

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Оксана ЖИЛИНСЬКА

(підпис)
м.п

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

до проєкту з виконання наукових досліджень і розробок на 2021 рік

«Розробка фізичних засад акусто-керованої модифікації та машинно-орієнтованої характеристики кремнієвих сонячних елементів» (далі – Проєкт)
(назва Проєкту)

Назва конкурсу: «Підтримка досліджень провідних та молодих учених»

Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0036

Науковий керівник проєкту: Оліх Олег Ярославович

Підстави для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок:

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України про схвалення звіту та продовження надання грантової підтримки проєкту від «24» грудня 2020 року № 42

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ (заповнюється відповідно до поданої заявки на одержання грантової підтримки, далі – заявка)

Короткий опис Проєкту (до 5000 знаків)

На сьогодні сонячна фотовольтаїка характеризується найшвидшими темпами зростанням серед усіх технологій у світі, спрямованих на використання відновлюваних джерел енергії. При цьому практичне використання даного способу створення енергії переважно реалізується за допомогою кремнієвих сонячних елементів. Задля здешевлення кінцевої продукції, для створення КСЕ використовуються кристали достатньо невисокої чистоти, причому однією з найпоширеніших і водночас з найшкідливіших домішок, є атоми заліза та інших перехідних металів. Питання щодо з'ясування поведінки дефектів та реалізації можливості їхнього керованого переведення у електрично-неактивний стан мають фундаментальне значення для покращення експлуатаційних характеристик пристроїв. Одним з варіантів модифікації дефектної підсистеми є збудження у кристалі пружних коливань. Проте, наявних на сьогодні знань недостатньо для формування цілісних уявлень щодо акусто-дефектної взаємодії у напівпровідникових кристалах загалом та практичного використання можливостей активного ультразвуку під час виготовлення сонячних елементів зокрема. Особливістю даного проєкту є те, що він передбачає з'ясування фізичних особливостей та механізмів впливу ультразвукового навантаження на процеси перебудови дефектних комплексів, ініційовані іншим активаційним чинником (освітленням) чи викликані прагненням системи повернутися до стану термодинамічної рівноваги. Тобто, проєкт

орієнтований на розробку фізичних засад методу, що базується на використанні комплексних процесів, де ультразвуку відведена роль додаткового чинника та певного фактору коригування.

Експериментальна частина проекту має на меті встановити фізичні закономірності та механізми впливу акустичних хвиль на процес перебудови дефектних комплексів, пов'язаних із атомами перехідних металів та передбачає визначення закономірностей змін параметрів КСЕ (фактор неідеальності, струм насичення, шунтуючий опір, напруга холостого ходу, струм короткого замикання) внаслідок світло-індукованої деградації в умовах ультразвукового навантаження (повздовжні та поперечні хвилі з частотою (1-30) МГц та інтенсивністю (0,1-1 Вт/см²) в температурному діапазоні 290-350 К) та порівняння із випадком відсутності звуку; визначення кінетичних характеристик зміни параметрів ВАХ внаслідок відновлення пар Fe-B в умовах ультразвукового навантаження та порівняння з беззвуким випадком; розробку рекомендацій щодо спрямованої зміни експлуатаційних характеристик КСЕ шляхом акустостимульованої деактивації дефектів. Вибір домішкової пари Fe-B як безпосереднього об'єкту акусто-керованої модифікації в КСЕ зумовлений, зокрема, поширеністю даного дефекту у реальних сонячних елементах та його суттєвим впливом на ефективність фотоелектричного перетворення, а також тим, що з компонентами пари пов'язана зміна об'єму кристалу різного знаку, а саме, для дефектів такого типу, відповідно до попередніх досліджень, очікується найбільша ефективність акусто-дефектної взаємодії.

Неруйнівні методи, що мають на меті оцінку концентрації домішок у напівпровідникових структурах, зокрема в КСЕ, мають важливе значення з прикладної точки зору. На сьогодні розроблено чимало як прямих, так і непрямих методів, що дозволяють вирішити подібне завдання. Проте практично всі вони вимагають чи спеціальної підготовки об'єктів для досліджень, чи спеціалізованого обладнання. Водночас, чи не найпоширенішим методом характеристизації сонячних елементів є вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ). Параметри КСЕ зокрема та процеси поширення носіїв загалом залежать від наявності електрично активних дефектів і тому існує принципова можливість визначення концентрації останніх за виглядом ВАХ. Однією з найголовніших перепон на шляху розробки подібного зручного для використання та експресного методу є багатопараметричність взаємозв'язку концентрації рекомбінаційних центрів та параметрів ВАХ. Цей проект передбачає подолання цієї перешкоди завдяки використанню методів глибокого навчання, які орієнтовані на вирішення задач, де не передбачається можливість чіткої алгоритмізації. Для успішного застосування глибокого навчання є необхідним наявність значної за об'ємом бази даних. У цьому проекті передбачено створення відповідного масиву даних шляхом моделювання ВАХ для кремнієвих структур n⁺-p-p⁺ з різною товщиною (150-240 мкм) та різним ступенем легування (10¹⁵÷10¹⁷ см⁻³) бази при варіації концентрації домішки в інтервалі 10¹⁰÷10¹³ см⁻³ для температурного діапазону 290-340 К. При цьому буде враховано можливість знаходження атомів заліза у міжвузольному стані та у складі пари Fe-B, а також різні зарядові стани дефекту. Останнім етапом цього напряму проекту буде налаштування (підбір кількостей схованих шарів та нейронів в них, методу регуляризації, активаційної функції, швидкості навчання) та навчання штучної нейронної мережі, спроможної передбачити концентрацію домішкових атомів заліза на основі параметрів сонячного елемента, умов вимірювання та значення фактору неідеальності.

Тривалість виконання проекту

Початок, рік	2020
Завершення, рік	2021

Тривалість виконання Проекту у 2021 році

Початок (відповідно до Календарного плану), місяць, рік:	Травень, 2021 р.
Завершення, місяць, рік:	Грудень, 2021

Обсяг фінансування проєкту у 2021 році, грн.	2 882 355,00
---	---------------------

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ (заповнюється відповідно до поданої заявки)

Загальна кількість виконавців	Доктори наук	Кандидати наук	Інші працівники
6	2	2	2

Перелік виконавців проєкту, робота яких оплачується зі статті витрат «Прямі витрати» (Оплата праці) Грантоотримувача:

№ п/п	ПІБ	Основне місце роботи	Посада	Науковий ступінь
1	Оліх Олег Ярославович	Київський національний університет імені Тараса Шевченка	доцент кафедри загальної фізики	доктор фізико-математичних наук, доцент
2	Костильов Віталій Петрович	Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України	завідувач лабораторії Фізико-технічних основ напівпровідникової фотоенергетики	доктор фізико-математичних наук, професор
3	Власюк Віктор Миколайович	Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України	науковий співробітник у лабораторії Фізико-технічних основ напівпровідникової фотоенергетики	кандидат фізико-математичних наук
4	Лозицький Олег Всеволодович	Київський національний університет імені Тараса Шевченка	аспірант кафедри загальної фізики	
5	Коркішко Роман Михайлович	Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України	науковий співробітник у лабораторії Фізико-технічних основ напівпровідникової фотоенергетики	кандидат технічних наук

6	Майко Катерина Олександрівна	Київський національний університет імені Тараса Шевченка		аспірант кафедри експериментальної фізики
---	---------------------------------	---	--	---

Перелік виконавців проєкту, робота яких оплачується зі статті витрат «Витрати на виконання проєкту субвиконавцем» (Оплата праці):

Залучення субвиконавців не передбачається

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ОРГАНІЗАЦІЮ(І) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ (заповнюється відповідно до поданої заявки в разі залучення)

Залучення субвиконавців не передбачається

4. ОПИС ПРОЄКТУ (заповнюється відповідно до поданої заявки)

4.1. Мета Проєкту(до 500 знаків)

Розробка фізичних засад методу акустостимульованої деактивації дефектів, пов'язаних з атомами перехідних металів, у монокристалічних кремнієвих сонячних елементах (КСЕ) з метою покращення експлуатаційних характеристик (ефективності, світлодеградаційної стійкості). Розробка експрес-методу оцінки концентрації електрично-активних центрів у кремнієвих бар'єрних структурах на основі вимірювання вольт-амперних характеристик з використанням методів глибокого навчання.

4.2. Основні завдання Проєкту (до 1000 знаків)

Розробити методику оцінювання кінетичних характеристик перебудови дефектів у бар'єрних структурах в умовах ультразвукового навантаження. Встановити фізичні закономірності та механізми впливу акустичних хвиль на процес перебудови дефектних комплексів, пов'язаних із атомами перехідних металів, у КСЕ залежно від температури, інтенсивності та типу коливань.

Шляхом моделювання з'ясувати вплив геометричних особливостей, ступеню легування та наявності різних типів дефектів на особливості формування вольт-амперних характеристик типових кремнієвих сонячних елементів в широкому температурному діапазоні. Використовуючи методи глибокого навчання, встановити взаємозв'язок між величиною фактору неідеальності та концентрацією рекомбінаційних центрів. Запропонувати метод кількісної оцінки електрично-активних дефектів у бар'єрних структурах за величиною фактору неідеальності.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми (до 2 сторінок)

Для сучасної цивілізації використання відновлюваних джерел енергії є життєво необхідним. Серед різноманітних технологій, спрямованих на вирішення цього завдання, особливе місце займає безпосереднє перетворення сонячного випромінювання на електроенергію. Унікальність такого підходу пов'язана, насамперед, з можливістю задоволення енергетичних потреб без хімічного та теплового забруднення навколишнього середовища, при цьому генерація енергії може відбуватися безпосередньо в околі місця споживання. Як наслідок, на сьогодні сонячна фотовольтаїка характеризується найшвидшими темпами зростанням серед усіх енергетичних технологій у світі.

Понад 90% з більше ніж 550 ГВт-год енергії, яка виробляється на сучасному етапі внаслідок застосування фотовольтаїчних перетворювачів, припадає на кремнієві сонячні елементи (КСЕ). Ці системи створюються з використанням аморфного, полікристалічного чи кристалічного кремнію, причому частка останніх складає близько 40%. Як і для інших напівпровідникових пристроїв, одним з визначальних чинників властивостей КСЕ є система дефектів, зокрема, їхній домішковий склад. Зауважимо, що з метою здешевлення кінцевої продукції для створення КСЕ

переважно використовуються кристали відносно невисокої чистоти. Так, однією з найпоширеніших і водночас з найшкідливіших домішок є атоми заліза та інших перехідних металів. Чимало зусиль науковців спрямовані на розробку на реалізацію технологічних методів, що мають на меті переведення подібних дефектів у електрично-неактивний стан, зокрема внаслідок їхнього гетерування. Проте коефіцієнти корисної дії реальних елементів суттєво нижчі за теоретичну межу. З цієї точки зору зрозуміло, що питання розуміння поведінки дефектів та керування їхнім станом мають фундаментальне значення для покращення експлуатаційних характеристик пристроїв.

Загальновизнаними методами зовнішньої активації/деактивації технологічно функціональних дефектів для управління властивостями напівпровідникових структур є опромінення та термообробка, які, проте, суттєво впливають і на стан кристала загалом. Іншим варіантом модифікації дефектної підсистеми є збудження у кристалі пружних коливань. У літературі, зокрема, показано, що акустичні хвилі у неп'єзоелектричних матеріалах здатні викликати перерозподіл домішок та викликати перебудову окремих точкових дефектів, причому такий спосіб характеризується вибірковістю впливу саме на області з порушеннями періодичності та може бути реалізований при кімнатних температурах. Крім того, показано слушність використання ультразвукового навантаження як додаткового фактору впливу під час технологічних операцій, таких як, наприклад, іонна імплантація. Водночас, наявної інформації недостатньо для формування цілісних уявлень щодо акусто-дефектної взаємодії у напівпровідникових, зокрема кремнієвих, кристалах. Як наслідок, можливості активного ультразвукового впливу не використовуються під час виготовлення сонячних елементів, на відміну від багатьох інших технологічних процесів.

Неруйнівні методи, що мають на меті оцінку концентрації домішок, у тому числі перехідних металів, у напівпровідникових кристалах та структурах на їхній основі, зокрема сонячних елементах, мають важливе значення з прикладної точки зору. На сьогодні розроблено чимало як прямих (інфрачервона томографія, електронно-парамагнітний резонанс, нестационарна спектроскопія і т.п.), так і непрямих (поверхневої фотоерс, виміри часу життя неосновних носіїв) методів, що дозволяють вирішити подібне завдання. Проте практично всі вони вимагають чи спеціальної підготовки об'єктів для досліджень, чи спеціалізованого обладнання. Водночас, чи не найпоширенішим методом характеристизації сонячних елементів є вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ), який, зокрема, дозволяє отримати такі фундаментальні параметри даних пристроїв як коефіцієнт корисної дії, напруга холостого ходу та струм короткого замикання. Очевидно, що ці характеристики зокрема та процеси поширення носіїв загалом залежать від наявності електрично активних дефектів і тому існує принципова можливість визначення концентрації останніх за виглядом ВАХ. Однією з найголовніших перепон на шляху розробки подібного зручного для використання та експресного методу є багатопараметричність взаємозв'язку концентрації рекомбінаційних центрів та параметрів ВАХ, які можуть бути визначені шляхом апроксимації експериментальних кривих. Проте в останнє десятиліття методи глибокого навчання, спрямовані, зокрема, на вирішення задач, де не передбачається можливість чіткої алгоритмізації, знаходять успішне застосування у різних галузях теоретичної та прикладної фізики. Це дозволяє сподіватись на можливість реалізації вказаного методу характеристизації сонячних елементів з використанням подібних підходів.

- Новизна Проєкту (до 1 сторінки)

Перша частина проєкту пов'язана з експериментальним встановленням закономірностей динамічних акусто-індукованих ефектів у КСЕ. На відміну від численних попередніх досліджень, у яких акустичні хвилі використовувались як одноосібний інструмент незворотної модифікації неп'єзоелектричної напівпровідникової системи шляхом виведення її зі стабільного (метастабільного) стану, даний проєкт передбачає з'ясування фізичних особливостей та механізмів впливу ультразвукового навантаження на процеси перебудови дефектних комплексів, ініційовані іншим активаційним чинником (освітленням) чи викликані прагненням системи повернутися до стану термодинамічної рівноваги. Тобто, проєкт орієнтований на розробку

фізичних основ методу, що базується на використанні комплексних процесів, де ультразвуку відведена роль додаткового чинника та певного коректуючого фактору. Крім того, новизна проекту пов'язана з вибором об'єкту для вивчення акустичної активності, а саме, домішок атомів перехідних металів та комплексів за їхньою участю у монокристалічному кремнії.

Друга частина проекту спрямована на розробку нового експрес-методу оцінки концентрації рекомбінаційних центрів, який є простим за реалізацією доповненням стандартної процедури характеристики КСЕ за допомогою ВАХ. Запропонований підхід передбачає низку нових підходів, зокрема, використання величини фактору неідеальності як кількісного показника концентрації рекомбінаційних центрів та застосування методів глибокого навчання для встановлення взаємозв'язку вказаних величин.

- Методологія дослідження (до 2 сторінок)

Експериментальна частина проекту має на меті встановити фізичні закономірності та механізми впливу акустичних хвиль на процес перебудови дефектних комплексів, пов'язаних із атомами перехідних металів та передбачає наступні етапи: 1) підбір реальних КСЕ з базою, легованою бором, та високою концентрацією домішкового заліза; 2) визначення впливу світло-індукованого розпаду пар Fe-B на параметри вольт-амперних характеристик (фактор неідеальності, струм насичення, шунтуючий опір, напруга холостого ходу, струм короткого замикання) КСЕ; 3) з'ясування кількісних характеристик кінетики зміни параметрів ВАХ внаслідок відновлення пар Fe-B; 4) визначення закономірностей змін параметрів КСЕ внаслідок світло-індукованої деградації в умовах ультразвукового навантаження (повздовжні та поперечні хвилі з частотою (1-30) МГц та інтенсивністю (0,1-1) Вт/см² в температурному діапазоні 290-350 К) та порівняння із беззвуким випадком; 5) визначення кінетичних характеристик зміни параметрів ВАХ внаслідок відновлення пар Fe-B в умовах ультразвукового навантаження та порівняння з випадком відсутності звуку; 6) розробка рекомендацій щодо спрямованої зміни експлуатаційних характеристик КСЕ шляхом акустостимульованої деактивації дефектів.

Вибір домішкової пари Fe-B як безпосереднього об'єкту акусто-керованої модифікації в КСЕ зумовлений декількома факторами. А саме

- а) поширеністю даного дефекту у реальних сонячних елементах та його суттєвим впливом на ефективність фотоелектричного перетворення;
- б) високим ступенем вивченості параметрів Fe-B;
- в) легкістю ініціації перебудови комплексу: пара руйнується під впливом освітлення і відновлюється у темряві, причому характерний час останнього процесу при кімнатних температурах складає десятки хвилин;
- г) з компонентами пари пов'язана зміна об'єму кристалу $\Delta\Omega$ різного знаку: бор є домішкою заміщення з іонним радіусом, який менший ніж для атомів кремнію Si, тоді як для міжвузлового заліза $\Delta\Omega > 0$; а саме для дефектів такого типу, відповідно до попередніх досліджень, очікується найбільша ефективність акусто-дефектної взаємодії.

Розробка методу характеристики домішкового складу сонячних елементів на основі вимірювання ВАХ передбачається шляхом теоретичного моделювання кремнієвих n⁺-p-p⁺ структур з домішками атомів перехідних металів (на прикладі заліза). Ця частина включає розрахунки ВАХ для структур з різною товщиною (150-240 мкм) та ступенем легування ($10^{15} \div 10^{17}$ см⁻³) бази при варіації концентрації домішки в інтервалі $10^{10} \div 10^{13}$ см⁻³ для температурного діапазону 290-340 К. При цьому буде враховано можливість знаходження атомів заліза у міжвузольному стані та у складі пари Fe-B, а також різні зарядові стани дефекту. Розрахунки будуть здійснені за допомогою симулятора сонячних елементів SCAPS 3.3.08 з врахуванням отриманих в результаті аналізу літературних джерел реальних величин та температурних залежностей параметрів кремнію (ширини та звуження забороненої зони, рухливості, теплової швидкості та ефективної маси носіїв, коефіцієнтів власної рекомбінації тощо) та рекомбінаційних центрів. Наступний етап – визначення фактору неідеальності для розглянутих структур шляхом апроксимації отриманих ВАХ. Апроксимація буде здійснюватися відповідно до дводіодної моделі з використанням метаякістичного методу оптимізації Яауа. Останній етап – налаштування (підбір кількостей схованих

шарів та нейронів в них, методу регуляризації, активаційної функції, швидкості навчання) та навчання (на основі масиву даних, отриманих попередньо) штучної нейронної мережі, спроможної передбачити концентрацію домішкових атомів заліза на основі параметрів сонячного елемента, умов вимірювання ВАХ та отриманого в результаті апроксимації ВАХ значення фактору неідеальності. Орієнтовний інструмент роботи зі штучною нейронною мережею – пакет Keras.

- Інформація про наявну матеріально-технічну базу, обладнання та устаткування, необхідні для виконання Проєкту (до 1 сторінки)

Центр випробувань фотоперетворювачів і батарей фотоелектричних укомплектований наступним обладнанням і стандартними зразками:

- установкою фототехнічних випробувань сонячних елементів;
- установкою для визначення спектральних характеристик фотоперетворювачів;
- установкою для електричних і фототехнічних випробувань сонячних батарей;
- вимірювачем фотоенергетичних параметрів сонячних модулів „Фотон-3”;
- установкою імпульсного тестування фотоелектричних модулів і батарей;
- вимірювачем енергетичної освітленості ВЕО-01;
- зразковими фотоперетворювачами;
- лазерним еліпсометром;

Крім того, наявна матеріально-технічна база включає наступні елементи

- установка для вимірювання вольт-амперних характеристик ((-5(5) В, (10-8(2(10-2) А, точність 0,1%, швидкість – до 50 вимірів/с);
- термостат на базі пропорційно-інтегрально-диференційного контролера (температурна стабільність (0,02 К);
- п'єзоелектричні перетворювачі для збудження повздовжніх та поперечних хвиль у діапазоні (1(30) МГц;
- комплекс для ультразвукового навантаження (генератор ГЗ-41, частотомір ЧЗ-34, цифровий осцилограф GDS-806S, характерограф Х1-48);
- комп'ютер AMDA4–3400, 2.7GHz CPU, 3072 MB RAM.

- Очікувані результати виконання Проєкту (до 1 сторінки)

а) Опис наукової або науково-технічної продукції (за її наявності), яка буде створена в результаті виконання проєкту:

Очікувана в результаті виконання Проєкту наукова продукція полягає у

- з'ясуванні фізичних закономірностей та механізмів взаємодії дефектних комплексів, пов'язаних із атомами перехідних металів, у КСЕ з пружними хвилями ультразвукового діапазону;
- оцінці можливостей цілеспрямованого керування характеристиками кремнієвих сонячних елементів шляхом застосування ультразвукового навантаження під час виробництва та розробці рекомендацій щодо практичного використання даного підходу;
- розробці фізичних основ методу оцінки концентрації електрично-активних дефектів у бар'єрних структурах за величиною фактору неідеальності;
- створенні масиву даних (близько 15 тисяч наборів) розрахованих величин фактору неідеальності для кремнієвих структур p+-p+ з різними геометричними та електрофізичними характеристиками;
- налаштуванні штучної нейронної мережі для оцінки концентрації атомів заліза в кремнієвих p+-p+ структурах;
- підготовка не менше 2 статей у журналах першого та другого квартилів;
- підготовка не менше 3 доповідей на конференціях міжнародного рівня.

б) Обґрунтування переваг очікуваної наукової або науково-технічної продукції порівнянні з існуючими аналогами на підставі порівняльного аналізу.

Отримання наукової або науково-технічної продукції не передбачається.

в) Обґрунтування практичної цінності запланованих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок).

Проєкт передбачає проведення фундаментальних досліджень.

- Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці (до 1 сторінки)

Встановлені фізичні закономірності впливу ультразвукового навантаження на процеси перебудови домішкових центрів, пов'язаних з атомами перехідних металів, можуть бути використані для модифікації стандартних технологічних операцій, що використовуються при створенні кремнієвих сонячних елементів, з метою деактивації вказаних дефектів. Визначенні особливості акусто-дефектної взаємодії дозволять налаштувати параметри ультразвукового впливу задля отримання найбільшої ефективності контрольованої модифікації дефектної підсистеми. Крім того, отримані результати можуть стати основою для розробки методів акустичної інженерії дефектів у напівпровідникових пристроях.

З'ясовані кількісні характеристики взаємозв'язку величини фактору неідеальності та концентрації рекомбінаційних центрів можуть бути покладені в основу експрес-методу оцінки домішкового складу реальних сонячних елементів. Налаштована штучна нейронна мережа може бути безпосередньо використана для оцінки концентрації атомів заліза в кремнієвих p+-p-p+ структурах, де вказані дефекти є основними рекомбінаційними центрами.

4.4. Виконання Проєкту у 2021 році:

- Обґрунтування необхідності придбання у 2021 році за рахунок гранту обладнання та устаткування, а також напрямів їх використання після завершення реалізації Проєкту (наводиться у випадку, якщо придбання спецустаткування передбачене заявкою) (до 1 сторінки).

№ п/п	Найменування обладнання	Обґрунтування необхідності придбання та напрямки подальшого використання
1.	Мультиметр Keithley 2450	Цей прилад поєднує можливості прецизійного джерела напруги та струму з точним мультиметром (6,5 разрядів, виміри напруги, струму та опору). Необхідність його придбання у даному проєкті пов'язана з можливістю реалізації швидкісних вимірювань вольт-амперних характеристик: прилад дозволяє проводити до 3 130 вимірів в секунду, що на два порядки перевищує можливості наявного обладнання; водночас характерні часи світлоіндукованих процесів у сонячних елементах найчастіше знаходяться у діапазоні $10^{-3} \div 10^1$ с і тому використання даного приладу дозволить визначати фізичні закономірності подібних явищ та впливу на них акустичних хвиль.
2.	LRC вимірювач Sourcetronic ST2829C	Система дозволяє, зокрема, визначати ємність в діапазоні 0,00001 пФ до 9,99999 Ф на частоті 20 Гц - 1 МГц.
3.	Регульоване джерело живлення ITECH IT6332B	Необхідність придбання у пов'язана з розширенням можливостей тестування кремнієвих сонячних елементів та підготовки рекомендацій для модифікації технологічних процесів завдяки проведенню вольт-фарад досліджень у широкому частотному діапазоні. Час одного виміру - від 9 мс, що дозволяє охарактеризувати світлоіндуковані зміни в сонячних елементах в динамічному режимі.
4.	Прецизійний мультиметр Keithley DMM6500	Необхідність придбання зумовлена здатністю високоточного (0,0025 %) вимірювання низькоенергетичних сигналів (від 10^{-7} В та 10^{-11} А) зі швидкістю до 21 000 вимірів за секунду. Так

		як перезарядка дефектів у напівпровідникових пристроях внаслідок захоплення носіїв заряду відбувається за $10^{-6} \div 10^{-4}$ с, то подібний пристрій дозволить безпосередньо охарактеризувати подібні процеси, а також вплив на них зовнішніх чинників, що є одним із завдань проекту.
		Після завершення проекту комплекс калібратор-мультиметр Keithley 2400, LRC вимірювач Sourcetronic ST2829C, джерело ІТЕСН ІТ6332В та мультиметр Keithley-DMM6500 буде використовуватися для дослідження параметрів різноманітних напівпровідникових пристроїв та структур, а також для тестування методів активного впливу на їхні властивості. Зокрема, завдяки можливостям швидких вимірювань малих струмів (від 10 пА), він буде використовуватись для характеристики наноелектронних пристроїв.
5.	Ноутбук HP Pavilion Gaming 15	Глибоке навчання передбачає роботу з великими об'ємами даних, що висуває достатньо жорсткі вимоги до швидкодії та оперативної пам'яті обчислювальних пристроїв. Більшість інструментів для роботи зі штучними нейронними мережами, зокрема Keras, який планується використати під час реалізації проекту, оптимізовані саме для використання технологій паралельних обчислень з використанням відео-процесорів, що підтримують технологію CUDA. На жаль, наявний комп'ютерний парк з цієї точки зору є застарілим і для ефективної роботи, передбаченої в рамках проекту необхідне обладнання з більшою розрахунковою потужністю. Після завершення гранту ноутбук буде і надалі використовуватися для реалізації процесів глибокого навчання

- Можливі ризики, що можуть вплинути на реалізацію Проекту у 2021 році (до 1 сторінки).
Введення жорсткого карантину перешкодить виконанню експериментальних досліджень у повному обсязі.

5. НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ, ЩО ОЧІКУЮТЬСЯ ОТРИМАТИ У 2021 РОЦІ (до 2 сторінок)

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, які очікуються отримати в рамках виконання Проекту (із зазначенням їх очікуваних якісних та кількісних (технічних) характеристик)

Експериментальний стенд для оцінювання кінетичних характеристик перебудови дефектів у бар'єрних структурах в умовах ультразвукового навантаження; встановлення кількісних параметрів впливу світло-індукованого розпаду пар Fe-V на параметри вольт-амперних характеристик кремнієвих сонячних елементів (КСЕ); з'ясовані фізичні закономірності та механізми взаємодії дефектних комплексів, пов'язаних із атомами перехідних металів, у КСЕ з повздовжніми та поперечними пружними хвилями ультразвукового діапазону;
програмне забезпечення для реалізації мета-евристичного методу Jaya; масив даних розрахованих величин фактору неідеальності для кремнієвих структур n^+-p-p^+ з різними геометричними та електрофізичними характеристиками; налаштована штучна нейронної мережа для оцінки концентрації атомів заліза в кремнієвих n^+-p-p^+ структурах;
3 підготовлені доповіді на конференції міжнародного рівня.
2 підготовлені статті для журналів першого та другого квартилів.

5.2. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці

Встановлені фізичні закономірності впливу ультразвукового навантаження на процеси перебудови домішкових центрів, пов'язаних з атомами перехідних металів, можуть бути використані для модифікації стандартних технологічних операцій, що використовуються при створенні кремнієвих сонячних елементів, з метою деактивації вказаних дефектів. Визначенні особливості акусто-дефектної взаємодії дозволять налаштувати параметри ультразвукового впливу задля отримання найбільшої ефективності контрольованої модифікації дефектної підсистеми. Крім того, отримані результати можуть стати основою для розробки методів акустичної інженерії дефектів у напівпровідникових пристроях.

З'ясовані кількісні характеристики взаємозв'язку величини фактору неідеальності та концентрації рекомбінаційних центрів можуть бути покладені в основу експрес-методу оцінки домішкового складу реальних сонячних елементів. Налаштована штучна нейронна мережа може бути безпосередньо використана для оцінки концентрації атомів заліза в кремнієвих n+-p-p+ структурах, де вказані дефекти є основними рекомбінаційними центрами.

5.3. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

Отримання наукової або науково-технічної продукції не передбачається.

5.4. Практична цінність запланованих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)

Проєкт передбачає проведення фундаментальних досліджень.

Технічне завдання до Проєкту із виконання наукових досліджень і розробок не повинно містити відомостей, заборонених до відкритого опублікування.

ПОГОДЖЕНО:

Науковий керівник Проєкту

доцент кафедри загальної фізики Київського
національного університету імені Тараса
Шевченка

(посада)

(підпис)

Олег ОЛІХ

(Власне ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Перший заступник виконавчого директора з
питань грантової підтримки Грантонадавача

(підпис)

(Власне ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Начальник управління грантового забезпечення
Грантонадавача

(підпис)

(Власне ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Керівник відповідного структурного підрозділу
управління грантового забезпечення
Грантонадавача

(підпис)

(Власне ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Головний спеціаліст відповідного структурного
підрозділу управління грантового забезпечення
Грантонадавача

(підпис)

(Власне ім'я та ПРІЗВИЩЕ)