МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Фізичний факультет

Кафедра загальної фізики

На правах рукопису

**Назва роботи Назва роботи Назва роботи Назва роботи Назва роботи Назва роботи Назва роботи**

**Галузь знань:** 10 Природничі науки

**Спеціальність**: 104 Фізика та астрономія

**Освітня програма:** Фізика та астрономія

**Кваліфікаційна робота бакалавра**

студента 4 курсу

Шатлик ІЛАМАНОВ

**Науковий керівник**:

доктор фізико-математичних наук,

професор, професор кафедри загальної фізики

Олег ОЛІХ

Робота заслухана на засіданні кафедри загальної фізики та рекомендована до захисту на ЕК, протокол №\_\_\_ від «\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2023р.

Завідувач кафедри загальної фізики проф. Микола БОРОВИЙ

Київ – 2023

**ВИТЯГ**

з протоколу №\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ виконав та захистив кваліфікаційну роботу бакалавра / магістра з оцінкою \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

Голова ЕК \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2023 р.

**АНОТАЦІЯ**

**Шатлик ІЛАМАНОВ.** Назва роботи Назва роботи Назва роботи Назва роботи Назва роботи Назва роботи

*Кваліфікаційна робота бакалавра /магістра за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, освітня програма «Фізика та астрономія». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра загальної фізики. – Київ – 2023.*

**Науковий керівник**: доктор фізико-математичних наук, професор Олег ОЛІХ, професор кафедри загальної фізики.

Розроблені глибокі нейронні мережі, призначені для передбачення концентрації домішкового заліза в кремнієвих структурах за величинами рівня легування та товщини бази, температури і фактору неідеальності або характеристик фотоелектричного перетворення.

**Ключові слова**: фактор неідеальності, структури, SCAPS, кремній, нейронні мережі, вміст заліза, вольт-амперні характеристики.

**SUMMARY**

**FirstName LASTNAME.** Title of the qualification work Title of the qualification work Title of the qualification work Title of the qualification work.

*Master’s / Bachelor qualification in specialty 104 Physics and astronomy, educational program « Physics and astronomy». – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Metal Physics Department. – Kyiv. – 2023*.

**Research supervisor**: Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor Oleg OLIKH, Professor at General Physics Department.

Deep neural networks designed to predict the concentration of impurity iron in silicon structures over the values of doping level and base thickness, temperature and non-ideality factor or photovoltaic transformation characteristics. The corresponding networks were tuned, and the optimum values of the hyperparameters

**Key words**: ideality factor, structures, SCAPS, silicon, neural networks, iron content, current-voltage characteristics

**ЗМІСТ**

[ВСТУП 4](#_Toc129763664)

# ВСТУП

Поведінка елементів та пристроїв при їхньому ввімкненні в електричне коло залежить від електричних параметрів та характеристик. Одним із найпоширеніших методів характеризації елементів кола є визначення їхніх вольт-амперних-характеристик (ВАХ). Найчастіше ВАХ визначає функціональну залежність струму *I* від прикладеної до елемента електричного кола напруги *U*: *I* = *I* (*U*). Проте ВАХ може описувати і обернене співвідношення: залежність падіння напруги на елементі електричного кола від величини струму, що протікає через нього *U* = *U* (*I*). Елементами можуть бути резистор, котушка індуктивності, діод, сонячний елемент, транзистор тощо. Якщо система, яка характеризується, має два контакти, то ВАХ визначається однозначно (при певних зовнішніх умовах, таких як температура чи освітлення). Елементи, що мають більше двох контактів, мають безліч ВАХ. Наприклад, для транзистора ВАХ, пов’язана з проходженням струму та прикладанням різниці напруг між емітером та колектором, буде суттєво залежати від струму бази.

Як правило, вольт-амперну характеристику представляють у вигляді графіку. Нерідко на цій залежності виділяють пряму та зворотну гілки. Перша відповідає тій області, де прикладена до елемента напруга додатна, друга – від’ємна. Залежно від вигляду ВАХ, елементи розділяють на лінійні та нелінійні. Для лінійних елементів ВАХ є прямою лінією, яка проходить через початок координат і описується законом Ома:

, (1)

де R – електричний опір елементу. Фактично, опір обумовлює кут нахилу ВАХ:

. (1)

Величину, обернену до опору, називають електричною провідністю G:

. (1)

Для лінійного елементу характерною ознакою є те, що його опір не залежить від величини струму, що протікає через нього (не залежить від величини прикладеної напруги). Прикладом лінійного елементу може бути резистор, для якого пряма та зворотна гілки ВАХ тотожні (з точністю до зміни знаку напруги та сили струму). Водночас, опір резистора залежить від температури і тому вигляд ВАХ буде модифікуватися внаслідок нагріву елементу. Для металевих та дротяних резисторів опір зі збільшенням температури незначно зростає, причому залежність R = R (T) практично лінійна. Опір напівпровідникових резисторів може залежати від температури значно сильніше, зменшуючись при її підвищенні за експоненційним законом.

Для нелінійних елементів вигляд ВАХ є складнішим, що пов’язано із непостійністю величини опору (провідності) при проходженні впорядкованого руху заряджених частинок різної інтенсивності. В цьому випадку для характеризації елементу доцільно використовувати диференційний опір, який описує властивості системи при певному значенні сили струму (певному значенні прикладеної напруги)

 (1)

або диференційну провідність

. (1)

Тобто диференційний опір (диференційна провідність) визначаються похідною вольт-амперної характеристики, яка також може бути представлена у вигляді графіку Rd = Rd (U). Графічно диференційні параметри визначаються тангенсом кута нахилу ВАХ в околі певної напруги (наприклад, в області робочої ділянки приладу). Звичайно, диференційний опір можна визначити і для лінійних елементів: в цьому випадку Rd залишатиметься сталим (і рівним R), а графік Rd = Rd (U) матиме вигляд прямої лінії, паралельної осі напруг.

Ступінь нелінійності ВАХ нелінійних елементів визначається коефіцієнтом нелінійності:

. (1)

В загальному випадку, коефіцієнт нелінійності також залежить від прикладеної до елемента напруги. Для лінійних елементів К = 1.

Прикладами елементів з істотно нелінійним ВАХ є діод, транзистор, стабілітрон. Наприклад, для діоду ВАХ в ідеалізованому випадку описується виразом

, (1)

де I0 – струм насичення (для діоду з p-n переходом залежить від концентрації да довжини вільного пробігу неосновних носіїв), е – елементарний заряд, k – стала Больцмана, Т – температура.

Нерідко для нелінійних елементів ВАХ не є симетричною відносно зміни знаку напруги, тобто пряма та зворотні гілки не тотожні і випрямляючий діод є типовим прикладом саме такого елементу. Проте можливі ситуації, коли нелінійні ділянки ВАХ при прямому та зворотньому зміщенні однакові: наприклад, подібна ситуація спостерігається для резонансно-тунельного діоду.

Послідовне з’єднання резисторів відповідає випадку, коли кінець першого з них з’єднується з початком другого, кінець другого – з початком третього і т.д. При послідовному з’єднанні їхній опір додається. При паралельному з’єднанні початки всіх резисторів з’єднуються в одній точці, а кінці – в іншій. В цьому випадку додаються величини, обернені опорам (провідності).

Для того, щоб побудувати ВАХ необхідно прикладати до елементу відомі значення напруги та фіксувати величини сили струму, що проходять при цьому через елемент. Виконуємо заміри та наносимо точки на графік.