

**Національний фонд досліджень України**  
**Конкурс проєктів із виконання наукових досліджень і розробок**  
**“Підтримка досліджень провідних та молодих вчених”**

**Детальний зміст проєкту**

**Назва проєкту**

Розробка фізичних засад акусто-керованої модифікації та машинно-орієнтованої характеристики кремнієвих сонячних елементів

**Науковий керівник проєкту**

Оліх Олег Ярославович, доктор фіз.-мат. наук, доцент

**3. Детальний зміст проєкту (українською та англійською мовами)**

**3.1 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.

**Національний фонд досліджень України**  
**Конкурс проєктів із виконання наукових досліджень і розробок**  
**“Підтримка досліджень провідних та молодих вчених”**

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, нестаціонарна 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.

### 3.2 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 проєкту 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 проєкту 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.

### 3.3 Методологія дослідження (до 2 сторінок)

Експериментальна частина проєкту 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/см<sup>2</sup> в температурному

**Національний фонд досліджень України**  
**Конкурс проєктів із виконання наукових досліджень і розробок**  
**“Підтримка досліджень провідних та молодих вчених”**

діапазоні 290-350 К) та порівняння із беззвуковим 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 ( $10^{15} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) бази при варіації концентрації домішки в інтервалі  $10^{10} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$  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 мета-евристичного методу оптимізації Jaya. Останній етап – налаштування (підбір кількостей схованих шарів та нейронів в них, методу регуляризації, активаційної функції, швидкості навчання) та навчання

**Національний фонд досліджень України**  
**Конкурс проєктів із виконання наукових досліджень і розробок**  
**“Підтримка досліджень провідних та молодих вчених”**

(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.

#### 3.4 Обґрунтування спроможності виконання проєкту учасником Конкурсу (до 3 сторінок).

Досвід наукової роботи Оліха О.Я. – 24 роки., він є автором понад 70 наукових публікацій, серед яких 40 статей (з них 10 – одноосібних робіт у фахових періодичних виданнях, індексованих у Scopus; зокрема 2 та 3 подібні роботи у виданнях 1-го та 2-го квартилів відповідно). Індекс Хірша (Scopus) дорівнює 7. Основна тематика досліджень: використання ультразвуку для характеристики та модифікації властивостей напівпровідникових структур. Ним вперше проведено дослідження перенесення заряду в кремнієвих р-нструктурах та структурах з бар'єром Шотки за умов ультразвукового навантаження; запропоновано модель акустоактивного комплексного дефекту. Він є фахівцем в галузі визначення параметрів бар'єрних структур за вольт-амперними характеристиками, зокрема, з використанням мета-евристичних методів (Journal of Applied Physics, 2015, **118**, 024502). Також він є автором роботи, де проаналізовано зв'язок величини фактору неідеальності кремнієвої  $n^+p$  структури з концентрацією атомів заліза (Superlattices and Microstructures, 2019, **136**, 106309), яка є підґрунтям запропонованого у проєкті методу.

Досвід наукової роботи проф. Костильова В.П. – 45 років., він є автором понад 270 наукових публікацій, серед яких 1 монографія (у складі авторів), 152 статті (з них 54 роботи у періодичних виданнях, індексованих у Scopus; зокрема 4 роботи у виданнях 1-го та 8 робіт 2-го квартилів), 6 патентів України. Індекс Хірша (Scopus) дорівнює 7. Основними напрямками наукової діяльності В. П. Костильова є комплексне дослідження електрофізичних, фотоелектричних і оптичних процесів в багатошарових фоточутливих структурах на основі кремнію, розроблення фізичних і технологічних принципів створення нових типів фотоелектричних приладів і сонячних елементів на їх основі, а також розробка і створення нових методів і методик дослідження зазначених приладів і структур. В результаті проведених досліджень були з'ясовані особливості протікання процесів генерації-рекомбінації та збирання нерівноважних носіїв заряду в кремнієвих структурах з приповерхневими дифузійно-польовими бар'єрами та гетеро-переходами (т.ч. на основі

**Національний фонд досліджень України**  
**Конкурс проєктів із виконання наукових досліджень і розробок**  
**“Підтримка досліджень провідних та молодих вчених”**

гетероструктур  $p^+-\alpha\text{-Si:H}/n\text{-c-Si}/n^+-\alpha\text{-Si:H}$  (HIT)) в широкому діапазоні зміни температури та рівнів освітленості (Journal of Applied Physics, 2016, **119**, 225702; IEEE Journal of Photovoltaics, 2020, **10**, 63-69), запропонований новий механізм прояву впливу екситонів на рекомбінацію нерівноважних носіїв заряду в кремнії за рахунок безвипромінювальної анігіляції екситонів по механізму Оже за участю глибоких домішкових центрів. Отримані результати дозволили розробити технологію виготовлення вискоелективних кремнієвих перетворювачів сонячної енергії наземного та космічного призначення з коефіцієнтом корисної дії до 19% в умовах АМ 1,5, розроблені фізико-технологічні принципи зменшення на 30-40% оптичних втрат в фотоперетворювачах завдяки використанню багат шарових антивідбиваючих покриттів і зменшення омичних втрат.

В рамках Загальнодержавної (Національної) космічної програми України при його активній творчій участі були розроблені і впроваджені у виробництво вискоелективні сонячні батареї ААЕИ.564113.001 для космічних апаратів нового покоління КС5МФ2 «Мікрон». В.П. Костильов створив і очолив єдиний в Україні сертифікований Центр випробувань фотоперетворювачів (ФП) і батарей фотоелектричних (БФ) Інституту фізики напівпровідників НАН України, атестований уповноваженими органами Мінекономрозвитку України на право здійснення вимірювань фото енергетичних параметрів сонячних елементів і батарей, який Постановою Кабінету Міністрів України від 28.08 2013р. №650-р внесений до Державного реєстру наукових об'єктів, що становлять національне надбання.

За роботу «Ключові технології виробництва кремнієвих сонячних елементів та енергетичних систем на їх основі» Костильов В.П. в складі авторського колективу в 2013 році відзначений Державною премією України в галузі науки та техніки.

Досвід наукової роботи Власюка В.М. – 5 років. Він є автором 44 наукових публікацій, серед яких 13 статей (з них 3 – роботи у виданнях 1-го та 2-го квартилів). Основна тематика досліджень: фотоелектричні процеси в фоточутливих структурах на основі кремнію. Ним вперше показано, що рекомбінаційні струми в області просторового заряду кремнієвих фоточутливих структур формуються на основі часів життя, менших, принаймні на порядок, за об'ємні часи життя. Оцінено параметри глибоких рівнів, відповідальних за рекомбінацію в області просторового заряду. Уточнено внесок безвипромінювальної екситонної рекомбінації в ефективний час життя нерівноважних носіїв заряду в кремнії. Власюк В.М. є спеціалістом в області визначення фотоелектричних і рекомбінаційних параметрів фоточутливих структур.

Досвід наукової роботи Лозицького О.В. – 4 роки, він навчається в аспірантурі. Він є автором 13 публікацій, з яких 12 статей у виданнях, індексованих в Scopus (з них 6 – роботи у

**Національний фонд досліджень України**  
**Конкурс проєктів із виконання наукових досліджень і розробок**  
**“Підтримка досліджень провідних та молодих вчених”**

виданнях 1-го та 2-го квартилів). Індекс Хірша (Scopus) дорівнює 3. Лозицький О.В. має досвід моделювання фізичних властивостей матеріалів за допомогою машинного навчання, а саме ним проведено моделювання екранувальних і електричних властивостей одно- і багатошарових композитів в мікрохвильовому діапазоні. Також наявний досвід використання машинного навчання з підкріпленням (reinforcement learning) на платформі Upwork.

Центр випробувань ФП і БФ 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  $((-5 \div 5) \text{ В}, (10^{-8} \div 2 \cdot 10^{-2}) \text{ А},$  точність 0,1%, швидкість – до 50 вимірів/с);
- термостат на базі пропорційно-інтегрально-диференційного контролера (температурна стабільність  $\pm 0,02 \text{ К}$ );
- п’єзоелектричні перетворювачі для збудження повздовжніх та поперечних хвиль у діапазоні  $(1 \div 30) \text{ МГц}$ ;
- 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.

3.5 Обґрунтування необхідності придбання за рахунок гранту обладнання та устаткування, а також напрямів їх використання після завершення гранту (до 1 сторінки).

За рахунок гранту передбачається придбання наступного обладнання:

- Вимірювальна платформа Keithley 4200A-SCS з модулями Keithley 4200-SMU, Keithley 4210-CVU та Keithley 4200A-CVIV. Цей прилад дозволяє з високою точністю проводити швидкі вимірювання вольт-амперних характеристик (у діапазоні струмів  $10^{-15} \div 1 \text{ А}$  та напруг

**Національний фонд досліджень України**  
**Конкурс проєктів із виконання наукових досліджень і розробок**  
**“Підтримка досліджень провідних та молодих вчених”**

$10^{-6} \div 210$  В) та вольт-фарадних характеристик ( $10^{-14} \div 10^{-6}$  Ф, до 400 В у частотному діапазоні  $10^3 \div 10^7$  МГц). Необхідність його придбання у даному проєкті пов'язана з 1) можливістю реалізації швидкісних вимірювань ВАХ: у імпульсному режимі часове розділення даного приладу досягає 10 нс, що суттєво перевищує можливості наявного обладнання; водночас характерні часи процесів перебудови та перезарядки дефектів у напівпровідникових пристроях найчастіше знаходяться у діапазоні  $10^{-6} \div 10^{-2}$  с і тому використання даного приладу дозволить безпосередньо визначати фізичні закономірності подібних процесів та впливу на них акустичних хвиль; 2) розширенням можливостей тестування КСЕ та підготовки рекомендацій для модифікації технологічних процесів завдяки проведенню вольт-фарад досліджень у широкому частотному діапазоні. Після завершення гранту аналізатор Keithley 4200A-SCS буде використовуватися для тестування різноманітних напівпровідникових пристроїв та структур. Зокрема, завдяки можливостям надшвидких вимірювань малих струмів, він буде використовуватись для характеристики нанoeлектронних пристроїв.

- Ноутбук HP Pavilion Gaming 15. Сучасні підходи до глибоко навчання передбачають роботу з великими об'ємами даних, що висуває достатньо жорсткі вимоги до швидкодії та оперативної пам'яті обчислювальних пристроїв. Зокрема, широко використовуються процеси паралельних обчислень з використанням відео-процесорів, що підтримують технологію CUDA. Більшість розроблених інструментів для роботи зі штучними нейронними мережами, зокрема Keras, який планується використати під час реалізації проєкту, оптимізовані саме для використання подібних технологій. На жаль, наявний комп'ютерний парк з цієї точки зору є застарілим і для ефективної роботи зі штучною нейронною мережею, спроможною передбачити концентрацію домішкових атомів заліза на основі параметрів сонячного елементу необхідне обладнання з більшою розрахунковою потужністю. Після завершення гранту ноутбук буде і надалі використовуватися для реалізації процесів глибокого навчання.

3.6 Обсяг фінансування, необхідний для виконання наукового дослідження (розробки), з відповідним обґрунтуванням за статтями витрат згідно з таблицями у Розділі VII (до 2 сторінок).

Витрати на оплату праці, включно з нарахуваннями передбачають фінансування у обсязі 1886210 грн (390250 грн у 1 рік, 1495960 грн у 2 рік). Вони передбачають оплату відповідно до схеми посадових окладів Київського національного університету імені Тараса Шевченка за роботи, виконані виконавцями проєкту, зазначені у наступній таблиці.



**Національний фонд досліджень України**  
**Конкурс проєктів із виконання наукових досліджень і розробок**  
**“Підтримка досліджень провідних та молодих вчених”**

ПП	Завдання під час етапів	Зайнятість, міс
Оліх О.Я., д.ф-м.н., доцент, науковий керівник проєкту	Розробка розрахункової моделі кремнієвої p+-p-p+ структури; розробка програмного забезпечення для автоматизації моделювання та обробки результатів; проведення моделювання; розробка методики оцінювання кінетичних характеристик ВАХ в умовах ультразвукового навантаження; розробка методики екстрагування параметрів дефектних комплексів з ВАХ, проведення відповідних розрахунків; розробка архітектури штучної нейронної мережі, визначення механізмів акусто-дефектної взаємодії; розробка рекомендацій щодо методу кількісної оцінки електрично-активних дефектів у бар'єрних структурах за величиною фактору неідеальності; підготовка доповідей, наукових статей, звітів.	14,5
Костильов В.П. д.ф- м.н., проф.	Підбір кремнієвих сонячних елементів; розробка методики вимірювання кінетики світлоіндукованих процесів в КСЕ; визначення кількісних характеристик кінетики зміни параметрів ВАХ внаслідок відновлення пар Fe-B; визначення механізмів впливу акустичних хвиль на процес перебудови дефектних комплексів; розробка рекомендацій щодо практичного використання ультразвукового навантаження під час виробництва КСЕ; підготовка доповідей, наукових статей, звітів.	14,5
Власюк В.М. к.ф- м.н, н.с.	Закупівля обладнання; відпрацювання режимів вимірювання кінетики світлоіндукованих процесів в КСЕ; вимірювання характеристик впливу світло-індукованого розпаду пар Fe-B на параметри ВАХ за умов ультразвукового навантаження та без нього; підготовка доповідей, наукових статей, звітів.	14,5
Лозицький О.В., аспірант	Розробка програмного забезпечення для автоматизації моделювання та обробки результатів; проведення моделювання; програмна реалізація мета-евристичного методу оптимізації Jaya; налаштування та навчання штучної нейронної мережі; підготовка доповідей, наукових статей, звітів.	14,5
молодий учений, к.ф-м.н	Практична реалізація методики оцінювання кінетичних характеристик ВАХ в умовах ультразвукового навантаження; проведення відповідних вимірювань.	8,5
молодий учений, аспірант	Вимірювання кінетики зміни параметрів ВАХ внаслідок відновлення пар Fe-B за умов ультразвукового навантаження та без нього; проведення закупівель	8,5
студент	Практична реалізація методики оцінювання кінетичних характеристик ВАХ в умовах ультразвукового навантаження; підготовка зразків до вимірювань	8,5

Фінансування на матеріали, необхідні для виконання робіт, крім спецустаткування складає 166900 грн (65000 грн у 1 рік, 101900 грн у 2 рік). Переважно воно передбачає витрати на комплектуючі, необхідні для роботи параметричного аналізатора Keithley 4200A-

**Національний фонд досліджень України**  
**Конкурс проєктів із виконання наукових досліджень і розробок**  
**“Підтримка досліджень провідних та молодих вчених”**

SCS. Крім того, у зв'язку з необхідністю підготовки звітів, передбачені закупівлі паперу та витратних матеріалів для принтерів (7110 грн).

Витрати на спеціалізоване обладнання - 3368370 грн (2262620 грн у 1 рік, 1105750 грн у 2 рік) – обґрунтування наведене у п.3.5.

Витрати на відрядження пов'язані з необхідністю представлення результатів науковій спільноті та ознайомлення з найсучаснішими досягненнями і передбачають участь у закордонних (1 відрядження для кожного з основних виконавців проєкту) та українських (2 відрядження сумарно) конференціях. Передбачений обсяг фінансування – 179330 грн (2 рік).

Інші витрати 257140грн (2 рік) призначені на сплату публікаційних внесків передбачених в очікуваних результатах проєкту 2 статей у міжнародних фахових журналах та організаційних внесків на наукових конференціях.

Загальний обсяг фінансування проєкту - 6508830грн (3019860грн у 1 рік, 3488970грн у 2 рік)

### 3.7 Очікувані результати виконання проєкту (до 1 сторінки):

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  $n^+-p-p^+$  з різними геометричними та електрофізичними характеристиками;
- налаштуванні штучної нейронної мережі для оцінки концентрації атомів заліза в кремнієвих  $n^+-p-p^+$  структурах;
- підготовка не менше 2 статей у журналах першого та другого квартилів;
- підготовка не менше 3 доповідей на конференціях міжнародного рівня.

**Національний фонд досліджень України**  
**Конкурс проєктів із виконання наукових досліджень і розробок**  
**“Підтримка досліджень провідних та молодих вчених”**

3.8 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  $n^+ - p - p^+$  структурах, де вказані дефекти є основними рекомбінаційними центрами.

3.9 Можливі ризики, що можуть вплинути на реалізацію проєкту (до 1 сторінки )

Введення карантину перешкодить виконанню експериментальних досліджень у повному обсязі.