МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Фізичний факультет

Кафедра загальної фізики

На правах рукопису

**Оцінка забруднення залізом кремнієвих сонячних елементів за допомогою глибоких нейронних мереж**

**Галузь знань:** 10 Природничі науки

**Спеціальність**: 104 Фізика та астрономія

**Освітня програма:** Фізика наносистем

**Кваліфікаційна робота магістра**

студента 2 року навчання

ЗАВГОРОДНЬОГО О.В

**Науковий керівник**:

доктор фізико-математичних наук,

доцент, доцент кафедри загальної фізики

ОЛІХ О.Я

Робота заслухана на засіданні кафедри фізики металів та рекомендована до захисту на ЕК, протокол №\_\_\_ від «\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2022р.

Завідувач кафедри загальної фізики БОРОВИЙ М.О

Київ – 2022

**ВИТЯГ**

з протоколу №\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

засідання Екзаменаційної комісії

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

Голова ЕК \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2022 р.

**АНОТАЦІЯ**

**Олексій Завгородній.** Оцінка забруднення залізом кремнієвих сонячних елементів за допомогою глибоких нейронних мереж

*Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, освітня програма «Фізика наносистем». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра фізики металів. – Київ – 2022.*

**Науковий керівник**: доктор фізико-математичних наук, доцент ОЛІХ О.Я, доцент кафедри загальної фізики.

Розроблені глибокі нейронні мережі, призначені для передбачення концентрації рекомбінаційно-активних домішок в кремнієвих структурах за величинами фактору неідеальності, рівня легування та товщини бази і температури. Проведено налаштування відповідних мереж, визначено оптимальні значення гіперпараметрів. Показана можливість розроблених нейронних мереж визначати концентрацію заліза в кремнієвих сонячних елементах, спираючись як на синтетичні, так і експериментально виміряні вольт-амперні характеристики.

**Ключові слова**: фактор неідеальності, машинне навчання, структури, SCAPS, кремній, нейронні мережі, забруднення залізом.

**SUMMARY**

**Oleksii Zavhorodnii.** Assessment of iron contamination in silicon solar cells using deep neural networks

*Master’s qualification in specialty 104 Physics and astronomy, educational program «Physics of nanosystems». – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Metal Physics Department. – Kyiv. – 2022*.

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

Deep neural networks designed to predict the concentration of recombination-active impurities in silicon structures by the value of the non-ideality factor, doping level and base thickness and temperature were developed. The corresponding networks were tuned and the optimal values of hyperparameters were determined. The ability of the developed neural networks to determine the iron concentration in silicon solar cells, based on both synthetic and experimentally measured volt-ampere characteristics, is shown.

**Key words**: non-ideality factor, machine learning, structures, SCAPS, silicon, neural networks, iron contamination.

ЗМІСТ

[Вступ 3](#_Toc99920640)

[II. Методика досліджень 5](#_Toc99920641)

[2.1 СХЕМА ПІДХОДУ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ 5](#_Toc99920642)

[5](#_Toc99920643)

[Рис. 1 Схема підходу на основі глибокого навчання для прогнозування концентрації заліза. 5](#_Toc99920644)

[2.2 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО СТРУКТУРУ ТА РОЗРАХУНОК 6](#_Toc99920645)

[2.3 МОДЕЛІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ 10](#_Toc99920646)

[III. результати та їх обговорення 13](#_Toc99920647)

[3.1 Назва підрозділу 3.1 15](#_Toc99920648)

[3.2 Назва підрозділу 3.2 15](#_Toc99920649)

[3.3 Назва підрозділу 3.3 15](#_Toc99920650)

[висновки 16](#_Toc99920651)

[список використаної літератури 17](#_Toc99920652)

[ДОДАТКИ 20](#_Toc99920653)

Вступ

Контроль забруднення металами залишається важливим завданням при обробці кремнію в мікроелектроніці і виробництві сонячних елементів (СЕ) [1-4]. Зазвичай дефекти, пов'язані з металами, характеризуються за допомогою інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є, електронного парамагнітного резонансу, перехідної спектроскопії глибокого рівня (DLTS), DLTS Лапласа і так далі [5-7] Проте ці методи займають багато часу і вимагають спеціального устаткування і/або спеціально підготовлених зразків. В той же час швидким стандартним методом визначення характеристик СЕ, широко використовуваним сьогодні в промисловості, є виміри струму-напруги (IV).

Характеристики IV містять важливу інформацію про електрично активні дефекти [5,8]. Дослідники пропонують декілька методів, ґрунтованих на характеристиках IV для діагностики дефектів [5, 8-11] і компонентів струму [10,11], що враховують температурні залежності, або диференціальні параметри IV [8,9]. У роботі [12] показали, що концентрація заліза () може бути оцінена за допомогою фактора ідеальності (), який досить часто використовується для характеристики напівпровідникових бар'єрних структур різних типів [13-17]. В результаті аналітично отримані вирази для не є універсальними, і для визначення доводиться використати багато градуйованих кривих.

У останнє десятиліття різні галузі теоретичної і прикладної фізики успішно вирішують різні завдання, що не вимагають жорсткої алгоритмізації, за допомогою методів глибокого навчання [18-20]. Більше того, автори стверджують [19], що інформатика матеріалів (поєднання розрахунків/вимірів властивостей матеріалів і алгоритмів інформатики) стала четвертою (разом з теорією, моделюванням і експериментами) парадигмою науки. У цій роботі ми також застосовуємо глибоке навчання для прогнозування концентрації заліза по коефіцієнту ідеальності (так би мовити, "глибоке навчання для глибоких рівнів"). На відміну від роботи [12] ми маємо структуру з полем задньої поверхні (BSF) і врахували вплив товщини бази на коефіцієнт ідеальності. В цій роботі ми розглядаємо досить просту систему, що складається з кристалічного кремнію (c-Si) і домішки заліза. Незважаючи на свою простоту, ця система важлива для практичного застосування, оскільки кремнієві сонячні елементи складають 90% поточних світових виробничих потужностей [21], а BSF є однією з популярних конструкцій, які досі використовується в масовому виробництві (c-Si) СЕ [22,23]. Звичайно, технологія додавання діелектричного пасивуючого шару на задній частині СЕ (PERC) нещодавно вийшла на перший план по ефективному перетворенню енергії, але сонячні елементи PERC також містять - перехід і локальний - перехід [23,24]. Залізо в цих структурах є основним і одним з найшкідливіших домішок [2-4].

II. Методика досліджень

2.1 СХЕМА ПІДХОДУ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ

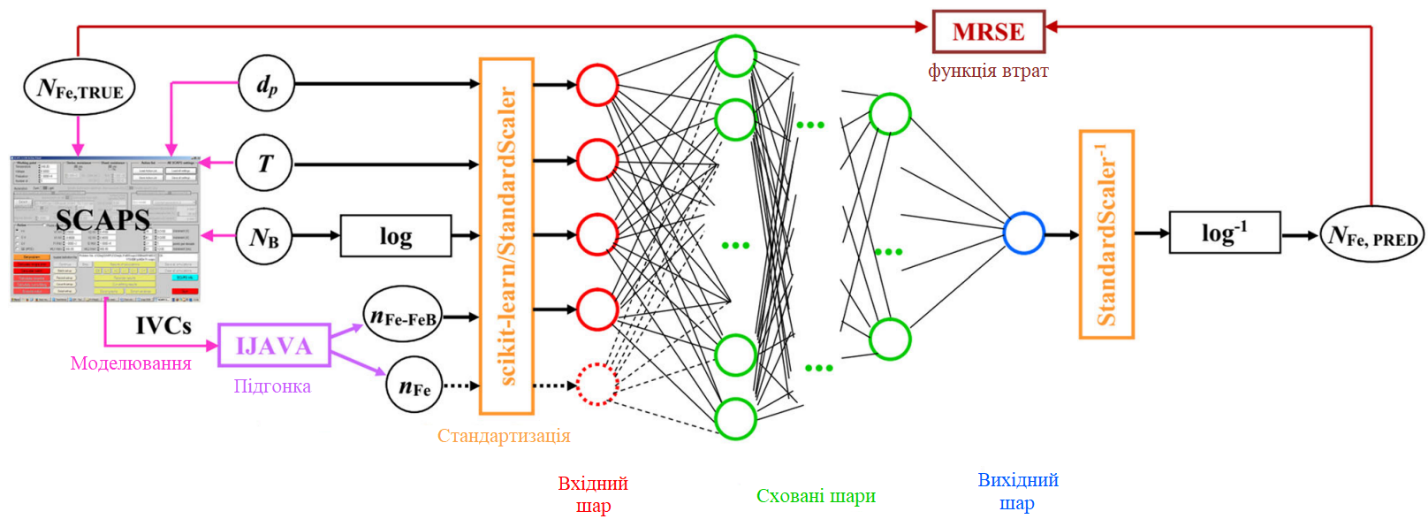


Рис. 1 Схема підходу на основі глибокого навчання для прогнозування концентрації заліза.

Блок-схема використаного нами евристичного підходу показана на Рис. 1, де можна виділити наступні етапи. Спочатку були змодельовані темні характеристики ВАХ для СЕ з різними параметрами і відомим складом забруднюючих речовин. При чисельному моделюванні ми використали SCAPS - 1D [25,26], широко використовуваний для моделювання сонячних елементів [27-32]. По-друге, отримані криві ВАХ були підігнані відповідно до моделі подвійного діода, і були оцінені коефіцієнти ідеальності. В результаті були отримані маркіровані набори даних. Очевидно, що набір маркерованих даних з експериментальних ВАХ був би прийнятніший, але на практиці практично неможливо знайти тисячі зразків з необхідними параметрами. По-третє, глибока нейронна мережа (DNN) була навчена оцінювати забруднення залізом, використовуючи товщину бази СЕ, рівень легування, температуру і коефіцієнт ідеальності. По-четверте, DNN була протестована використовуючи як синтетичні, так і експериментальні криві ВАХ.

2.2 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО СТРУКТУРУ ТА РОЗРАХУНОК

Структура , використана в розрахунках, мала емітерний шар товщиною 0,5 мкм з концентрацією донора ; - шар і - шар були рівномірно леговані бором; база мала товщину і концентрацію леганта ; BSF - шар мав товщину і концентрацію акцептора .

Моделювання проводилося в діапазоні температур 290 - 340 K. Для кожної температури був створений файл налаштувань SCAPS з використанням наступних параметрів матеріалу. Моделі забороненої зони і звуження забороненої зони були узяті з Pässler [33] і Yan і Cuevas [34] відповідно:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2) |

де . Теплові швидкості носіїв були розраховані по моделі запропонованої Гріном [35]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3) |

де - маса вільного електрона. Ефективні маси густини станів в зоні провідності і валентній зоні були розраховані відповідно до моделі Кудерка та ін. [36]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |
|  | (5) |

Рухливості носіїв і ефективні маси вільних носіїв були узяті з Клаассена [37], О'Мара та ін. [38]. Залежності коефіцієнтів оже-рекомбінації від температури і легування були розраховані на основі моделей Альтерматта та ін. [39] :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

Коефіцієнт міжзонної рекомбінації випромінювання був узятий з роботи Нгуена та ін. [40]. Враховувалася рекомбінація на зовнішній поверхні зі швидкостями електронів і дірок . Для металевих контактів на задній і передній поверхнях були прийняті умови плоскої зони.

Моделювання проводилося в припущенні, що рекомбінація за участю дефектів відповідає тільки глибоким рівням, пов'язаним із залізом. Оскільки основа і BSF-шар є однорідними забрудненнями, залізо передбачається в концентрації . Відомо, що в кремнії може знаходитися в двох станах: у вигляді пари або в міжвузольному стані . При кімнатній температурі і концентрації бору майже увесь , пов'язаний в парами , знаходиться в рівноважному стані [41-44]. За даними Wijaranakula [44], концентрація міжвузольних атомів заліза , які залишаються неспареними в рівноважному стані, залежить від температури, рівня легування і положення рівня Ферми. Оцінки показують, що при 340 K, для в квазінейтральній області бази СЕ.

Моделювання проводилося для наступних двох випадків. У першому випадку концентрація повністю розчиненого заліза задавалася сумою концентрацій міжвузольних атомів заліза і пар :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

Розподіли дефектів у базі і - шарі неоднорідні, залежать від положення рівня Ферми і задаються як[44,45]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

де - енергія зв'язку пар , - донорний рівень, пов'язаний з . Цей випадок відповідає рівноважному стану, будемо його називати .

У другому випадку передбачалося, що однорідно розподілений (). Ця умова може бути реалізована шляхом термообробки (при 210 C, 3 хв.) [46] або інтенсивного освітлення [47]. Цей випадок називатиметься як .

Донорний рівень з перерізами захоплення електрона та дірки був пов'язаний з в наших симуляціях. Для донорний рівень , , і акцепторний рівень , , [45,48,49].

Темні прямі ВАХ характеристики були отримані за допомогою SCAPS в діапазоні напруги до 0,45 В. Згідно моделі двох діодів, темний струм СЕ задається як [50]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

де і - струми насичення, і – опір шунту і послідовний опір. Модель двох діодів часто застосовується для опису реальних Si-СЕ: в рівнянні (10) перший діод представляє "ідеальний" діод, а перший член рівняння описує рекомбінацію в глибині бази і емітера, включаючи їх поверхні; другий діод - так званий рекомбінаційний діод, а другий член описує рекомбінацію в області збіднення [50]. Змодельовані данні були підігнані по рівнянню (10) з , , , і в якості параметрів підгонки. Підгонка виконувалася методом IJAVA [51].

Слід зазначити, що 1) впливом і можна нехтувати в змодельованих ВАХ; 2) вклад струму рекомбінаційного діода істотний тільки при низькому зміщенні, і діапазон напруги (0 - 0.45 В) в цілому достатній для точного визначення значень коефіцієнта ідеальності.

Типові змодельовані залежності коефіцієнта ідеальності показані на Рис. 2. Детальне обговорення значень і представлене у [52] проте слід зазначити, що (1) може бути однаковим для різних значень параметрів СЕ; (2) залежності і відрізняються не лише абсолютними значеннями, але і поведінкою, хоча і несуттєво.

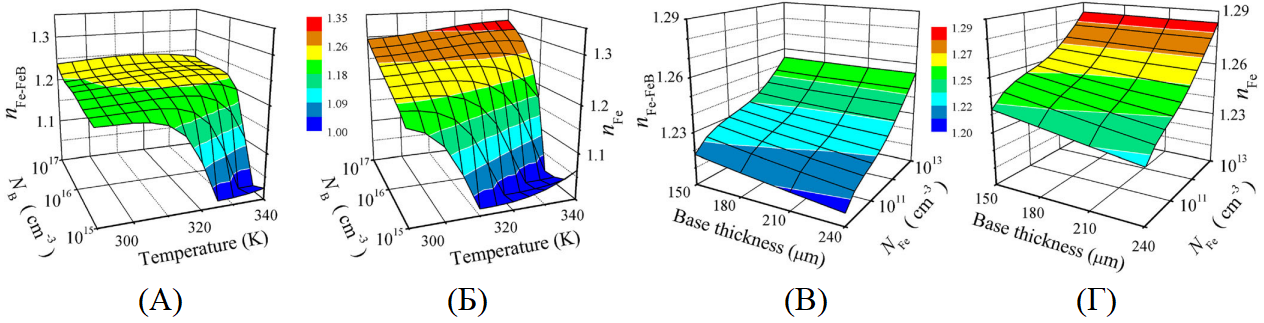


Рис. 2 (А,Б) – коефіцієнт ідеальності в залежності від температури і концентрації бору, (В,Г) – в залежності від товщини бази і концентрації заліза. (А,В) - випадок , (Б,Г) – випадок .

2.3 МОДЕЛІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Для навчання глибокої нейронної мережі потрібна велика кількість даних. Для створення навчального набору даних ми використали ВАХ, змодельовані за допомогою 5 значень , 9 значень , 11 значень і 25 значень , які регулярно розподілені (для і в лінійному масштабі, для і в логарифмічному масштабі) по діапазонах , мкм, і , відповідно. Також ми розглядали 2 види випромінювання: АМ 1.5 та 940 нм. Для кожного з них ми отримали по 12375 характеристик.

Крім того, були підготовлені тестові набори даних. Для АМ 1.5 тестовий набір даних складається з наступних даних:

1)\_**All\_varied** (Було 25 значень для всіх товщин. Початок з до включно)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 298, 313, 318, 323, 333 |
|  | 313, 318, 323, 328, 333 |
|  | 293, 308, 318, 323, 328, 333, 338 |
|  | 293, 303, 308, 313, 338 |
|  | 298, 303, 318, 328, 333 |
|  | 293, 298, 303, 308, 313, 318, 323, 328, 333 |
|  | 293, 303, 308, 313, 318, 323, 338 |
|  | 293, 308, 318, 328, 333, 338 |
|  | 293, 298, 308, 318, 323, 333 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 303, 318, 323, 328, 333 |
|  | 293, 298, 308, 313, 323, 328, 333 |
|  | 293, 298, 308, 313, 328, 338 |
|  | 293, 298, 303, 318, 323, 328, 338 |
|  | 303, 308, 313, 318, 323, 328, 333 |
|  | 298, 303, 308, 318, 328, 338 |
|  | 293, 308, 318, 323, 333 |
|  | 293, 303, 308, 318, 323, 333 |
|  | 298, 308, 313, 323, 328, 338 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 293, 298, 303, 318, 323, 333 |
|  | 293, 303, 308, 313, 318, 323, 328, 333 |
|  | 298, 313, 323, 328, 333 |
|  | 298, 303, 313, 323, 328, 333 |
|  | 293, 298, 308, 328, 338 |
|  | 298, 308, 318, 323 |
|  | 293, 298, 308, 318, 328, 333 |
|  | 293, 303, 308, 313, 318, 328 |
|  | 298, 308, 318, 323, 328, 333 |

2) **Fe\_varied** (Було 25 значень для всіх товщин. Початок з до включно)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 300, 330 |
|  | 300, 310, 340 |
|  | 295, 325, 340 |
|  | 290, 300 |
|  | 290, 295, 340 |
|  | 295, 305, 320, 325, 330 |
|  | 300 |
|  | 290, 315, 320 |
|  | 340 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 310, 315, 330, 340 |
|  | 300 |
|  | 310, 315, 335 |
|  | 300, 310 |
|  | 295, 305, 325 |
|  | 310, 315 |
|  | 295, 300, 310 |
|  | 320 |
|  | 290, 330, 340 |

3) **B\_varied** (Було 25 значень для всіх товщин. Початок з до включно)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 300 |
|  | 310, 320 |
|  | 305, 315 |
|  | 295, 305, 325, 330, 340 |
|  | 290, 310 |
|  | 290, 300, 315 |
|  | 325 |
|  | 290, 310, 320, 335 |
|  | 305, 330 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 300, 305, 340 |
|  | 330 |
|  | 310, 315, 325, 335, 340 |
|  | 295, 315, 320, 340 |
|  | 305, 330 |
|  | 310 |
|  | 300, 320 |
|  | 290, 330 |
|  | 300, 340 |

Для випромінювання 940 нм тестовий набір був наступним:

1)\_**All\_varied** (Було 25 значень для всіх товщин. Початок з до включно)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 292, 297, 312, 317, 327, 332, 337 |
|  | 292, 302, 307, 312, 317, 332, 337 |
|  | 297, 312, 317, 322, 327, 332 |
|  | 292, 302, 317, 322, 327, 332 |
|  | 292, 302, 307, 317, 322, 327, 332, 337 |
|  | 292, 297, 302, 312, 322 |
|  | 292, 307, 317, 322, 337 |
|  | 297, 312, 327, 332, 337 |
|  | 292, 297, 302, 307, 322, 337 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 297, 302, 307, 312, 317, 322, 327 |
|  | 292, 297, 302, 317, 322, 337 |
|  | 292, 302, 307, 312, 327, 332 |
|  | 297, 307, 312, 317, 327, 337 |
|  | 292, 302, 307, 312, 322, 332 |
|  | 292, 307, 317, 327, 332, 337 |
|  | 297, 302, 312, 317, 332 |
|  | 292, 302, 312, 322, 327, 332, 337 |
|  | 292, 297, 307, 317, 322, 337 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 292, 297, 302, 317, 332, 337 |
|  | 297, 307, 312, 327, 337 |
|  | 292, 297, 302, 307, 322, 332 |
|  | 292, 297, 307, 312, 317, 327, 337 |
|  | 297, 302, 322, 332 |
|  | 292, 302, 307, 312, 322, 327, 337 |
|  | 292, 297, 307, 317, 327, 332 |
|  | 292, 302, 312, 317, 322, 327, 337 |
|  | 297, 307, 312, 317, 327, 332, 337 |

2) **Fe\_varied** (Було 25 значень для всіх товщин. Початок з до включно)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 310, 315 |
|  | 320 |
|  | 295, 315, 325 |
|  | 340 |
|  | 310, 320, 335 |
|  | 290, 300, 340 |
|  | 300, 325 |
|  | 295, 320, 335 |
|  | 300, 305, 330, 340 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 305, 310, 320, 330 |
|  | 325, 330 |
|  | 295, 305 |
|  | 300, 305, 335 |
|  | 290, 340 |
|  | 310, 330 |
|  | 295, 320 |
|  | 290, 305, 310 |
|  | 330, 335 |

3) B\_varied

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 310, 330 |
|  | 290, 325 |
|  | 305, 340 |
|  | 290, 295, 320 |
|  | 300, 305, 310, 340 |
|  | 315, 330 |
|  | 300, 325 |
|  | 295, 315, 335 |
|  | 310, 335 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | 295, 310 |
|  | 315, 335 |
|  | 290, 295, 305 |
|  | 310, 330 |
|  | 300, 325 |
|  | 290, 300, 305, 315, 340 |
|  | 290, 335 |
|  | 295, 315 |
|  | 320, 340 |

Ми спробували побудувати DNN, яка могла б оцінити забруднення залізом, використовуючи параметри СЕ ( і ), виміряні температури і результат підгонки ВАХ (фактор ідеальності). Два спектри освітлення (АМ 1.5 та 940 нм) дають змогу збільшити кількість параметрів для нейронної мережі. Таким чином ми додатково отримуємо до базових параметрів ще і параметри освітлення:

- Jsc\_Fe – струм короткого замикання при наявності міжвузольного Fe.

- Eta\_Fe – коефіцієнт корисної дії при наявності міжвузольного Fe.

- Voc\_Fe – напруга холостого ходу при наявності міжвузольного Fe.

- FF\_Fe – коефіцієнт форми вольт-амперної характеристики з Fe.

- Jsc\_FeB - струм короткого замикання при наявності пар FeB.

- Eta\_FeB - коефіцієнт корисної дії при наявності пар FeB.

- Voc\_FeB - напруга холостого ходу при наявності пар Fe.

- FF\_FeB - коефіцієнт форми вольт-амперної характеристики з FeB.

- Jsc\_e – відносна зміна густини струму короткого замикання після

розпаду пар FeB

- Eta\_e – різниця коефіцієнтів корисної дії при Fe та FeB.

- Voc\_e – різниця напруг холостого ходу при Fe та FeB.

- FF\_e – різниця коефіцієнтів форми ВАХ при Fe та FeB.

Така велика кількість параметрів потрібна нам, щоб наша майбутня нейромережа мала високу ефективність. Глибока нейронна мережа була реалізована за допомогою високорівневого API Keras, наданого TensorFlow [53]. За допомогою keras-tuner ми вишукували найефективніші параметри для нейронних мереж. Були розглянуті різні архітектури схованих шарів:

- "труба": кожен прихований шар містить однакову кількість вузлів;

- "трапеція": кількість нейронів лінійно зменшується від 100% (перший

шар) до 50% (останній шар);

* "трикутник": кількість нейронів лінійно зменшується від 100% (перший шар) до 10% (останній шар);
* "метелик": дві послідовні відбиті конфігурації трапеції;
* "ялинка": дві послідовні конфігурації трапеції.

В якості функції втрат була обрана середня квадратична відносна помилка (MSRE):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

де - кількість прикладів в наборі даних, - концентрація заліза, використана при моделюванні кожного прикладу, а - прогноз DNN для кожного приклада.

Крім архітектури мережі перебиралися також і інші гіперпараметри нейронних мереж: кількість схованих шарів; кількість нейронів в кожному схованому шарі; розмір міні-вибірки (порція), яка надходила в мережу; кількість епох (кількість разів, яку алгоритм проходитиме через увесь навчальний набір даних); коефіцієнт навчання (параметр, який керує величиною корекції ваг на кожній ітерації мережі); оптимізатор мережі; функція активація нейронів; ініціалізатор мережі; регуляризатор мережі.

III. результати та їх обговорення

В даному розділі студент представляє отримані оригінальні результати в аналітичному, табличному, графічному вигляді, проводить їх обговорення та інтерпретацію, порівняння з результатами досліджень інших авторів.

Опис оригінальних досліджень потрібно проводити найдетальніше. Викладення матеріалу варяяято проводити таким чином, щоб читачеві були зрозумілі висновки, які будуть підсумком роботи. Представлення результатів досліджень має супроводжуватися їх детальним обговоренням.

Для наочного та доступного представлення результатів варто використовувати рисунки і таблиці. Подання ілюстративного матеріалу (рисунки, діаграми, графіки, схеми, фотознімки) потрібно виконувати в такій формі, яка потребує менше часу для сприйняття вміщеної в ньому інформації. Наприклад, таблиці варто використовувати, коли інтерес представляє не хід залежності між величинами, а конкретні числові значення, що вони їх набувають. Не варто дублювати одну й ту ж інформацію, перевантажувати ілюстрації зайвими деталями, які ускладнюють їх розуміння.

В тексті мають міститись посилання на всі ілюстрації із зазначенням номеру, який складається з номеру розділу та порядкового номеру ілюстрації в цьому розділі, розділених крапкою. Наприклад, рис.2.3 – третій рисунок другого розділу. Рисунки повинні розміщуватись після посилання на них у тексті кваліфікаційної роботи. Кожен рисунок супроводжується змістовним підписом, що дозволяє за даними, показаними на рисунку, отримати інформацію про результати досліджень не звертаючись до основного тексту.

Приклад оформлення рисунка:

|  |
| --- |
| https://lh5.googleusercontent.com/2o-kf7sn9u4DORe5aZN-R8Z-f2605uo6_JnwQBgxBTjc8slp3lFP5ejCUnkfTQDn4jI-NrIyJJpNKsE_Ytxl_RI69pgTcIwKPgUd-Pff1SxTba4ie2D0p_naETtJzh50e_avFTw |
| Рис. 2.3. Схематичне зображення досліджуваної структури та схема визначення градієнту температури |

Таблиці нумеруються арабськими цифрами в межах розділу. Слово «Таблиця» розміщується у верхньому лівому куті сторінки, поруч вказується назва таблиці. Наприклад,

Таблиця 1.3. Коефіцієнти теплопровідності досліджуваних структур

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № п/п | Структура | *k*, Вт/(м·К) |
| 1 | Si | 140,5 |
| 2 | Ge | 74,6 |

Формули та рівняння розміщують із відступом принаймні в один рядок зверху і знизу від основного тексту або сусідніх формул. Перенесення формули чи рівняння допускається лише на знаках рівності, плюс, мінус, множення і ділення з повторенням їх на початку наступного рядка. Формули, що не розділені текстом, мають відокремлюватись комами. Розшифрування значень використаних символів слід наводити в тексті безпосередньо за формулою. Перший рядок розшифрування починають із слова «де», двокрапку після нього не ставлять. При повторному використанні символу наводити його розшифрування не слід, якщо вона надавалася раніше. Формули, на які є посилання в тексті, повинні нумеруватися в межах розділу арабськими цифрами. Номер формули повинен складатися з номеру розділу і номеру формули, розділених крапкою, наприклад, (2.1) – перша формула другого розділу. Номер потрібно брати в круглі дужки і розміщувати на правому полі сторінки на рівні нижнього рядка формули, якої він стосується. При посиланні в тексті на формулу, необхідно зазначити її повний номер в круглих дужках. Приклади наведення формул в тексті:

, (2.3)

(3.1)

Розділ III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ може складатись з декількох підрозділів.

3.1 Назва підрозділу 3.1

Текст.

3.2 Назва підрозділу 3.2

Текст.

3.3 Назва підрозділу 3.3

Текст.

висновки

У цьому розділі мають бути чітко сформульовані найбільш важливі наукові та практичні результати, отримані в роботі, подані твердження, що підсумовують результати досліджень, співставленні отримані результати з поставленням задачі.

Висновки мають бути конкретними і сформульовані таким чином, щоб можна було отримати уявлення про результати дослідження в цілому, не читаючи детально всього матеріалу. Висновки потрібно формулювати так, щоб вони відображали зміст роботи і показували доведені положення, які виносяться на захист роботи. Не бажано використовувати абстрактні фрази на кшталт «У роботі досліджено ...», а варто «Показано, що...», «Доведено, що...», «Встановлено, що …».

1. Текст висновку №1.
2. Текст висновку №2.
3. Текст висновку №3.

список використаної літератури

В даному розділі приводиться список використаної літератури. До переліку літератури слід включати лише ті джерела, які використовувались в тексті роботи. Список використаної літератури необхідно розміщувати в тій послідовності, в якій вони з'являються в роботі.

[1]. Посилання на літературне джерело №1.

[2]. Посилання на літературне джерело №2.

[3]. Посилання на літературне джерело №3.

Бібліографічний опис літератури складають відповідно до чинних стандартів. Приклади оформлення списку використаної літератури наводяться в таблиці нижче.

ДОДАТОК В. Приклади оформлення у списку джерел

(згідно ДСТУ 8302:2015)

|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика джерела** | **Приклад оформлення** |
| ***Книги:***  Один автор | [1]. Omar M.A. Elementary Solid State Physics: Principles and Applications. 4th ed. Massachusetts : Addison-Wesley, 1975. 669 p. |
| Два автори | [2]. Кузьменко П.П., Макара В.А. Зв'язок між електронною структурою атомів, кристалічною структурою і магнітними властивостями в металах. Київ : Наукова думка, 1995. 124 с. |
| Три автори | [3]. Боровий М.О., Куницький Ю.А., Курилюк В.В. Вступ до наноелектроніки. Київ : Кафедра, 2013. 256 с. |
| Чотири і більше авторів | [4]. Фізичні основи спінтроніки / Товстолиткін О.І. та ін. Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2014. 500 с. |
|  | |
| ***Статті в періодичних виданнях:***  Один автор | [5]. Howell P.C. Comparison of molecular dynamics methods and interatomic potentials for calculating the thermal conductivity of silicon. *The Journal of Chemical Physics*. 2012. Vol. 137. P. 224111–224125. |
| Два автори | [6]. Гордієнко В. В., Косуба Р. Б. Вікові особливості екологічно обумовленого накопичення важких металів в органах інтактних лабораторних щурів. *Клінічна та експериментальна патологія*. 2016. Т. 15, № 3. С. 26–29. |
| Три автори | [7]. Kuryliuk, V., Korotchenkov, O., Cantarero, A. Carrier confinement in Ge/Si quantum dots grown with an intermediate ultrathin oxide layer. *Physical Review B*. 2012. Vol. 85, №.7. P. 075406-1 – 075406-11. |
| Чотири і більше авторів | [8]. Probing matrix/filler interphase with ultrasonic waves / A. Nadtochiy, B. Gorelov, O. Polovina [et al.]. *Journal of Materials Science*. 2021. Vol. 56. P. 14047–14069. |
|  | |
| ***Матеріали конференцій, тези доповідей*** | [9]. Бородянський Є.А., Карбівський В.Л. Графен та багатошарові вуглецеві наноструктури. *Наука ХХІ сторiччя: Сучаснi проблеми фiзики* : тези доп. конф. мол. вч., м. Київ, 13-15 травня 2014 р. / Київський національний ун-т ім. Т. Шевченка, Київ, 2014. С. 34–35.  [10]. Семенько М.П., Остапенко Р.В. Деякі особливості внутрішньої будови високоентропійних сплавів за даними рентгенівської дифракції. *Сучасні проблеми фізики конденсованого стану* : зб. праць міжнар. конф., м. Київ, 19-20 жовтня 2015 р. / Київський національний ун-т ім. Т. Шевченка, Київ, 2015. – C. 130-131. |
|  | |
| ***Дисертації*** | [11]. Момот А.І. Ефективнi взаємодiї та флуктуацiї у запорошенiй слабкоiонiзованiй плазмi: дис. … доктора фіз.-мат. наук : 01.04.02. Київ, 2019. 297 с. |

ДОДАТКИ

За необхідності, робота може містити ДОДАТКИ, які оформлюються як продовження кваліфікаційної роботи на наступних її сторінках. Додатки можуть включати допоміжний матеріал, необхідний для повноти сприйняття роботи та корисний при її детальному вивченні, наприклад: проміжні математичні доведення, формули, викладки і розрахунки; таблиці допоміжних цифрових даних; опис алгоритмів і програм розв’язання задач на ЕОМ, які розроблені чи використані під час виконання кваліфікаційної роботи; ілюстрації допоміжного характеру; технологічні питання.

Кожен додаток починається з нової сторінки. Якщо в роботі є два чи більше додатків, їх нумерують послідовно великими літерами української абетки, наприклад, Додаток А, Додаток Б. Один додаток позначається як додаток А. За необхідності текст додатків може поділятися на підрозділи, пункти чи підпункти, які слід нумерувати в межах кожного додатку.

Ілюстрації, таблиці, формули та рівняння, що є в тексті додатка, слід нумерувати в межах кожного додатку, наприклад, рис. Г.З - третій рисунок додатка Г. Джерела, що їх цитують тільки в додатках, повинні розглядатися незалежно від тих, які цитуються в основній частині кваліфікаційної роботи, і відповідно їх має бути перелічено наприкінці кожного додатка в переліку посилань.