівської блокади у одноелектронному транзисторі:

Позначимо ємності двох тунельних контактів, через які тече струм, як C_1 і C_2 , а ємність переходу затвор - острів, як C_g ; відповідні заряди, як Q_1, Q_2 і Q_g ; число електронів, що проходять через кожен тунельний перехід в напрямку стрілок, як n_1 і n_2 , відповідно. Використовуючи закон Кірхгофа для двох електричних контурів, знаходимо:

$$\begin{aligned}\frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} &= V \\ \frac{Q_g}{C_g} + \frac{Q_2}{C_2} &= V_g\end{aligned}\tag{2.9}$$

Острівцевий електрод "переносить" заряд:

$$-Q_1 + Q_2 - Q_g = -e(n_2 - n_1),\tag{2.10}$$

який змінюється тільки тунелюванням електронів через нього. Повна вільна енергія одноелектронного тріоду дорівнює

$$F(n_1, n_2) = \frac{Q_1^2}{2C_1} + \frac{Q_2^2}{2C_2} + \frac{Q_g^2}{2C_g} - qV - Q_g V_g\tag{2.11}$$

Тут, перші три доданки - зарядові енергії, інші два - роботи, виконані генераторами напруги. q - загальний заряд, "перенесений" генератором напруги V через ланцюг,

$$q = Q_1 + en_1\tag{2.12}$$

Використовуючи наведені рівняння, виключаємо Q_1 , Q_2 і Q_g , замінюючи їх на n_1 , n_2 , V і V_g , таким чином одержуємо:

$$F(n_1, n_2) = \frac{1}{2C_\Sigma} [C_g V_g - e(n_2 - n_1)]^2 - en_1 V \frac{C_2 + C_g}{C_\Sigma} - en_2 V \frac{C_1}{C_\Sigma} + const ,$$

де введена ємність:

$$C_\Sigma = C_g + C_1 + C_2 ,$$

а $const$ - доданки, незалежні від n_1 і n_2 .

Можливість тунелювання залежить від того, збільшується чи зменшується вільна енергія острівця внаслідок тунелювання. Якщо стан системи з меншою вільною енергією існує, то тунелювання можливе. Умова заборони (кулонівською блокадою) тунелювання в контакт 1 полягає в тому, що при цьому вільна енергія збільшиться. Ця умова може бути записана як:

$$F(n_1 \pm 1, n_2) > F(n_1, n_2) \Rightarrow \frac{1}{C_2 + C_g} (Q_g - \frac{e}{2}) < V < \frac{1}{C_2 + C_g} (Q_g + \frac{e}{2}) , \quad (2.13)$$

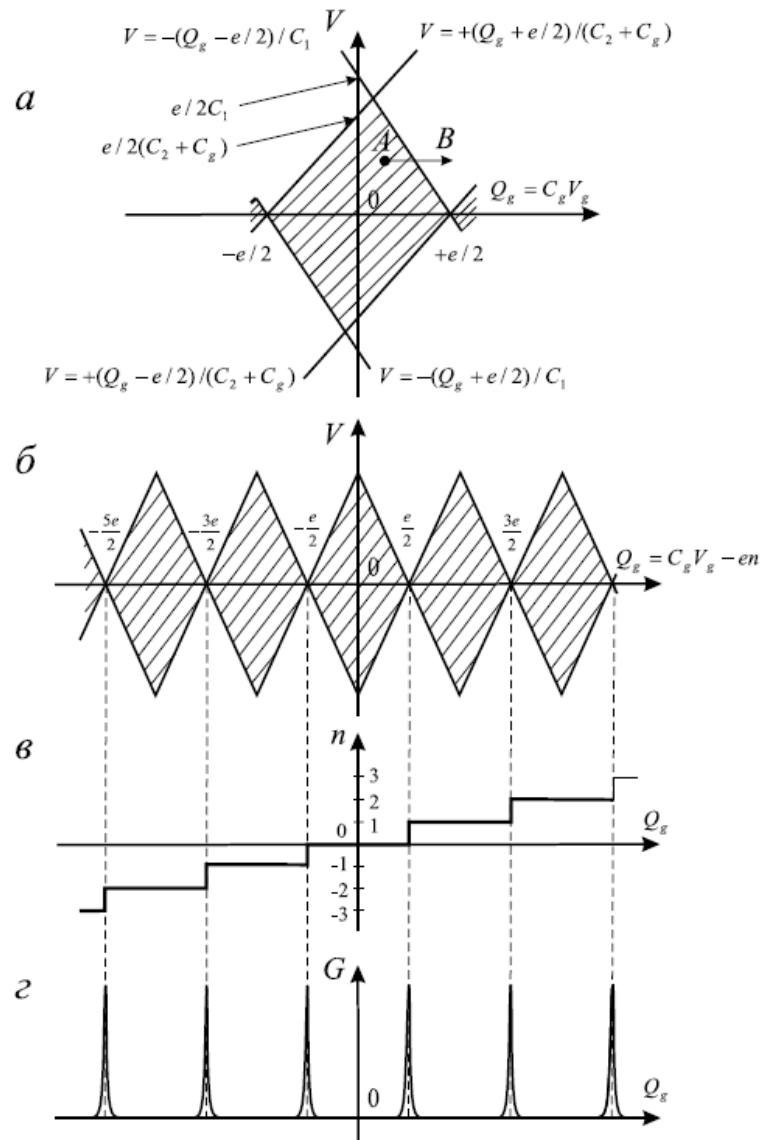
де ми вводимо визначення внутрішнього заряду на гранулі як:

$$Q_g \equiv C_g V_g + e(n_1 - n_2) \quad (2.14)$$

Таким же чином записується умова заборони кулонівською блокадою тунелювання через контакт 2:

$$F(n_1, n_2 \pm 1) > F(n_1, n_2) \Rightarrow \frac{1}{C_1} (Q_g + \frac{e}{2}) < V < -\frac{1}{C_1} (Q_g - \frac{e}{2}) \quad (2.15)$$

Кулонівська блокада ефективна, коли обидві нерівності виконуються. Кулонівська блокада відповідає заштрихованій частині "алмаза" (ромба). Тому при параметрах тріоду, що відповідають точці *A* на рис. 2.5, струм протікати не може. Коли ми збільшуємо напругу затвора V_g , то значення параметрів зміщаються від т. *A* до т. *B*, кулонівська блокада тунельного переходу 2 "проривається" і один електрон тунелює від стоку до гранули (острівцевого електроду) ($n_2 \Rightarrow n_2 + 1$). Якщо виконується нерівність $F(n_1, n_2 + 1) > F(n_1 + 1, n_2 + 1)$, тоді тунелювання через 1 можливе. Отже струм протікає при напрузі затвора, що відповідає т. *B*. Величина заряду на електроді затвора, яка необхідна для включення струму, може бути меншою елементарного заряду e . Тому структура і називається *одноелектронним* тріодом.



а – діаграма («кулонівський алмаз») тріоду, б – розширений кулонівський алмаз: електронне тунелювання блокується в режимі очікування, в – число надлишкових електронів на отрівцевому електроді, г – провідність (кондактанс) тріоду

Рис.2.5 – Кулонівські осциляції («Кулонівський алмаз»)

При зміні напруги затвора V_g провідність міняється періодично, як показано на рисунку 2.5. Це явище називають кулонівськими осциляціями.

В області нульової провідності число електронів n на острівцевому електроді фіксоване. Максимумам провідності (кондактанс) відповідає східчаста зміна n , як показано на рисунку 2.5. Отже східчасте збільшення числа електронів на острові є іншим яскравим проявом кулонівських осциляцій.

2.2 Дослідження вольт-амперної характеристики одноелектронного тріоду

Розглянемо експериментальних приклад одноелектронного тріоду, реалізований на практиці, до складу якого входить затвор з роботи [15]. Досліджувались структури наступного типу: емітер/острівець/колектор: Cu/Al/Cu, Al/Cu/Al і Al/Al/Al. Електроди тріоду доцільно виготовляти з двох різних металів. Широко застосовується Al, тому що тонкий діелектричний шар для тунельного бар'єра може бути легко сформований термічним окислюванням Al. У [15] пробували використовувати Cu і Au, але знайдена сполука Au/Al_x/Al не була стійкою, її тунельний опір мінявся мимовільно в межах від декількох хвилин до декількох годин. Також виявилось, що структура Cu/Al_x/Al ще більш нестійка, ніж Al/Al_x/Al (дрейф параметрів продовжувався більше однієї доби). Було вирішено використовувати мідь і зробити Cu/Al/Cu і Al/Cu/Al. Для тестових цілей також виготовлялися Al/Al/Al. Для виготовлення всіх структур використовувалася фото- і електроннопроменева літографія, плазмове сухе травлення та методика кутового напилення. Схематичне зображення цієї конструкції приводиться на рис. 3.3. Острівцевий електрод зв'язаний з двома масивними електродами (емітер і колектор) невеликими тунельними контактами, а електрод затвора "з'єднаний" з острівцевим електродом ємнісним способом. Напруга затвору на одноелектронному тріоді регулює провідність через обидва контакти, змінюючи електростатичний потенціал острівцевого електрода. Еквівалентна схема такої конструкції показана на рис. 3.4: острівцевий електрод зв'язаний за допомогою двох тунельних контактів з генератором напруги V , що і забезпечує протікання струму. Острівцевий електрод ємнісно зв'язаний з електродом затвора, через який подається напруга V_g .

Таблиця 2.1 – Перелік зразків ОЕТ. Експериментальні значення: E_C – одно електронна зарядова енергія, R_t – опір обох тунельних контактів тріоду, C_g – ємність між острівцевим електродом і затвором. ($a\Phi = 10^{-18}\Phi$)

Структура	E_C [meV]	R_t [МОм]	C_g [aФ]
Cu/Al/Cu	0,478	4,5	11,0
Al/Cu/Al	0,490	5,0	8,0
Al/Al/Al	0,471	3,1	8,4

Таблиця 2.2 – Експериментальні значення фізичних величин напівскінченних зразків металів з плоскою поверхнею. W_0 – робота виходу, r_0 – середня відстань між електронами в металі.

Метал	Валентність	$r_0[a_0]$	$W_0[eV]$
Al	3	2,07	4,28
Cu	2	2,11	4,65

Розрахунки будемо виконувати в атомній системі одиниць, у якій $\hbar = e = m = 4\pi\epsilon_0 = 1$. При цьому 1 атомна одиниця енергії дорівнює 27,21 eV.

Встановимо зв'язок між енергією електронів у острівці, що буде фігурувати в процесах переносу, і енергією в одному з електродів. За початковий стан системи виберемо той, при якому на острівці присутні « n » надлишкових електронів. Будемо вважати, що при тунелюванні повна енергія всіх трьох електродів $\tilde{E}$ не змінюється. Для переходу δn електронів з емітера на острівцець ($\delta n = 1$) маємо:

$$\Delta\tilde{E} = \tilde{\epsilon}^e(-\delta n) + \epsilon_p(+\delta n) + \frac{(-e)^2}{2C_\Sigma}[(n + \delta n)^2 - n^2] - e\delta n\eta V = 0 \quad (2.16)$$

Величина « ηV » є тим потенціалом, який створюють зовнішні електроди при прямому включенні (пряма гілка ВАХ) на острівці, η - фракція напруги.

Для даного одноелектронного тріоду, переходи мають однакову ємність, тому:

$$\eta := 0.5$$

Вираз записаний в результаті енергетичного циклу: сума енергії іонізації електрона з рівня $\vec{\varepsilon}^e$ на емітері (електрична ємність якого дорівнює нулю) і енергії прилипання його на рівень ε_p в острівці ємністю C_Σ , на якому вже знаходяться n надлишкових електронів дорівнює нескінченності. Стрілкою зверху позначаються енергії, що знаходяться в результаті відповідних переходів згідно рис. 2.5.

Для прямої гілки ВАХ з урахуванням контактної різниці потенціалів, користуючись правилом і формулою, маємо:

$$\vec{\varepsilon}^e = \varepsilon_p + U_1 \quad (2.17)$$

При цьому гранула заряджена зарядом Q_0 до прикладення поля. Ми припускаємо, що $n=n(V)$ і $n=0$ при $V=0$, тому будемо трактувати n як число, обумовлене прикладеною напругою:

$$U_1 = -e\delta\phi + \tilde{E}_C(n + \frac{1}{2}) - e(\eta V + \frac{C_g}{C_\Sigma} V_g) \quad (2.18)$$

$$\tilde{E}_C = \frac{e^2}{C_\Sigma}; \quad C_1 = C_1 \equiv C; \quad C_g \ll C \Rightarrow C_\Sigma \cong 2C; \quad \eta = \frac{C_1}{C_\Sigma}.$$

Якщо ж електрон переходить із гранули в емітер, то в результаті іонізації n -го надлишкового електрона острівця і прилипання цього електрона до емітера, маємо:

$$\tilde{\varepsilon}^e = \varepsilon_p + U_2 \quad (2.19)$$

$$U_2 = -e\delta\phi + \tilde{E}_C(n - \frac{1}{2}) - e(\eta V + \frac{C_g}{C_\Sigma} V_g) \quad (2.20)$$

Для переходів острівець - колектор:

$$\tilde{\varepsilon}^c = \varepsilon_p + U_3 \quad (2.21)$$

$$U_3 = -e\delta\phi + \tilde{E}_C(n - \frac{1}{2}) + e(1 - \eta)V \quad (2.22)$$

Для переходів колектор - острівець:

$$\tilde{\varepsilon}^c = \varepsilon_p + U_4 \quad (2.23)$$

$$U_4 = -e\delta\phi + \tilde{E}_C(n + \frac{1}{2}) + e((1 - \eta)V + \frac{C_g}{C_\Sigma} V_g) \quad (2.24)$$

Тунелювання окремого електрона через бар'єр із стану $\varepsilon^{e,c}$ на емітері колекторі в стан ε_p на островці (і навпаки) є завжди випадковою подією, що протікає з визначеною швидкістю Γ - ймовірністю в одиницю часу.

Введемо парціальні сумарні потоки при тунелювання з електродів на острівець (при розрахунку врахуємо, що потоки не повинні мати від'ємних значень):

$$\overrightarrow{w}_n^e = 2 \sum_p \Gamma(\overrightarrow{\varepsilon}^e) f(\overrightarrow{\varepsilon}^e - \mu_V^e) [1 - f(\overrightarrow{\varepsilon}^e - \mu_C^e)],$$

$$\overleftarrow{w}_n^c = 2 \sum_p \Gamma(\overleftarrow{\varepsilon}^c) f(\overleftarrow{\varepsilon}^c - \mu_V^c) [1 - f(\overleftarrow{\varepsilon}^c - \mu_C^c)]$$

і с гранули на електроди:

$$\begin{aligned}\overleftarrow{w}_n^e &= 2 \sum_p \Gamma(\overleftarrow{\varepsilon}^e) [1 - f(\overleftarrow{\varepsilon}^e - \mu_V^e)] f(\overleftarrow{\varepsilon}^e - \overleftarrow{\mu}_C^e), \\ \overrightarrow{w}_n^e &= 2 \sum_p \Gamma(\overrightarrow{\varepsilon}^e) [1 - f(\overrightarrow{\varepsilon}^e - \mu_V^e)] f(\overrightarrow{\varepsilon}^e - \overrightarrow{\mu}_C^e),\end{aligned}$$

де множник «2» обумовлений спіновим виродженням рівнів в електродах. З урахуванням прикладеної напруги спектри (див. (3.22) – (3.42)) автоматично зсуваються в (3.4) і в (3.7): на $-eV$ для колектора і на $-e\eta V$ для гранули; f і $(1 - f)$ - ймовірності того, що стан зайнятий або вільний. Відповідно зсуваються і хімічні потенціали:

$$\begin{aligned}\mu_V^e &\equiv \mu_0^e = -W_0^e, \quad \mu_V^c = \mu_0^c - eV = -W_0^c - eV. \\ \overrightarrow{\mu}_C^e &= \mu^g + U_1, \quad \overleftarrow{\mu}_C^e = \mu^g + U_2. \\ \overrightarrow{\mu}_C^c &= \mu^g + U_3, \quad \overleftarrow{\mu}_C^c = \mu^g + U_4.\end{aligned}$$

У першому наближенні теорії збурень (при малих $|V| \ll |\mu^g|$) хімічний потенціал буде визначатися не тільки формальним зсувом глибини ями, але і числом електронів провідності в даному стані ($n_0 + n$, $n_0 = Q_0/e$). Використання хімічних потенціалів справедливо лише в квазірівноважному (метастабільному) стані, тобто в проміжках між актами тунелювання, коли час релаксації гранули набагато менший цих проміжків.

Нагадаємо, що ми розглядаємо металеві системи, в яких спектр електронів є квазінеперервним. Це означає, що підсумовування по індексу можна замінити інтегруванням, помножуючи вираз на густину станів електронів у острівці, тобто:

$$2 \sum_p \cdots = \int_{U_0 + U_i}^{\infty} d\varepsilon_p \rho \cdots ; \quad \rho = 2^{\frac{1}{2}} m^{\frac{3}{2}} \pi^{-2} \hbar^{-3} \sqrt{\varepsilon_p - U_0 U_i} ,$$

де ε_p – позначає спектр в порядку зростання енергії. Перехід від підсумовування до інтегрування враховує, що спектр стартує від дна потенційної ями глибиною $U_0 + U_i$. Нижній індекс p опускаємо.

$U_0 + U_i$ – це положення дна потенційної ями, відповідної електронам провідності концентрації $\bar{n}$ в зарядженому металевому островці під електричною напругою. Для нейтрального островця у відсутності електричного поля

$$-U_0 = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} - \mu^g ; \quad k_F = (3\pi^2 \bar{n})^{\frac{1}{3}} ; \quad \bar{n} = \left(\frac{4\pi r_s^3}{3}\right),$$

де r_s – середня відстань між електронами у металі (таблична величина). Покажемо, як тепер проводити розрахунки. Нехтуючи енергетичною залежністю тунельних швидкостей Γ , одержимо (див. рис. 2.6):

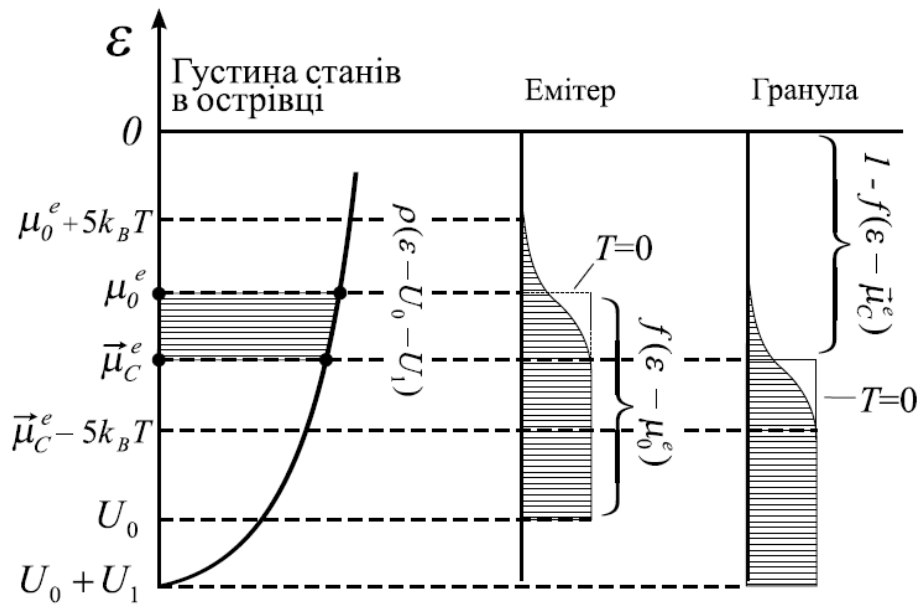


Рис. 2.6 – Енергетична діаграма, для визначення потоку $\vec{W}_n^e$

При $T = 0$ потік є ненульовим лише в діапазоні енергій $\bar{\mu}_C^e < \varepsilon < \mu_0^e$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{w}_n^e &= \Gamma^e \int_{U_0+U_1}^{\infty} \frac{\rho(\varepsilon - U_0 - U_1)}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \mu_0^e)}} \left[1 - \frac{1}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \bar{\mu}_C^e)}} \right] d\varepsilon \simeq \\ &\simeq \frac{2^{1/2} m^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \Gamma^e \int_{\bar{\mu}_C^e - 5k_B T}^{\mu_0^e + 5k_B T} \frac{\sqrt{\varepsilon - U_0 - U_1}}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \mu_0^e)}} \left[1 - \frac{1}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \bar{\mu}_C^e)}} \right] d\varepsilon \end{aligned}$$

Аналогічно:

$$\begin{aligned} \overleftarrow{w}_n^c &= \Gamma^c \int_{U_0+U_4}^{\infty} \frac{\rho(\varepsilon - U_0 - U_4)}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \mu_V^c)}} \left[1 - \frac{1}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \bar{\mu}_C^c)}} \right] d\varepsilon \simeq \\ &\simeq \frac{2^{1/2} m^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \Gamma^c \int_{\bar{\mu}_C^c + 5k_B T}^{\mu_V^c - 5k_B T} \frac{\sqrt{\varepsilon - U_0 - U_4}}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \mu_V^c)}} \left[1 - \frac{1}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \bar{\mu}_C^c)}} \right] d\varepsilon, \\ \overleftarrow{w}_n^e &\simeq \frac{2^{1/2} m^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \Gamma^e \int_{\mu_0^e - 5k_B T}^{\bar{\mu}_C^e + 5k_B T} \left[1 - \frac{1}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \mu_0^e)}} \right] \frac{\sqrt{\varepsilon - U_0 - U_2}}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \bar{\mu}_C^e)}} d\varepsilon, \\ \overrightarrow{w}_n^c &\simeq \frac{2^{1/2} m^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \Gamma^c \int_{\mu_V^c - 5k_B T}^{\bar{\mu}_C^c + 5k_B T} \left[1 - \frac{1}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \mu_V^c)}} \right] \frac{\sqrt{\varepsilon_p - U_0 - U_3}}{1 + e^{\beta(\varepsilon - \bar{\mu}_C^c)}} d\varepsilon. \end{aligned}$$

Позначимо повні потоки електронів з обох електродів на острівця і назад на електроди:

$$w_n^{\text{in}} = \overrightarrow{w}_n^e + \overleftarrow{w}_n^c, \quad w_n^{\text{out}} = \overleftarrow{w}_n^e + \overrightarrow{w}_n^c.$$

Введемо ймовірність P_n перебування n надлишкових електронів на острівці. Вона знаходиться з рішення рівняння

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_n}{\partial t} = & w_{n+1}^{\text{out}} P_{n+1} + w_{n-1}^{\text{in}} P_{n-1} - (w_n^{\text{in}} + w_n^{\text{out}}) P_n \equiv \\ & \frac{1}{-e} \left(\overrightarrow{I_{n+1}^e} + \overleftarrow{I_{n+1}^c} \right) P_{n+1} + \frac{1}{-e} \left(\overleftarrow{I_{n-1}^e} + \overrightarrow{I_{n-1}^c} \right) P_{n-1} - \\ & \frac{1}{-e} \left(\overrightarrow{I_n^e} + \overleftarrow{I_n^e} - \overrightarrow{I_n^c} - \overleftarrow{I_n^c} \right) P_n, \end{aligned}$$

де $\overrightarrow{I^e}$ і $\overleftarrow{I^c}$ – струми через обидва тунельні переходи на острівця $\overleftarrow{I^e}$, $\overleftarrow{I^c}$ – у зворотному напрямку. Зміна P_n визначається приростом і убуттям густини ймовірності. Доданки зі знаком плюс відповідають зростанню ймовірності знайти на островці n електронів. Знак мінус показує, що позначені переходи зменшують ймовірність знайти n електронів (тому що вони це n або збільшують або зменшують). Умова стаціонарності $\partial P_n / \partial t = 0$ приводить до рекурентного співвідношення:

$$P_{n+1} = P_n \frac{w_n^{\text{in}}}{w_{n+1}^{\text{out}}}.$$

Наприклад, припускаючи $n=0$, ми знаходимо ймовірність P_{+1} , виразивши її через P_0 :

$$P_{+1} = P_0 \frac{w_0^{\text{in}}}{w_{+1}^{\text{out}}}.$$

При $n = +1$ ми знаходимо P_{+2} , виразивши через P_{+1} :

$$P_{+2} = P_{+1} \frac{w_{+1}^{\text{in}}}{w_{+2}^{\text{out}}}$$

і використовуючи потім, аналогічно, припускаючи $n = -1$, знаходимо P_{-1} :

$$P_0 = P_{-1} \frac{w_{-1}^{\text{in}}}{w_0^{\text{out}}}$$

і т.д.

Постійний струм, що протікає через квантову гранулу, визначається як:

$$I = -e \sum_{n_{\min}}^{n_{\max}} P_n \left(\overrightarrow{w}_n^e - \overleftarrow{w}_n^e \right) = -e \sum_{n_{\min}}^{n_{\max}} P_n \left(\overrightarrow{w}_n^c - \overleftarrow{w}_n^c \right).$$

В розрахунках достатньо обмежитися $n_{\min} = -3$, $n_{\max} = +3$. Насправді будемо розраховувати приведений струм (безрозмірну величину) $\tilde{I} = I/(eP_0\Gamma^e)$:

$$\tilde{I} = -\frac{1}{P_0\Gamma^e} \left[P_0 \left(\overrightarrow{w}_0^e - \overleftarrow{w}_0^e \right) + \sum_{n \neq 0} P_n \left(\overrightarrow{w}_n^e - \overleftarrow{w}_n^e \right) \right].$$

Оскільки одноелектронний тріод – симетрична конструкція, то її пряма і зворотна гілки є дзеркально симетричними відносно $V = 0$.

$$\overrightarrow{\varepsilon}^e = \varepsilon_p + U_5$$

$$U_5 = -e\delta\phi + \tilde{E}_C(n + 1/2) - e \left((1 - \eta)V + \frac{C_g}{C_\Sigma} V_g \right)$$

$$\overleftarrow{\varepsilon}^e = \varepsilon_p + U_6$$

$$U_6 = -e\delta\phi + \tilde{E}_C(n - 1/2) - e \left((1 - \eta)V + \frac{C_g}{C_\Sigma} V_g \right)$$

Для переходів острівцець–колектор:

$$\overrightarrow{\varepsilon}^c = \varepsilon_p + U_3$$

$$U_7 = -e\delta\phi + \tilde{E}_C(n - 1/2) + e \left(\eta V + \frac{C_g}{C_\Sigma} V_g \right)$$

Для переходів колектор–острівець:

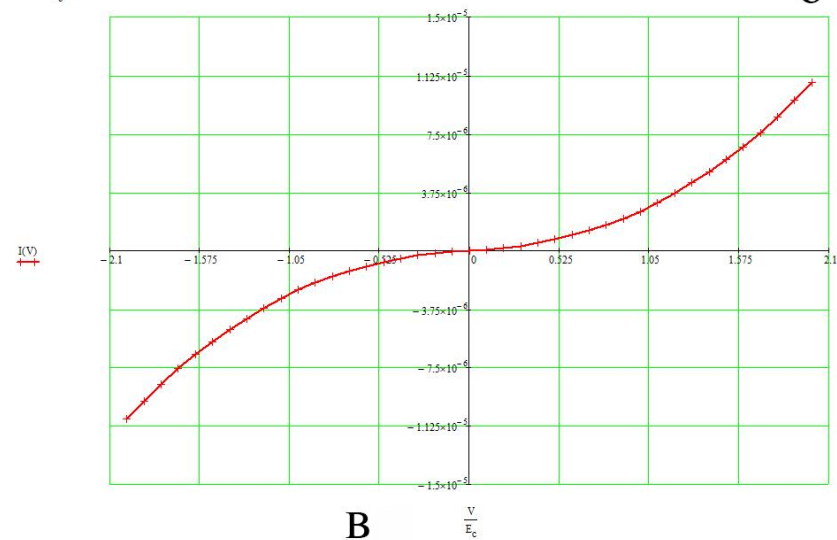
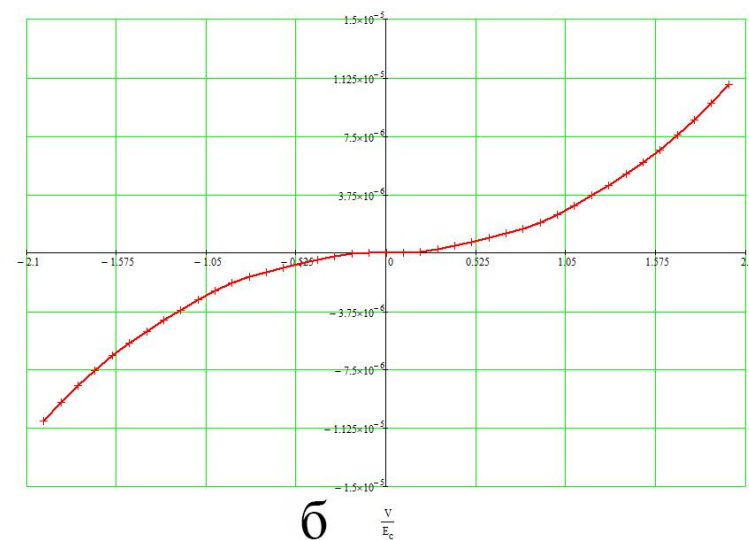
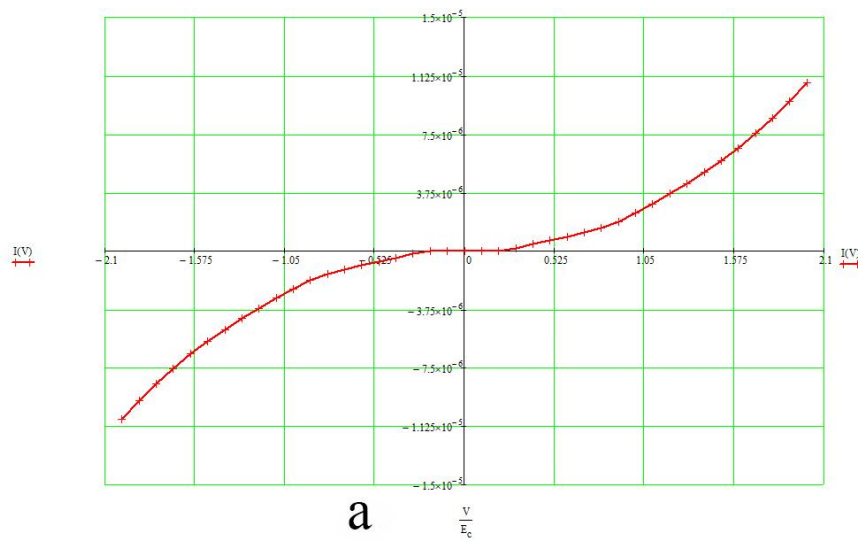
$$\overleftarrow{\varepsilon^c} = \mu_p + U_8$$

$$U_8 = -e\delta\phi + \tilde{E}_C(n + 1/2) + e \left(\eta V + \frac{C_g}{C_\Sigma} V_g \right)$$

Використовуючи також:

$$\begin{aligned} \mu_V^c &\equiv \mu_0^c - eV, & \mu_V^e &= \mu_0^e, \\ \overleftarrow{\mu_C^c} &= \mu^g + U_8, & \overrightarrow{\mu_C^c} &= \mu^g + U_7 \\ \overleftarrow{\mu_C^e} &= \mu^g + U_6, & \overrightarrow{\mu_C^e} &= \mu^g + U_5 \end{aligned}$$

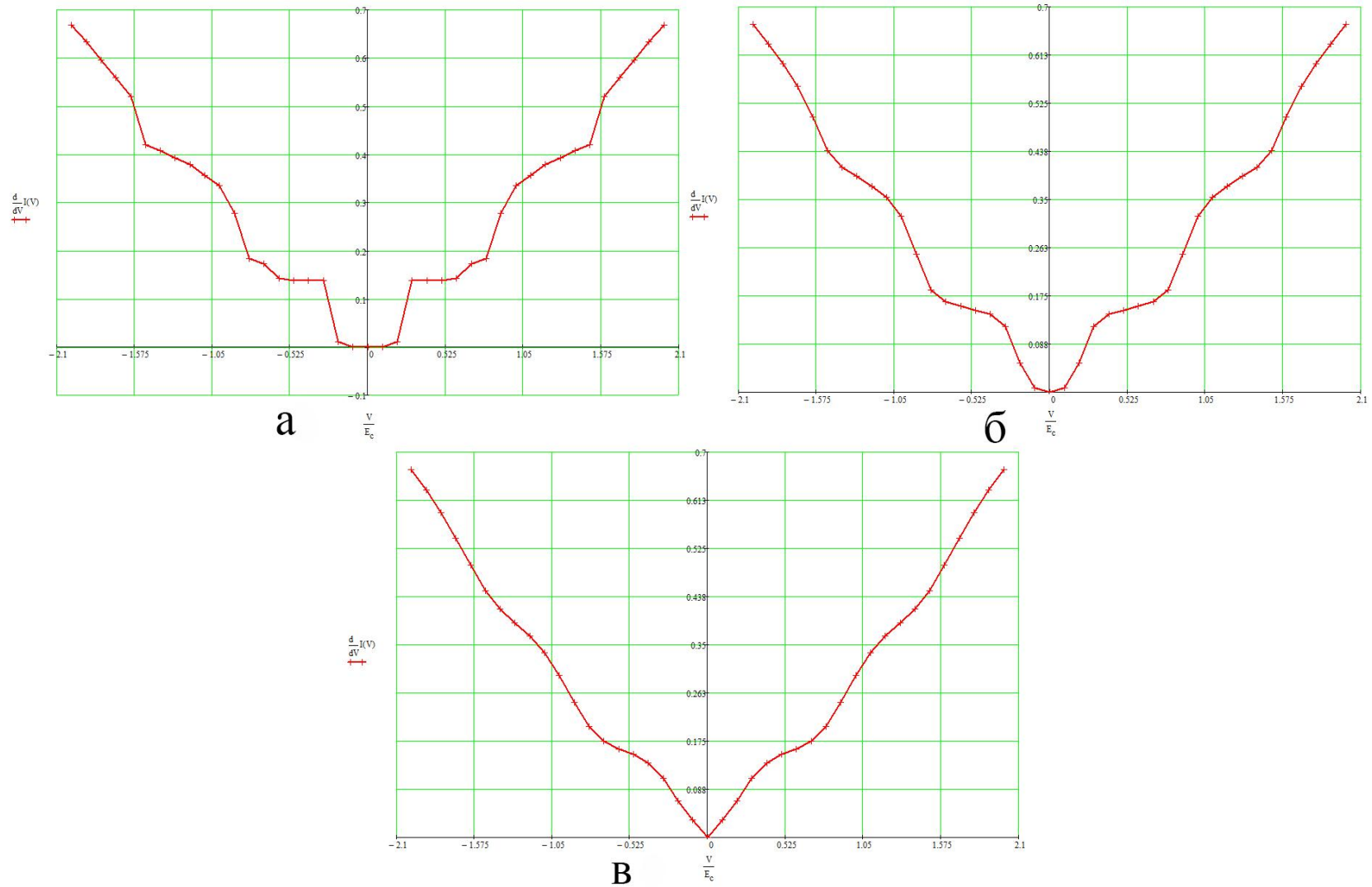
Розраховані залежності $I(V)$, та їх похідні $dI(V)/dV$ для різних ОЕТ та температур приведено і порівняно на рис. 2.7 - 2.14.



а – $kT = 0,01E_c = 2 \text{ K}$; б – $kT = 0,05E_c = 10 \text{ K}$;

в – $kT = 0,1E_c = 20 \text{ K}$

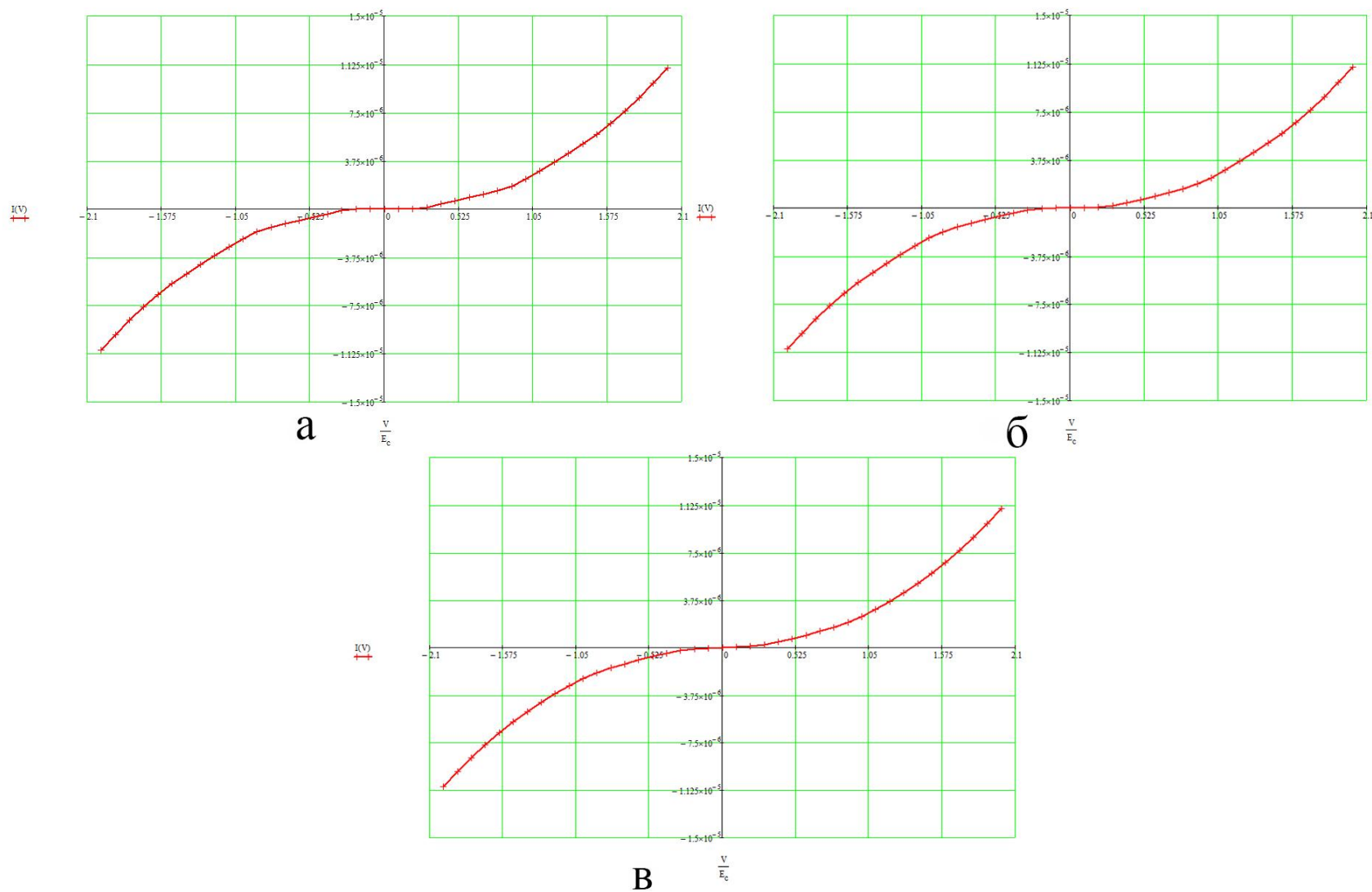
Рисунок 2.7 – Графіки залежності $I(V)$ для $\text{Cu}/\text{Al}/\text{Cu}$



а – $kT = 0,01E_c = 2$ К; б – $kT = 0,05E_c = 10$ К;

в – $kT = 0,1E_c = 20$ К

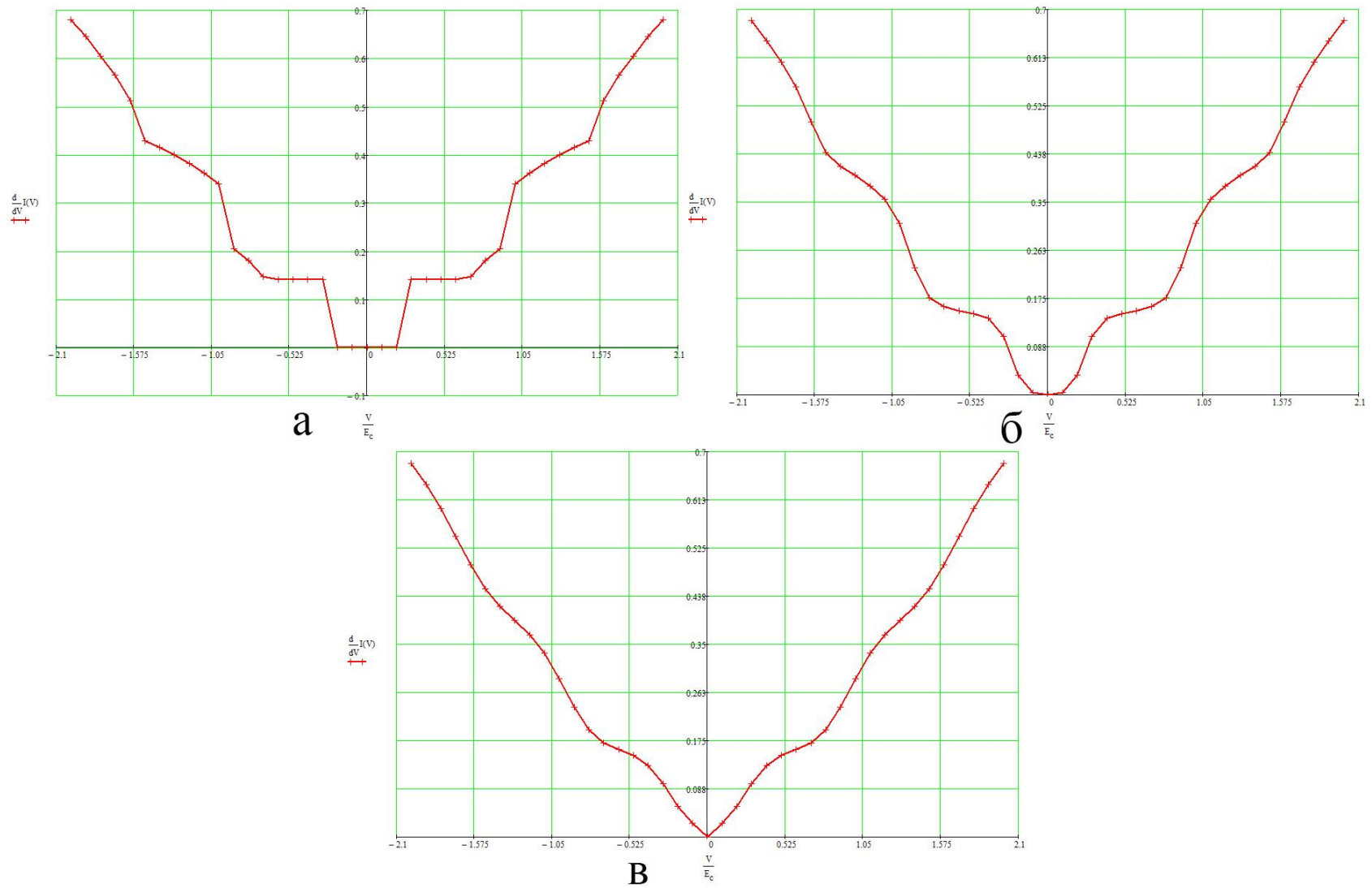
Рисунок 2.8 – Графік залежності $dI(V)/dV$ для Cu/Al/Cu



а – $kT = 0,01E_c = 2 \text{ К}$; б – $kT = 0,05E_c = 10 \text{ К}$;

в – $kT = 0,1E_c = 20 \text{ К}$

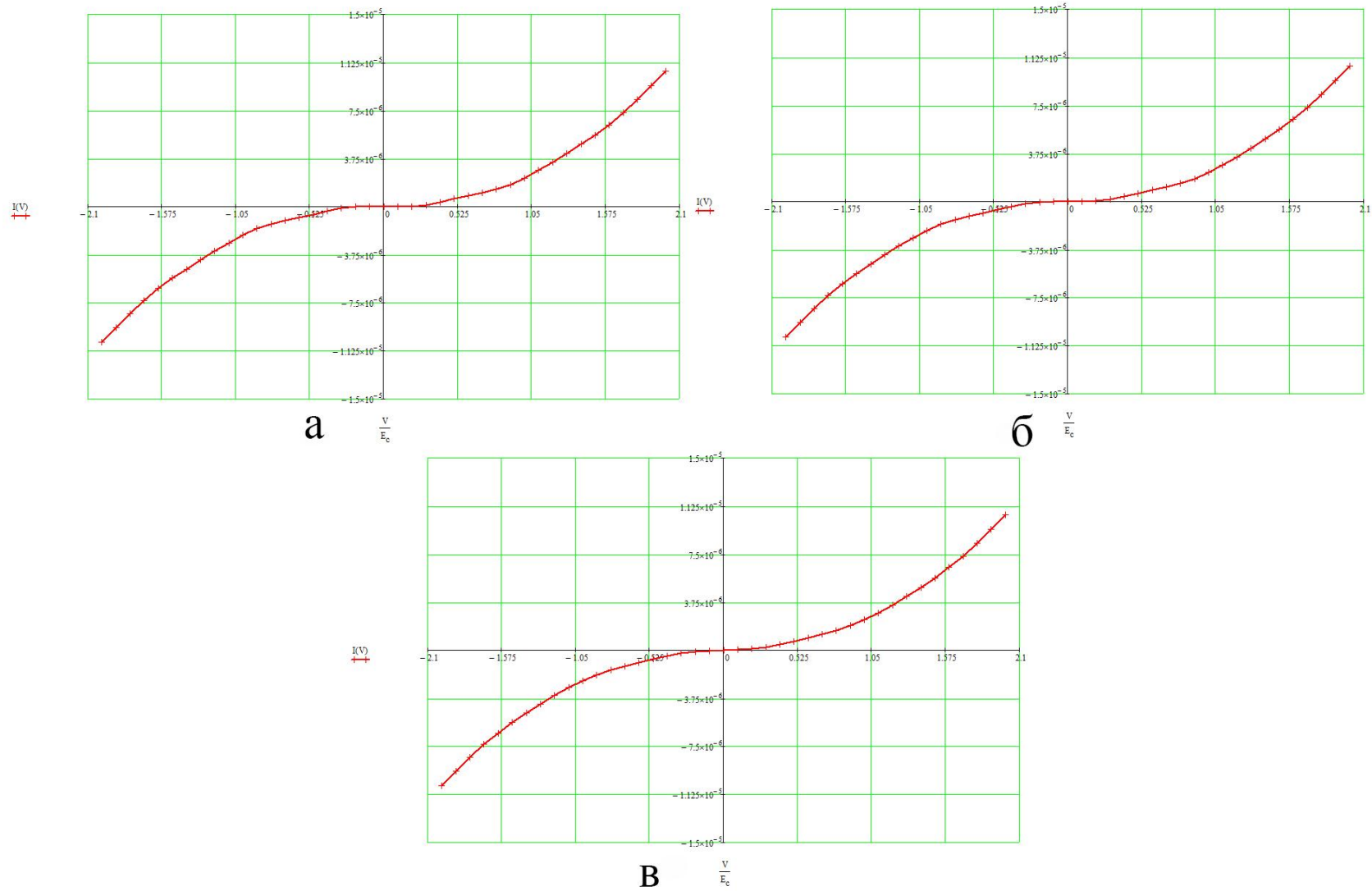
Рисунок 2.9 – Графік залежності $I(V)$ для Al/Cu/Al



а – $kT = 0,01E_c = 2 \text{ K}$; б – $kT = 0,05E_c = 10 \text{ K}$;

в – $kT = 0,1E_c = 20 \text{ K}$

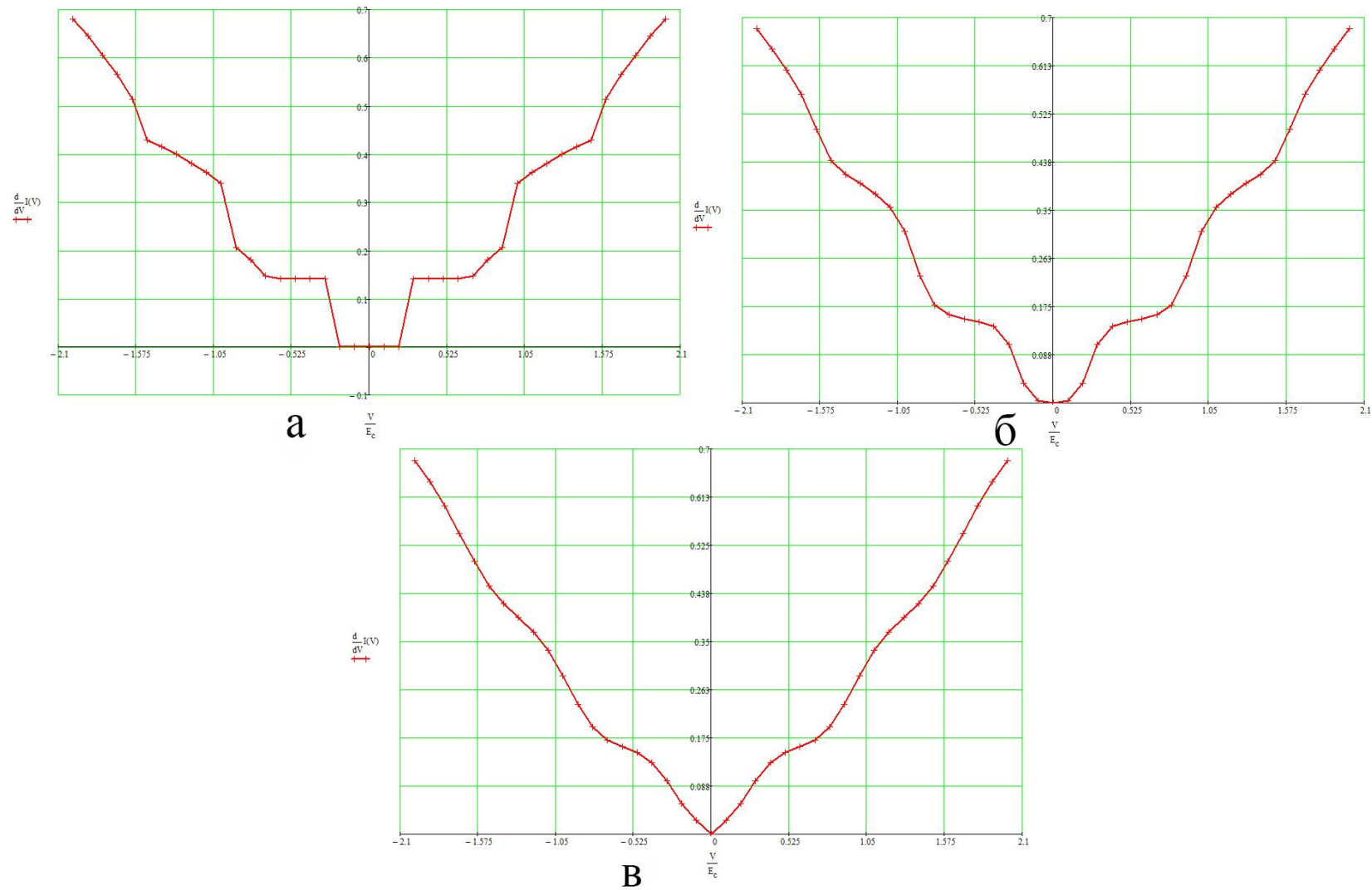
Рисунок 2.10 – Графік залежності $dI(V)/dV$ для Al/Cu/Al



а – $kT = 0,01E_c = 2$ К; б – $kT = 0,05E_c = 10$ К;

в – $kT = 0,1E_c = 20$ К

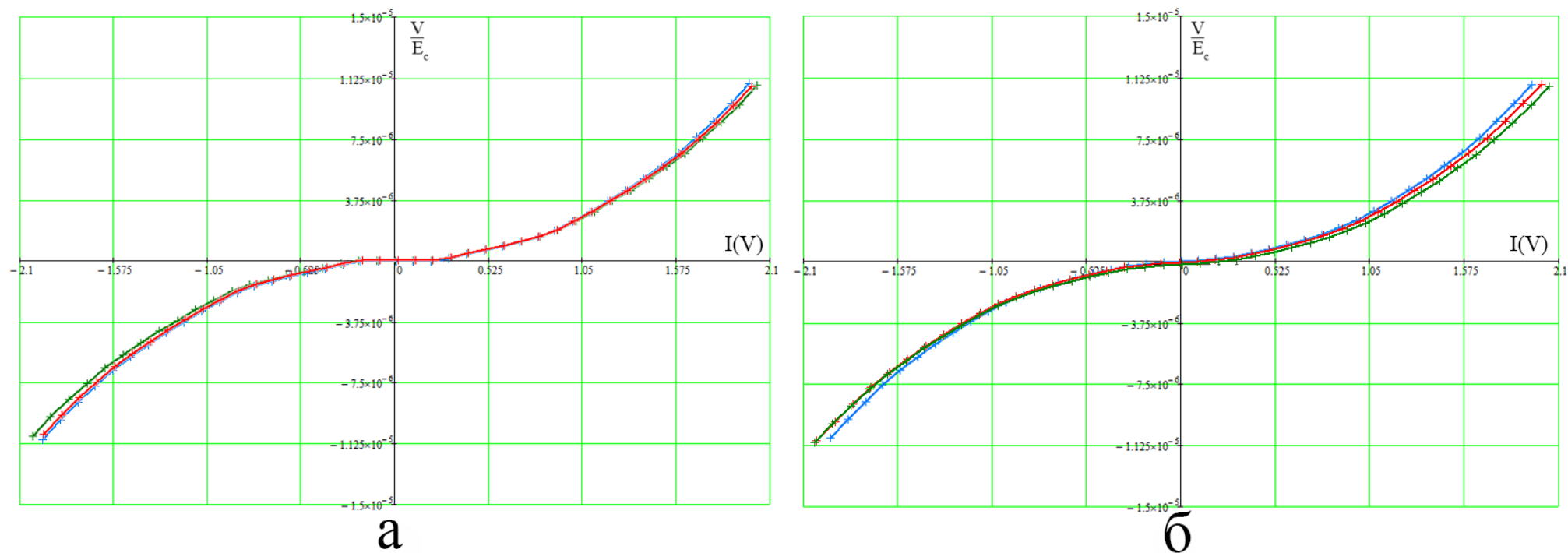
Рисунок 2.11 – Графік залежності $I(V)$ для Al/Al/Al



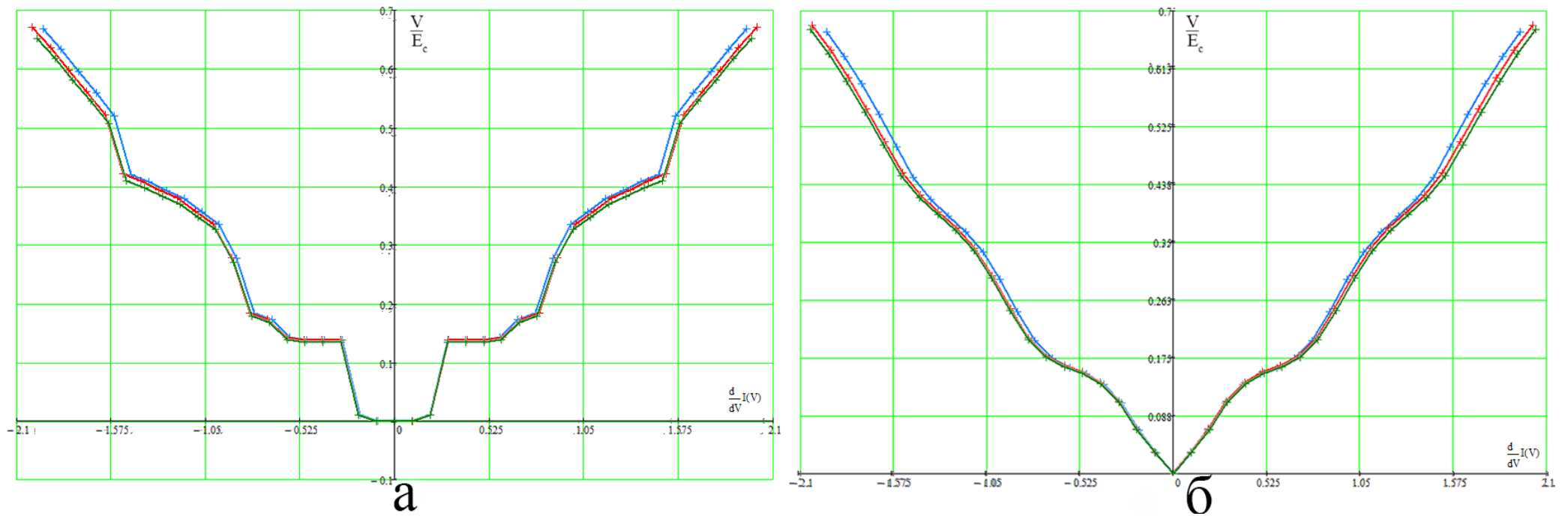
а – $kT = 0,01E_c = 2$ К; б – $kT = 0,05E_c = 10$ К;

в – $kT = 0,1E_c = 20$ К

Рисунок 2.12 – Графік залежності $dI(V)/dV$ для Al/Al/Al



а – $kT = 0,01E_c = 2 \text{ К}$, б – $kT = 0,1E_c = 20 \text{ К}$
 Червоне – Cu/Al/Cu, синє – Al/Cu/Al, зелене – Al/Al/Al
 Рисунок 2.13 – Графік ВАХ для різних структур



а – $kT = 0,01E_c = 2$ К, б – $kT = 0,1E_c = 20$ К

Червоне – Cu/Al/Cu, синє – Al/Cu/Al, зелене – Al/Al/Al

Рисунок 2.14 – Графік похідної ВАХ для різних структур

ВИСНОВКИ

В даній роботі за допомогою розрахунків та побудови графіків в програмному пакеті Mathcad 15 було досліджено вплив температури на вольт-амперну характеристику переходу одноелектронного тріоду. Розрахунки проводилися для температур (зарядових енергій) $kT = 0,01E_c = 2 \text{ К}$, $kT = 0,05E_c = 10 \text{ К}$, $kT = 0,1E_c = 20 \text{ К}$. В результаті було показано, що, для структур тріодів типу Cu/Al/Cu, Al/Cu/Al та Al/Al/Al, вольт-амперні характеристики дуже повільно «випрямляється» при підвищенні температури. При цьому, похідні вольт-амперних характеристик мали більш суттєві зміни під впливом температур. При найменшій температурі вони мали вигляд «сходинок», а при її підвищенні – отримували вигляд близький до параболічного. Це вказує на більшу швидкість тунелювання електронів.

Загалом, дані результати показали, що вольт-амперні характеристики одноелектронного тріоду є досить чутливими до змін температури. При низьких температурах вони змінювалася повільно і стрибкоподібно, показуючи переміщення одиничних електронів. При більш високих температурах – кількість тунельних електронів збільшується, тому збільшується крутизна вольт-амперних характеристик тріода. Також слід зазначити, що метали, з яких конструювалися тріоди, слабо впливали на його характеристики при зарядових енергіях $kT = 0,01E_c = 2 \text{ К}$ і $kT = 0,05E_c = 10 \text{ К}$. Більш помітні зміни з'являлися на інтервалі $kT = 0,1E_c = 20 \text{ К}$. Якщо точніше, тріод структури Al/Cu/Al мав більш круті вольт-амперні характеристики, порівняно з іншими, показуючи більш швидке зростання концентрації тунельних електронів зі збільшенням температури. Структура Al/Al/Al – навпаки, показала більш пологоу ВАХ. Тріод типу Cu/Al/Cu надав вольт-амперні характеристики «середні», порівняно до інших. В цілому, усі три типи однаково реагували на зміну температури.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. **Averin, D.V.** Coulomb blockade of tunneling, and coherent oscillations in small tunnel junctions [Текст] / D.V. Averin, K.K. Likharev // Journal of Low Temperature Physics – 1986. – № 62, с. 345–372
2. **Hermann, G.** Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena In Nanostructures [Текст] / G. Hermann, H. D. Michel. // Журнал Physics Today – 1993. – № 46 (4), с. 62-63
3. Тунельний ефект [Електронний ресурс] : 2019. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9837019/>.
4. **Вакарчук, І. О.** Квантова механіка [Текст] / І.О. Вакарчук ; ЛНУ імені Івана Франка — Львів, 2012. — 872 с. — ISBN 978-966-613-921-7.
5. **Fukui, H.** Single-electron transistor [Текст] / H.Fukui, M.Fujishima, K. Noh // Журнал Jpn. Appl. Phys. – 1997. №36, с. 1
6. Основи нанофізики і нанотехнологій [Текст]: електричний підручник / В.В. Погосов Г.В. Корніч, Є.В. Васютін та інші; Нац. ун-т «Запорізька політехніка». – Запоріжжя, 2008. – 631 с.
7. Нанофізика і нанотехнології [Текст]: навчальний посібник / В.В. Погосов, Ю.А. Куницький, А.В. Бабіч та інші; Нац. ун-т «Запорізька політехніка». – Запоріжжя, 2011. – 384 с.
8. Однофотонный детектор [Електронний ресурс] : 2001. – Режим доступу: <http://www.issp.ac.ru/journal/perst/Control/Inform/perst/2001/120/n.php?file=perst.htm&label=R20>.
9. **Goser, Karl** Nanoelectronics and Nanosystems: From Transistors to Molecular and Quantum Devices [Текст] / Karl Goser, Peter Glösekötter, Jan Dienstuhl ; – Гейдельберг, 2003. – 281 с. – ISBN 978-3-662-05421-5
10. **Sulabha. K.K** Nanotechnology: Principles and Practices [Текст] / Sulabha K. Kulkarni ; – Нью-Делі, 2015. – 403 с. – ISBN 978-3-319-09171-6
11. Silicon Single-Electron Devices and Their Applications. Proceedings of The International Symposium on Multiple-Valued Logic. [Текст]: матеріал

конференції Proceedings of The International Symposium on Multiple-Valued Logic, Портланд, 25-25 травня 2000 р.: тези доповідей / Y. Takahashi, A. Fujiwara та інші – Портланд, 2000. – 20 с.

12. **Kim, Donghwi** Design-Oriented Introduction of Nanotechnology into the Electrical and Computer Engineering Curriculum [Текст] / Kim Donghwi, Kamoua Ridha, Pacelli Andrea // Journal of Educational Technology Systems – 2006. – № 34, с. 155-164

13. **Ткач, О.П.** Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні [Текст] / О.П. Ткач // навчальний посібник / – Суми, 2014. – 127 с.

14. **Santhibhushan, Boddepalli** Single electron devices: concept to realization [Текст] / Santhibhushan Boddepalli, Srivastava Anurag, Anu, Khan Mohd // Advanced Technologies for Next Generation Integrated Circuits / Ashok Srivastava, Saraju Mohanty – 2020. – Гл. 3. – с. 55-87

15. **Погосов, В.В.** Елементи фізики поверхні, наноструктур і технологій [Текст]: навчальний посібник / В.В. Погосов В.В., Курницький Ю.А. ; Нац. ун-т «Запорізька політехніка». – Запоріжжя, 2010. – 365 с.

16. **Поплавко, Ю. М.** Мікроелектроніка і наноелектроніка. Вступ до спеціальності [Текст]: навчальний посібник / Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, В. І. Ільченко ; НТУУ «КПІ», 2010. – 160 с. – ISBN 978-966-622-350-3 .

