Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України
Адреса: 03028, м. Київ, проспект Науки 41

ПОГОДЖУЮ
В.о. директора ІФН ім. В.Є.Лашкарьова
НАН України

Віктор МЕЛЬНИК

(підпис)

М.П.

ПРОМІЖНИЙ ЗВІТ
(анотований звіт)
про виконану роботу в рамках реалізації проєкту
з виконання наукових досліджень і розробок
«Створення Державної ключової лабораторії
«Центр критичних оптоелектронних мікро-/ нано-технологій та експертиз»»

Науковий керівник проєкту _____ Володимир ДЖАГАН
(підпис)

Рік завершення, номер етапу 2024, №1

Підготовку звіту завершено « 11 » грудня 2024 р.

1. **Назва конкурсу** Дослідницькі інфраструктури для проведення передових наукових досліджень
2. **Номер державної реєстрації проєкту** 0124U003672
3. **Номер Договору про надання грантової підтримки** 2023.05/0022
4. **Підстава для реалізації проєкту з виконання наукового дослідження і розробки**
   Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України
   протокол від «27» червня 2024 року № 20
5. **Найменування організації/установи грантоотримувача** Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України
6. **Власне ім'я та ПРІЗВИЩЕ наукового керівника проєкту** Володимир ДЖАГАН
7. **Місце основної роботи та посада наукового керівника проєкту** Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України
8. **Терміни та тривалість виконання проєкту:**
   Тривалість проєкту 22,5 місяців
   Початок 01.08.2024
   Закінчення 31.12.2026
   Тривалість звітного етапу 4,5 місяців
   Початок 01.08.2024
   Закінчення 31.12.2024
9. **Обсяги фінансування проєкту:**
   Загальний обсяг фінансування:
   за заявкою на отримання грантової підтримки 30 000,0 тис. грн.
   за рішенням наукової ради НФДУ 30 000,0 тис. грн.
   Обсяг фінансування звітного етапу:
   за заявкою на отримання грантової підтримки 5 000,0 тис. грн.
   за договором на отримання грантової підтримки 4 956,8 тис. грн.
   фактичний 4 904,8 тис. грн.
10. **Перелік виконавців з оплатою праці**

№ з/п	Прізвище, ім'я, науковий ступень, вчене звання	Основне місце роботи або навчання	Наявність статусу молодого вченого (на момент подачі звіту)	Посада за проєктом	Форма залучення виконавця (договір ЦПХ, строковий трудовий договір)	Основні завдання у проєкті (стисло окреслити функції)	Особистий підпис
	Джаган В.М., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. НАН України	ІФН НАНУ, в.о. заст. дир.	немає	керівник проекту	ЦПХ	загальна координація робіт за проектом, в т.ч. комунікація з Консультативною радою та курування інформаційного порталу,	

						участь в аналізі результатів, написанні статей та звітів.	
	Назаров О.М., д.ф.-м.н., проф. Основне місце роботи	ІФН НАНУ, зав. відділу.	немає	автор проекту	ЦПХ	курування робіт з різних видів літографії, участь в аналізі результатів, написанні статей та звітів.	
	Васін А.В., д.ф.-м.н.	ІФН НАНУ, пров.н.с.	немає	автор проекту	ЦПХ	виконання робіт з нанесення тонких плівок та їх характеризації, участь в аналізі результатів, написанні статей та звітів.	
	Кухтарук С.М., к.ф.-м.н.	ІФН НАНУ	немає	автор проекту	ЦПХ	теоретично-розрахунковий супровід проекту та курування науково-організаційних заходів, участь в аналізі результатів, написанні статей та звітів.	
	Корчовий А., к.ф.-м.н.	ІФН НАНУ, с.н.с.	немає	виконавець	ЦПХ	проведення досліджень методом зондових мікроскопії та зондова літографія	
	Свеженцова К., к.ф.-м.н.	ІФН НАНУ, с.н.с.	немає	виконавець	ЦПХ	дослідження компонентного складу та	

						структури зразків у проекті	
	Болтовець М.С., к.т.н.	ІФН НАНУ	немає	виконавець	ЦПХ	виконання робіт з оптичної літографії	
	Стрельчук В.В., д.ф.-м.н., проф.	ІФН НАНУ, пр.н.с.	немає	виконавець	ЦПХ	оптичні та електричні дослідження матеріалів і структур досліджуваних у проекті	
	Русавський А., к.ф.-м.н.	ІФН НАНУ, с.н.с.	немає	виконавець	ЦПХ	розробка технологій та формування тонких плівок вуглецевих матеріалів на різних підкладках	
	Колесніков О.М.	ІФН НАНУ, м.н.с.	немає	виконавець	ЦПХ	пробопідготовка (різка, полірування, шліфовка, інші процеси підготовки підкладок до формування на них тонких плівок або мікроструктур)	
	Проскуренко Н.	ІФН НАНУ, пров. інж.	немає	виконавець	ЦПХ	технічні роботи з наповнення інформаційного порталу, технічного та документального супроводу наукових і організаційних заходів	

11. Стислий зміст проєкту *(актуальність, мета, основні завдання, ідеї, гіпотези тощо до 20 рядків)*

Для більшості напрямків мікро-, нано- та оптоелектроніки та сенсорної техніки, актуальним є як пошук нових матеріалів з кращими фізичними властивостями, так і нових технологій щодо їх використання. Зокрема, використання традиційних маскових технологій літографії, на яких базуються сьогоднішні промислові мікро- та наноелектронні виробництва, не є достатньо гнучким методом створення приладових структур на етапі їх розробки і дослідження, оскільки для внесення навіть незначних змін в архітектуру приладу необхідно виготовити повністю новий набір шаблонів. Саме тому, дедалі більшої популярності в секторі досліджень набирає безмаскова фотолітографія на основі лазерного (УФ) випромінювання та нанозондова літографія, як метод структурування матеріалів та модифікації їх фізичних властивостей. В контексті вітчизняної науки і технології, перевага такого виду літографії пов'язана з тим, що в Україні практично відсутні технологічні можливості виготовлення фотошаблонів (масок) для традиційної оптичної літографії. Тому в інтересах державної стратегії відновлення мікроелектронної галузі, фундаментальні дослідження доцільно проводити саме на напівпровідникових структурах створюваних безмасковою літографією.

У даному проєкті пропонується поєднання потужних можливостей безмаскової фотолітографії (буде придбано за кошти проєкту) з наявною в Інституті-заявнику (ІФН НАНУ) експериментально-технологічною та аналітичною базою для створення центру з розробки оптоелектронних пристроїв нового покоління, зокрема фотоприймачів ІЧ та ТГц діапазонів спектра, сенсорних та мікроелектромеханічних (MEMS) систем.

12. Основні результати виконання попереднього етапу *(за наявності, до 20 рядків)*_____

13. Номер та назва звітного етапу *(за наявності)*

№1. Розробка методики нано-зондової та малороздільної безмаскової (лазерної) літографії.

14. Опис процесу реалізації проєкту *(опишіть хід виконання, які дослідження проводились, які методики використовувались, які гіпотези вдалось довести/спростувати тощо, до 50 рядків)*

На даному етапі виконання проекту передбачалося виконання робіт по двох напрямках – (і) відпрацюванню технології нанозондової літографії на основі наявного Атомного Силового Мікроскопа (АФМ) та (іі) відпрацювання режимів роботи наявних комерційних лазерних граверів, для реаліалізації на їх основі малороздільної безмаскової лазерної літографії на матеріалах різного типу – як стандартних фоторезистах, так і напіпровідникових кристалах, тонких плівках напівпровідників, металів, оксидів, вуглецевих (нано)матеріалів.

Метод нанозондової літографії полягає в структуруванні поверхні напівпровідникового моно- або полікристала, моношару 2D матеріалу, тонкої функціональної плівки або фоторезиста, тощо, шляхом механічної або термічної дії зонда атомно-силового мікроскопа (АСМ). Мінімальні бічні розміри структур, які можна сформувати цим методом, залежать від властивостей матеріалу і лежать в діапазоні нанометрів або десятків нанометрів. Використовуючи зонд АСМ, автори розробили оригінальний літографічний підхід, заснований на механічній скануючій зондовій літографії на двошаровому халькогенідному фоторезисті. Ідея цього підходу полягає у використанні наконечника SPM для створення у верхньому шарі масок із роздільною здатністю nm, які потім можна використовувати для хімічного травлення нижнього шару, для подальшого оптичного експонування отриманих рисунків на поверхню підкладки. Крім того, отримані оригінальні результати щодо механічної модифікації властивостей функціональних матеріалів, таких як графен та оксид ванадію, а також локальна модифікація концентрації вільних носіїв в перспективному напівпровідниковому матеріалі GeSn.

В напрямку (іі) лазерної літографії отримано оригінальні результати що підтверджують її переваги над стандартною масковою, зокрема в два-три рази чіткіші краї фоторезисту після проявлення. Відпрацьовано режими лазерної літографії з латеральною роздільною здатністю ~10 μm, яка дозволяє проводити локальний фотовідпал матеріалів. Зокрема, показана можливість формування твердого розчину GeSn з вмістом Sn до 6-10%, що є необхідною умовою отримання прямозонної електронної структури, але важко досягається більшістю технологічних методів. Відпрацьована технологія формування провідних елементів мікронних розмірів плівці діелектрика, на основі часткового фотовідновлення оксиду графену.

Проведені серії експериментів щодо керування локальним фазовим і компонентним складом оксиду ванадію з метою реалізації мікросенсорів на болометричному ефекті. Результатом цих експериментів є рішення розширити цей напрямок на аналогічні дослідження на основі плівок металічного ванадію, оскільки його фотоокислення може дати більш керований і відтворюваний компонентний і фазовий склад.

Окрім проведених експериментальних досліджень, авторами підготовлено оглядову статтю за тематикою безмаскової лазерної літографії.

Окрім використання можливостей нано- та мікролітографії як окремих напрямів, виконавцями проекту розроблено програмне забезпечення для інтеграції G-кодів лазерного гравера в програмне забезпечення скануючого зондового мікроскопа.

Поряд з експериментальними дослідження проводилися теоретичні та чисельні розрахунки по двох напрямках. По-перше, теоретичні дослідження фізичних явищ у структурах на основі графену, результати який опубліковані в журналі Q1. По-друге, проводили моделювання антен терагерцового діапазону, геометричні розміри яких відповідають наявним технологічним можливостям прямої лазерної літографії, і такі структури будуть виготовлені на другому етапі проекту.

15. Результати виконання звітного етапу відповідно до Технічного завдання до проміжного етапу проєкту з виконання наукового дослідження і розробки / Календарного плану виконання наукового дослідження і розробки:

15.1. Заплановані завдання звітного етапу проєкту *(перерахуйте завдання звітного етапу, окреслені у Календарному плані виконання наукового дослідження і розробки, до 20 рядків)*

Систематичне дослідження фізичних та геометричних характеристик, що піддаються модифікації нано-зондовою та безмасковою лазерною (УФ та ІЧ) літографією на різних типах матеріалів (масивні кристали, тонкі плівки вуглецевих матеріалів та напівпровідникових нанокристалів). Чисельне моделювання отриманих експериментальних результатів.

15.2. Отримані результаті звітного етапу проєкту *(опишіть отримані результати виконавцями протягом звітного етапу, посилаючись на заплановані та досягнуті цілі, задачі та індикатори виконання, задані в Технічному завданні до проміжного етапу проєкту з виконання наукового дослідження і розробки / Календарному плані виконання наукового дослідження і розробки. Включіть посилання на публікації у наукових виданнях, інші показники з п. 18, що є підтвердженням досягнення індикаторів виконання етапу, до 70 рядків)*

В результаті проведених досліджень отримано сукупність залежностей щодо впливу режимів зондової та лазерної модифікації масивних та тонкоплівкових матеріалів на кількісні зміни локальних характеристик матеріалів (зміна структури, кристалічності, компонентного складу, напружень, легування та ін.). Зокрема:

- З використанням обладнання та методів скануючої зондової мікроскопії були проведені роботи з нанолітографії на різих типах матеріалів [5]. Найбільш цікаві і оригінальні результати отримані на системі, що складається з двошарового халькогенідного фоторезисту. Суть даного підходу в тому, що для верхнього шару підбирається резист який легко піддається механічному гравіруванню зондом атомного силового мікроскопа (АСМ) і є достатньо стабільним до хімічного травлення нижнього шару фоторезисту, що відбувається через отвори, створені зондом у верхньому шарі. Таким чином, реалізується можливість формування фотошаблона для оптичної літографії з довільним рисунком (геометрією та розмірами) контактів та інших функціональних елементів з розмірами в діапазоні нанометрів, чи принаймні десятків нанометрів. На даному етапі проєкту, відповідно до Календарного плану та Технічного завдання, була розроблена методика нанозондової літографії верхнього шару, і в наступному році вона буде доповнена оптичною розробкою нижнього фоторезиста та створенням простих структур нанопристроїв.
- Застосування прямої (безмаскової) лазерної літографії на «звичайних» фоторезистах, з використанням модифікованої системи оптичного запису, показала очевидні переваги такого підходу над виготовленням аналогічної “картинки” за допомогою механічних фотошаблонів. Отримані результати додатково підтвердили доцільність придбання на

другому етапі проекту сучасного спеціалізованого приладу для прямої (безмаскової) лазерної літографії. Крім цього, врахування отриманого нами досвіду під час виконання даного етапу проекту буде використано нами для уточнення специфікації цього приладу і підбору оптимального його функціоналу. До придбання цього приладу, доцільно продовжувати тестові дослідження з використанням інших комерційно доступних фоторезистів, відпрацьовуючи на них методики аналогічні до розробленої на даному етапі проекту.

- В напрямку тонких плівок на основі графену, оксиду графену (GO) та частково відновленого оксиду графену (rGO) відпрацьовано технологію формування мікронних структур методом лазерної літографії, яка дозволяє вже на наступному етапі перейти до виготовлення тестових зразків сенсорних структур, напр. датчик вологості або температури.
- Встановлено діапазон параметрів лазерного гравера, при якому вдається формувати сплав GeSn з високим вмістом Sn (близько 10%), необхідним для отримання прямозонного матеріалу з високими показниками поглинання та випромінювання світла в ближньому ІЧ діапазоні. Цей напрямок є перспективним для подальшого розвитку в даному проекті, з огляду на високий попит на різні сфери застосування ІЧ матеріалів.
- Дослідження, проведені на плівках оксиду ванадію [2,4,6], поки що не дають можливість зробити остаточні висновки щодо можливості контрольованого формування певної фази V_xO_y, тому в наступному році ми поширимо цей напрямок на лазерно-індуковане окислення плівок металевого ванадію, очікуючи більшого контролю над отриманим V_xO_y склад.
- У напрямку досліджень можливості підсилення поглинання чи випромінювання ТГц випромінювання, шляхом чисельних розрахунків отримані параметри структур, що будуть використані на наступному етапі для виготовлення перших тестових зразків (на підкладках Si та CdHgTe), що дозволить уже подальшу більш точну оптимізацію цих параметрів, як у розрахунках, так і в технології, виходячи з експериментальних результатів.
- Встановлено можливість виготовлення OFET-підкладок на основі тонких плівок різних металів (золото, срібло, мідь, алюміній, нікель) та різного матеріалу підкладки (скло, кремній) з довільною геометрією контактів. На наступному етапі вони будуть протестовані та оптимізовані з використанням різних активних шарів (полімерів, напівпровідникових нанокристалів тощо).
- Теоретично досліджено сильну взаємодію між плазмонами графену та поверхневими оптичними фононами полярної підкладки [1,7]. Було показано, що дисперсійне рівняння для цієї системи містить сингулярності, що пов’язані з точками розгалуження на площині комплексної частоти. Для того щоб коректно врахувати ці сингулярності ми запропонували використовувати задачу з початковою умовою, яка дає однозначний розв’язок і встановлює фізичну картину зв’язаних коливань. Зокрема, ми виявили, що нижня плазмон-фононна мода, яка з точки зору дисперсії має хорошу добротність, майже відсутня в спектрах збудження.

15.3. Відхилення від Календарного плану виконання наукового дослідження і розробки (за наявності) *(вкажіть та детально обґрунтуйте можливі відхилення від Технічного завдання до проміжного етапу проєкту з виконання наукового дослідження і розробки / Календарного плану виконання наукового дослідження і розробки, до 30 рядків)*

Немає

16. Наукова цінність і актуальність отриманих результатів *(науково-технічної продукції), їх порівняння з українськими та/або кращими закордонними аналогами, до 30 рядків)*

Продемонстровані можливості безмаскової лазерної та нанозондової літографії в модифікації властивостей матеріалів (тонких плівок) різного типу – металів, напівпровідників, діелектриків – вказують на перспективність даного технологічного підходу для отримання мікро- та оптоелектронних структур на наступних етапах проекту. Показана

перевага прямої лазерної літографії над масковою і при роботі зі стандартними комерційними фоторезистами.

Встановлено можливість виготовлення OFET-підкладок на основі тонких плівок різних металів (золото, срібло, мідь, алюміній, нікель) та різного матеріалу підкладки (скло, кремній) з довільною геометрією контактів. На наступному етапі вони будуть протестовані та оптимізовані з використанням різних активних шарів (полімерів, напівпровідникових нанокристалів тощо). Ідея виготовлення таких підкладок полягає в можливості дослідження та застосування наноматеріалів і композитів, які мають погану електропровідність, але через малу відстань між контактами достатню для існуючих лабораторних приладів. Наявні в продажу аналоги коштують дуже дорого і мають постійний дизайн і геометричні розміри. Власне виготовлення забезпечує гнучкість конструкції для кожного типу зразків і завдань, що важливо як для власних досліджень, так і для виконання студентські дипломних робіт (це сприяє освітньому компоненту результатів проекту).

17. Практична цінність результатів для потреб оборони, безпеки, економіки та/або суспільства України *(у разі наявності, до 30 рядків)*

Такі галузі як мікро-, нано- та оптоелектроніка, ІЧ- та ТГц-техніка, сенсорика, переживають стрімкий ріст – як якісний технологічний, так і ріст кількісного попиту у найрізноманітніших галузях, від індустрії розваг до безпеки і оборони. Всі розвинені країни прагнуть максимально збільшити свій вклад в сектор передової електроніки, щоб не потрапити в повну торгову і політичну залежність від інших країн. Для більшості напрямків мікро-, нано- та оптоелектроніки та сенсорної техніки, актуальним є як пошук нових матеріалів з кращими фізичними властивостями, так і нових технологій щодо їх використання. Зокрема, використання традиційних маскових технологій літографії, на яких базуються сьогоднішні промислові мікро- та наноелектронні виробництва, не є достатньо гнучким методом створення приладових структур на етапі їх розробки і дослідження, оскільки для внесення навіть незначних змін в архітектуру приладу необхідно виготовити повністю новий набір шаблонів. Саме тому, дедалі більшої популярності в секторі досліджень набирає безмаскова фотолітографія на основі лазерного (УФ) випромінювання та нанозондова літографія, як метод структурування матеріалів та модифікації їх фізичних властивостей. В контексті вітчизняної науки і технології, перевага такого виду літографії пов’язана з тим, що в Україні практично відсутні технологічні можливості виготовлення фотошаблонів (масок) для традиційної оптичної літографії. Тому в інтересах державної стратегії відновлення мікроелектронної галузі, фундаментальні дослідження доцільно проводити саме на напівпровідникових структурах створюваних безмасковою літографією.

18. Основні кількісні індикатори виконання звітного етапу *(у таблиці мають бути відображені індикатори, які було заплановано в Технічному завданні до проміжного етапу проєкту з виконання наукового дослідження і розробки із зазначенням відповідного фактичного кількісного виконання цих індикаторів. Якщо у Технічному завданні до проміжного етапу проєкту з виконання наукового дослідження і розробки кількісні показники не планувались, то у таблиці відображаються лише показники у разі їх наявності / виконання)*

№ з/п	Індикатори виконання	Заплановано (відповідно до КП), кількість	Фактично отримано (відповідно до КП), кількість
1.	**Публікація результатів:**	**2**	**3**
1.1.	Статті у журналах, що індексуються наукометричними базами даних:	2	3
	- Scopus та/або Web of Science Core Collection, всього, од.	2	3

	з них із квартилем Q1 і Q2 на момент опублікування, од.	1	1
	з них із квартилем Q3 і Q4 на момент опублікування, од.	1	2
1.2.	Статті у наукових журналах (без квартилю), збірниках наукових праць, матеріалах конференцій тощо, що індексуються наукометричними базами даних Scopus або Web of Science Core Collection (крім тих, що увійшли до п.1.1) , од.		
1.3.	Статті у фахових виданнях України категорії «Б» , од.		
1.4.	Статті у періодичних виданнях інших країн, що мають ISSN, од.		
1.5.	Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України та не індексуються наукометричними базами даних Scopus або Web of Science Core Collection, од.		
1.6.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) у закордонних видавництвах іноземними мовами, од.		
1.7.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) в українських видавництвах, од.		
1.8	Словники, довідники, енциклопедії, видані українськими та/або закордонними видавництвами , од.		
1.9	Інші публікації, які не описані у пп. 1.1-1.8, од.		
2.	**Презентація та дисемінація результатів:**	**4**	**8**
2.1.	Міжнародні науково-комунікативні заходи, конференції, од.	2	5
2.2.	Всеукраїнські та регіональні науково-технічні/промислові виставкові заходи, од.		
2.3.	Представлення розробки/бізнес-плану/результатів проєкту на:		
	інноваційних фестивалях, од.		
	конкурсах стартапів, од.		

	акселераційних програмах, од.		
	хакатонах, од.		
2.4.	Науково-популярні публікації з метою поширення інформації про результати проєкту для загальної (широкої) аудиторії, од.	1	1
2.5.	Представлення інформації про результати проєкту на науково-популяризаційних заходах (Дні науки, Наукові пікніки тощо) , од.		
2.6.	Інші заходи, які не описані у пп. 2.1-2.5, од.	1	2
3.	**Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності (ОПІВ)**	**1**	**2**
3.1.	Отримано патентів України на винахід, од.		
3.2.	Отримано свідоцтв України на промисловий зразок , од.		
3.3.	Отримано патентів України на корисну модель, од.		
3.4	Отримано охоронний документ на ОПІВ інших країн, од.		
3.5	Інші ОПІВ, які не описані у пп. 3.1-3.4, од.		
3.6	Подано заявок на отримання охоронного документу на ОПІВ України та /або інших країн, од.	1	2
4.	**Впровадження та використання наукових або науково-практичних результатів:**		
4.1.	Підписання (укладання) договорів (угод) на впровадження (використання) результатів проєкту (окрім індивідуальних), серед них:		
4.1.1	Господарських договорів/контрактів, од./тис.грн.		
4.1.2	Ліцензійних договорів/договорів на ноу-хау, од./тис.грн.		
4.1.3	Грантових угод, од./тис.грн.		
4.1.4	Інші договори (угоди), які не описані у пп. 4.1.1-4.1.3, од./тис. грн.		
4.4	Документально підтверджено використання результатів у практиці органів державної/місцевої влади, суспільних практиках тощо, од.		
4.5	Проведено маркетингові дослідження, перемовини з потенційними замовниками із підписанням протоколу (меморандуму,		

	угоди) про наміри комерційного впровадження результатів, од.		
4.6	Подано заявок на державні, міжнародні наукові гранти (окрім індивідуальних) , од.		
5.	**Створено чи істотно удосконалено/покращено існуючі:**		
5.1.	Пристрої (макет, експериментальний/дослідний зразок) , од.		
5.2.	Матеріали, процеси, технології, технологічні регламенти, цифрові продукти та електронні сервіси, од.		
5.3.	ТУ, ДСТУ, будівельні норми, зареєстровані проєкти законодавчих актів, од.		
5.4.	Наукові (науково-технічні) послуги, од.		
5.5	Іншу продукцію, яка не описана у пп. 5.1-5.4, од.		

19. Відхилення від запланованих індикаторів, зазначених у п. 18 *(у разі наявності зазначити і обґрунтувати причини таких відхилень та їх вплив на подальше виконання проєкту, до 20 рядків)*

Є перевиконання по деяких пунктах.

20. Вихідні дані щодо показників виконання відповідно до п. 18 *(зазначити дані про публікації, конференції, отримання ОПІВ, впровадження, створення НТП, залучення молодих вчених тощо з додаванням Web-посилання (за наявності) на ресурси, де вони розміщенні)*

Статті (п.1 в Розділі 18)

[1] S. M. Kukhtaruk, and V. A. Kochelap, “Multivalued dispersion equation for coupling between plasmons and surface optical phonons in a graphene/polar-substrate system” Phys. Rev. B Phys. Rev. B 110, L241403 (2024). DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.110.L241403 (**Q1**).

[2] A. Korchoviy, P. Lytvyn, V. Dzhagan, O. Gudymenko, K. Svezhentsova, M. Boltovets, V. Strelchuk, O. Kolesnikov, O. Isaieva, V. Yefanov, V. Melnik, B. Romanyuk. “Nanomechanical and vibrations properties of vanadium oxide thin films obtained by multi-step deposition approach”. *Physics and Chemistry of Solid State* 25, 871-879 (2024) https://doi.org/10.15330/pcss.25.4.871-879 (**Q3**).

[3] A.A. Kryuchyn, V.V. Petrov, I.V. Kosyak, S.M. Shanoilo, Ie.V. Beliak, S.A. Kostyukevich, P.M. Lytvyn, M.S. Boltovets, V.V. Strelchuk, K.V. Svezhentsova, O. Kolesnikov, A.A. Korchovyi, V.M. Dzhagan. Prospects for the creation of maskless photolithography technology based on direct laser recording. *Semicond. Phys. Quantum Electronics and Optoelectronics* (*accepted)* (**Q3**)

Конференції (п.2.1 в Розділі 18)

[4] Lasers-induced modifications of the materials properties for application in maskless lithography. A. Korchovyi, K. Svezhentsova, A. Kryuchyn, I. Kosiak, V. Strelchuk, S. Kostyukevich, M. Boltovets, O. Kolesnikov, V. Dzhagan. VIII Intern. Science-and-Practices conf. «Physics and Chemistry of solid state: current state, achievements, and perspectives», 18-19.10.24, Lutsk, Ukraine, PP. 56-57 .

[5] “Integrated macro and nano patterning for rapid prototyping of semiconductor devices”. A. Korchovyi, P. Lytvyn, O. Nazarov, I. Indutnyi, V. Min’ko, V. Dzhagan. IIIrd Intern. Research and Practice Conf. “Nanoobjects & Nanostructuring” 7–10.10.24, Lviv, Ukraine . Proceedings, p. 74-75

[6] “Nanoindentation in vanadium oxide characterizations” . P. Lytvyn, V. Dzhagan, A. Korchovyi, O. Stadnik, V. Strelchuk. III[rd] Intern. Research and Practice Conference “Nanoobjects & Nanostructuring”. October 7–10, 2024, Lviv, Ukraine, PP. 104-105.

[7] Kapush O., Mazur N., Korchoviy A, Svezhentsova K., Rusavsky A., Proskurenko N., Strelchuk V., Yukhymchuk V., Dzhagan V. Semiconductor nanoparticles and thereon based composites for maskles optical lithography. III[rd] Intern. Research and Practice Conference “Nanoobjects & Nanostructuring”. October 7–10, 2024, Lviv, Ukraine, P. 61.

[8] Conversion of MoO_2/MoO_3 thin films deposited by magnetron sputtering into MoS_2 nanocrystallites by thermal sulfidation in H_2S flow. III[rd] Intern. Research and Practice Conf. “Nanoobjects & Nanostructuring” 7–10.10.24, Lviv, Ukraine. Proceedings, p. 81-82

Патенти (п.3 в Розділі 18)

[9] О.А. Капуш, Л.І. Тріщук, Н.В. Мазур, В.О. Юхимчук, В.В. Тетьоркін, К.В. Свеженцова, О.М. Колесніков, М.С. Болтовець, В.М. Джаган, В.В. Стрельчук, А.В. Русавський. Спосіб синтезу нанокристалів CdHgTe з люмінесценцією в ближньому інфрачервоному діапазоні. Патент на корисну модель. Номер заявки u202403942 від 13.11.2024 р. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1828964/

[10] М.В. Вуйчик, В.В. Тетьоркін, К.В. Свеженцова, Ф.Ф. Сизов, З.Ф. Цибрій, В.М. Джаган, М.С. Болтовець, А.В. Русавський. Спосіб виготовлення захисного пасиваційного покриття CdTe до епітаксійних шарів HgCdTe для інфрачервоних та терагерцових приймачів випромінювання. Патент на корисну модель. Номер заявки u202405388 від 05.08.2024 р. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1813530/

Інші публікації (п.2.4 в Розділі 18)

[11] Напівпровідникові квантові точки: дослідження та застосування (Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 23 жовтня 2024 року). Вісник Національної академії наук *України* № 11 (2024) с. 75-81. https://visnyk-nanu.org.ua/ojs/index.php/v/article/view/4910

Заходи науково-організаційного характеру (п.2.6 в Розділі 18)

[1] Доповідь на засіданні Президії НАН України 23 жовтня 2024 року.

[2] Воркшоп «Workshop on Direct Optical Lithography for Advanced Opto- and Microelectronics» Nov 6, 2024. https://www.spo.optics.org.ua/lithography_workshop/

До звіту додаються електронні копії наукових публікацій, охоронних документів, інша наукова продукція із вказанням DOI *(окрім матеріалів, які містять інформацію з обмеженим доступом, Додаток 1 до Проміжного звіту)***.**

- у випадку необхідності надання друкованої версії звіту, до нього додаються друковані додатки *(окрім великих (більше 50 сторінок) за обсягом - монографії, підручники, словники тощо та інші матеріали).*

21. Рішення вченої (наукової, науково-технічної, технічної) ради або іншого керівного (дорадчого) органу (за відсутності зазначеної ради) організації/установи грантоотримувача щодо результатів розгляду Проміжного звіту *(стисло зазначити текст висновку ради про відповідність/невідповідність виконаних за проєктом робіт Технічному завданню до проміжного етапу проєкту з виконання наукового дослідження і розробки***)** Об’єм робіт та завдання 1 етапу проєкту виконані в повному обсязі у відповідності до Календарного плану та Технічного завдання проєкту.

Додаток 2 – копія витягу з протоколу вченої (наукової, науково-технічної, технічної) ради або іншого керівного (дорадчого) органу (за відсутності зазначеної ради) організації/установи грантоотримувача.

22. Анотація основних результатів звітного етапу проєкту *(готується українською та англійською мовами, до 30 рядків кожною мовою, викладається науково-популярним стилем)* **Додаток 3**

23. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з аналогами, що існують, до 10 рядків Розроблені методи модифікації локальних властивостей тонких плівок полімерів, напівпровідників, діелектриків та металів під дією лазерного випромінювання та інструментів нанозондової мікроскопії, з метою подальшої реалізації методу безмаскової літографії. Отримані результати не мають аналогів в Україні.

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

Показана перевага прямої лазерної літографії над масковою і при роботі зі стандартними комерційними фоторезистами, та продемонстровані можливості безмаскової лазерної та нанозондової літографії в модифікації властивостей матеріалів (тонких плівок) різного типу – металів, напівпровідників, діелектриків – вказують на перспективність даного технологічного підходу для отримання мікро- та оптоелектронних структур на наступних етапах проекту. Це дозволить зробити більш доступними сучасні дослідження не лише для колег-науковців з інших установ, але й дасть можливість підвищувати рівень практичної підготовки студентів профільних спеціальностей на базі майбутньої дослідницької інфрастурктури. Довгострокові наукові перспективи нерозривно пов'язані з тим фактом, що одним з розділів схваленої Кабінетом Міністрів України Стратегії інноваційного розвитку України до 2030 року є «Напівпровідники (Chips UA)». Значна роль відводиться у проєкті освітній компоненті що передбачатиме використання передової інструментальної та фахової бази створеної інфраструктури для практичної частини підготовки студентів профільних факультетів на найвищому рівні.

Примітка: Проміжний звіт не повинен містити відомостей, заборонених до відкритого опублікування.

Науковий керівник Проєкту
В.о. заст. директора
ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
Володимир ДЖАГАН

(підпис)