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 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](#_Toc129963288)

[Розділ 1. Огляд літератури 6](#_Toc129963289)

[1.1. Основні властивості вольт-амперних характеристик 6](#_Toc129963290)

[1.2. Загальна інформація про платформу Arduino 10](#_Toc129963291)

[Розділ 2. Методика роботи 12](#_Toc129963292)

[2.1 Загальна схема вимірювання вольт-амперних характеристик 12](#_Toc129963293)

[2.2 Кероване джерело живлення 12](#_Toc129963294)

[2.2 Вимірювальні елементи 13](#_Toc129963295)

[2.4 Керуючий елемент 15](#_Toc129963296)

[Розділ 3. Отримані результати 16](#_Toc129963297)

[3.1 Особливості реалізації лабораторної роботи 16](#_Toc129963298)

[3.2 Порядок виконання роботи та результати тестових вимірювань 16](#_Toc129963299)

[Висновки 17](#_Toc129963300)

[Список використаних джерел 18](#_Toc129963301)

[Додаток 1. Лістинг програми, що записується у мікроконтроллер 19](#_Toc129963302)

# ВСТУП

Практично всі досягнення людства пов’язані зі здатністю досліджувати навколишній світ, визначати його особливості та використовувати їх для власних потреб. Найпоширенішим способом отримання інформації про довкілля є проведення експериментальних досліджень. Здатності працювати з вимірювальними приладами та обладнанням, а також виконувати різноманітні експерименти є одними з найголовніших компетентностей, які має отримати учень в результаті вивчення курсу фізики в середній школі. Вони є основою таким програмних результатів навчання школярів як отримання базових навичок експериментальних досліджень, розуміння та здатності аналізувати та пояснювати результати, отримані в результаті експерименту, умінь отримувати експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій. Насамперед досягненню цієї мети сприяє проведення лабораторних робіт з різних частин фізики.

Окреме місце займає частина шкільного практикуму, яка стосується вивчення електричних властивостей матеріалів та пристроїв. Це пов’язано з тим, що переважаюча частина всіх тих інструментів, які використовує людина для забезпечення свого комфортного існування та проведення різноманітної професійної діяльності, базуються саме на використанні процесів проходження електричного струму та явищ, які супроводжують цю фізичну подію. Зокрема надзвичайно важливу інформацію можна отримати з дослідження вольт-амперних характеристик різноманітних електричних елементів.

Класичний підхід до забезпечення проведення лабораторних робіт з курсу електрики передбачає необхідність придбання великої кількості різноманітного обладнання: джерела струму, вольтметри, амперметри, осцилографи, мультиметри тощо. Як правило всі ці прилади є високовартісними та вимагають окремих площ для свого зберігання. Водночас у наше повсякденне життя все ширше входять різноманітні мікроконтроллерні елементи, які мають мініатюрні розміри, дешеві та не споживають значної енергії. Зокрема апаратна обчислювальна платформа Arduino надзвичайно широко використовується для створення різноманітних автономних інтерактивних об'єктів через свої надзвичайно широкі можливості, передбачає спрощене програмування та використання програмного забезпечення з відкритим кодом, забезпечується великою кількістю програмних бібліотек, що знаходяться у широкому доступі.

У зв’язку з цим метод цієї дипломної роботи було розробка лабораторної роботи для вимірювання вольт-амперних характеристик з використанням мікроконтроллерної платформи Arduino. Необхідне для цього обладнання є дешевим (загальна вартість знаходиться в околі 10 доларів США), невеликим за розміром (співмірне з розміром мобільного телефону) та універсальним (може використовуватися і для інших лабораторних робіт). Сама лабораторна робота може виконуватися як з використанням персонального комп’ютера, так і смарфона зі спеціальним програмним забезпеченням, що є у вільному доступі. Крім того, виконуючи подібну роботу, школярі окрім компетентностей, вказаних раніше, отримують навички роботи з мікроконтроллерами, що є надзвичайно важливим у сучасному світі.

# Розділ 1. Огляд літератури

## 1.1. Основні властивості вольт-амперних характеристик

Однією з властивостей речовин є електропровідність, яка виникає в електричному полі та пов’язана зі здатністю проводити електричний струм [1]. Електропровідність властива будь-яким речовинам, проте для того, щоб вона досягала значних величин необхідно наявність вільних носіїв заряду. Такими частинками можуть бути електрони, дірки, йони, куперівські пари тощо. Іншим визначальним фактором, окрім концентрації носіїв заряду, є процеси їхнього розсіяння під час руху, викликаним зовнішнім електричним полем. Розсіяння відбувається на неоднорідностях, які можуть бути пов’язані зі змішеннями атомів гратки від положень рівноваги (тепловими коливаннями), дефектами кристалічної структури, наявністю різноманітних границь розділу та зв’язаних з ними потенціальними бар’єрами. Прикладення напруги до речовини чи певного функціонального пристрою не лише викликає руху носіїв заряду, але й може видозмінювати внутрішню структуру і тому дослідження провідності як функції напруженості зовнішнього електричного поля дозволяє отримувати надзвичайно важливу інформацію щодо цілої низки параметрів.

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.

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 (рис.1.1а) і описується законом Ома:

, (1)

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис.1.1 Типові ВАХ резистора (а) та діода (б) | |

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 див. рис.1.1б. 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) - рис.2. 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 – див.рис.1.3. Для лінійних елементів К = 1.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис.1.2 Типові залежності диференційного опору для резистора (а) та діода (б) від прикладеної напруги. Для частини б вісь ординат має логарифмічний масштаб. | |
|  |  |
| Рис.1.3 Типові залежності коефіцієнта нелінійності для резистора (а) та діода (б) від прикладеної напруги | |

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 (рис.1.1б) 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.

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 – рис.1.4.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.1.4 Типові залежності струму колектора від напруги між колектором та емітером для біполярного транзистора при різних значеннях струму бази |

## 1.2. Загальна інформація про платформу Arduino

# Розділ 2. Методика роботи

## 2.1 Загальна схема вимірювання вольт-амперних характеристик

Для побудови ВАХ необхідно прикладати до досліджуваного елементу відомі значення напруги та фіксувати величини сили струму, що проходять при цьому через нього. Загальна схема в цьому випадку виглядатиме так, як показано на рис.2.1. При цьому на рисунку елемент, ВАХ якого потрібно виміряти, стандартно позначено як DUT (device under testing).

|  |
| --- |
|  |
| Рис.2.1 Схема для вимірювання ВАХ. 1 – DUT, 2 – регульоване джерело живлення, 3 – амперметр, 4 - вольтметр |

Як видно з рисунку, необхідними елементами є кероване джерело живлення, що дозволяє змінювати різницю потенціалів, прикладену до DUT та два вимірювальні пристрої, що дозволяють визначати безпосередньо силу струму (амперметр) та падіння напруги на досліджуваній системі (вольтметр). Крім того, потрібно забезпечити можливість зчитування результатів вимірювання. Розглянемо вибрані для реалізації роботи елементи детальніше.

## 2.2 Кероване джерело живлення

Враховуючи, що як основний керуючий елемент у лабораторній роботі передбачено використовувати мікроконтролерну плату Arduino, найкращим варіантом керованого джерела живлення виглядає цифрово-аналоговий перетворювач (ЦАП). Взявши до уваги необхідність малого розміру пристрою, невисоку вартість, низьке енергоспоживання та не надто високі вимоги до навантажувальної здатності було прийнято рішення використати мікросхему МСР4725 [3]. Це 12-бітний ЦАП, напруга живлення VDD якого складає від 2,7 до 5,5 В, а споживаний струм – до 50 мА. Можлива вихідна напруга знаходиться в діапазоні від потенціалу виводу VSS, який, як правило заземляється, до VDD, причому точність її встановлення дорівнює (VDD - VSS) / 4096. Тобто, при живленні 5 В можливий крок зміни напруги приблизно дорівнює 1,2 мВ. Час встановлення вихідної напруги – 6 мкс, максимальний вихідний струм 25 мА. Схема здатна працювати в діапазоні температур від -40°С до 125°С. На рис.2.2 наведена блок-діаграма цього пристрою.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.2.2 Блок-діаграма ЦАП МСР4725. Рисунок взятий з офіційного опису [4]. |

Керування пристроєм здійснюється за допомогою передачі команд по стандартній шині Ι2С. Відповідна адреса пристрою може бути змінена шляхом приєднання одного з виводів мікросхеми до землі чи напруги живлення.

## 2.2 Вимірювальні елементи

Для забезпечення вимірювань сили струму та напруги було вирішено використати монітор струму та потужності INA226 [5]. Цей датчик дозволяє вимірювати постійну напругу, силу струму, що проходить через навантаження, а також обчислювати потужність. Пристрій працює при напрузі живлення складає від 2,7 до 5,5 В, споживаючи до 420 мкА. Робочий діапазон температур від -40°С до 125°С. Він містить 16-розрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), час конвертації якого може бути змінено від 140 мкс до 8,2 мс. Пристрій здатен вимірювати напругу в діапазоні від 0 до 36 В з роздільною здатністю 1,25 мВ. Вхідний опір під час таких вимірювань – 830 кОм. Вимірювання струму грунтується на визначенні падіння напруги на шунтуючому опорі Rsh, величину якого можна змінювати під час налаштування схеми. Діапазон допустимих падінь напруги на цьому опорі становіть від -81,9175 мВ до 81,9 мВ, що дозволяє визначати силу струму з роздільною здатністю 2,5 мкВ / Rsh. Монітор може бути використаний як з нижнім (Low-Side Sensing), так і з верхнім (High-Side Sensing) розташуванням датчика струму – див. рис.2.3.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.2.3 Блок-діаграма INA226 та можливі розташування датчика струму. Рисунок взятий з офіційного опису [5]. |

Передача команд на проведення вимірювань, встановлення режиму роботи, а також зчитування результатів вимірів відбувається з використанням шина Ι2С. В залежності від приєднання двох спеціальних пінів адреса пристрою може змінюватися від від 0х40 до 0х4F.

## 2.4 Керуючий елемент

Як вже неодноразово зазначалося, елементом, який забезпечує узгоджену роботу всіх пристроїв, а також взаємодію з людиною, було вибрано платформу Arduino. Проте, враховуючи існуюче різноманіття подібних систем, необхідно було вибрати конкретну платформу. Вимоги, які висувалися в нашому випадку, була достатньо низькими: здатність живити мікросхеми MCP4725 та INA226 та можливість підтримки протоколу І2С. Цим умовам задовольняє практично будь-яка система і тому для реалізації проєкту було вибрано стандартний варіант Arduino Uno, зовнішній вигляд якої представлений на рис.2.4.

|  |
| --- |
| Arduino Uno Rev3 |
| Рис.2.4 Зовнішній вигляд Arduino Uno. Рисунок взято з офіційного сайту [6]. |

Зокрема для цієї плати з використанням стандартної бібліотеки Wire зв’язок по інтерфейсу І2С може реалізовуватися з використанням виходів А4 (SDA шина) та А5 (SCL шина).

# Розділ 3. Отримані результати

## 3.1 Особливості реалізації лабораторної роботи

## 3.2 Порядок виконання роботи та результати тестових вимірювань

Виконуємо заміри та наносимо точки на графік.

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).

# Висновки

# Список використаних джерел

[1] Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики. Том 2. Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 2001.-452 с.

[2]

[3] https://www.microchip.com/en-us/product/MCP4725

[4] https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MSLD/ProductDocuments/DataSheets/MCP4725-Data-Sheet-20002039E.pdf

[5] https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf

[6] https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3

# Додаток 1. Лістинг програми, що записується у мікроконтроллер

/\* підключення потрібних бібліотек \*/

#include <Wire.h>

#include <Adafruit\_MCP4725.h>

#include <INA226.h>

Adafruit\_MCP4725 dac;

INA226 ina;

#define KEYPIN 7

const float Rshunt = 55.09; // величина використаного шунтуючого опору

const float maxVoltage = 4.92625; // максимальна напруга ЦАП

int State = 0;

float V = 4;

int StepCount = 1;

void SetVoltageValue(float V);

float MeasureCurrentInmkA(void);

void IVcharMeasurement(float maxV, int StepCount);

void setup(void) {

pinMode(KEYPIN, INPUT\_PULLUP);

dac.begin(0x61);

ina.begin(0x45);

Serial.begin(9600);

Serial.println("Hello!");

Serial.println("To begin push the button");

Serial.println("------------------------------------");

}

void loop(void) {

while (digitalRead(KEYPIN) != HIGH) {

switch (State) {

case 0:

Serial.println("Input high voltage value (high limit is 4.8 V)");

Serial.println("Send value and push the button");

State = 1;

break;

case 1:

if (Serial.available() > 0) {

V = Serial.parseFloat();

Serial.print("You input ");

Serial.print(V, 3);

Serial.println(" V");

Serial.println("To continue push the button");

if ((V > 0) && (V <= 4.8)) {

State = 2;

Serial.println("------");

} else {

Serial.println("It is WRONG value!!!!");

State = 0;

}

} else {State = 0;}

break;

case 2:

Serial.println("Input step number ( >0 )");

Serial.println("Send value and push the button");

State = 3;

break;

case 3:

if (Serial.available() > 0) {

StepCount = Serial.parseInt();

Serial.print("You input ");

Serial.println(StepCount);

Serial.println("To continue push the button");

if (StepCount > 0) {

State = 4;

Serial.println("------");

} else {

Serial.println("It is WRONG value!!!!");

State = 2;

}

} else {State = 2;}

break;

case 4:

IVcharMeasurement(V, StepCount);

State = 0;

Serial.println("To continue push the button");

break;

}

delay(500);

}

delay(10);

}

void SetVoltageValue(float V) {

if ((V > maxVoltage) || (V > maxVoltage)) return;

dac.setVoltage(round(V / maxVoltage \* 4095), false);

}

float MeasureCurrentInmkA(void) {

return ina.readShuntVoltage() / Rshunt \* 1e6;

}

void IVcharMeasurement(float maxV, int StepCount) {

float VoltageStep = maxV / StepCount;

float Volt = 0;

float CurrFon = 0;

float Curr = 0;

while (Volt < maxV \* 1.01) {

SetVoltageValue(Volt);

delay(200);

ina.configure(INA226\_AVERAGES\_16, INA226\_BUS\_CONV\_TIME\_1100US, INA226\_SHUNT\_CONV\_TIME\_1100US, INA226\_MODE\_BUS\_CONT);

delay(50);

Serial.print("Voltage: ");

Serial.print(ina.readBusVoltage(), 3);

Serial.println(" V");

ina.configure(INA226\_AVERAGES\_16, INA226\_BUS\_CONV\_TIME\_1100US, INA226\_SHUNT\_CONV\_TIME\_1100US, INA226\_MODE\_SHUNT\_CONT);

delay(50);

Curr = MeasureCurrentInmkA();

if (Volt == 0) CurrFon = Curr;

Serial.print("Current: ");

Serial.print(Curr - CurrFon, 3);

Serial.println(" mkA");

Serial.println("----------------------");

delay(4000);

Volt += VoltageStep;

}

SetVoltageValue(0);

delay(50);

Serial.println("Measurement is done!!!");

}