

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Сумського державного університету
Василь КАРПУША



АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту
із виконання наукових досліджень і розробок
Перспективні напівпровідникові наноматеріали для потреб гнучкої електроніки:
синтез, розробка методів друку та оптимізація їх структурних, оптичних і
фотоелектричних властивостей

Назва конкурсу: Підтримка досліджень провідних та молодих учених

Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0313

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок реєстраційний номер Проєкту 2020.02/0313 «Перспективні напівпровідникові наноматеріали для потреб гнучкої електроніки: синтез, розробка методів друку та оптимізація їх структурних, оптичних і фотоелектричних властивостей».

Рішення Наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу Підтримка досліджень провідних та молодих учених, протокол № 21 від «16-17» вересня 2020 року.

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік – 2022 рік

Тривалість виконання Проєкту у 2021 році

Початок – 19.05.2021 р.

Закінчення – 15.12.2021 р.

Загальна вартість Проєкту, грн. – 8 866 544,00

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 507 055,00

2-й рік 3 992 100,00

3-й рік 4 367 389,00

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту буде залучено 7 виконавців, з них:

доктори наук 2

кандидати наук 5

інші працівники 0

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ СУБВИКОНАВЦЯ ПРОЄКТУ

ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА

Найменування підприємства/установи/організації
Сумський державний університет

Організаційно-правова форма підприємства/установи/організації
Державна організація (установа, заклад, підприємство)

Підпорядкованість підприємства/установи/організації
Міністерство освіти і науки України

Код ЄДРПОУ
05408289

Код(и) КВЕД
72.19

Стратегічні напрями наукової діяльності
Дослідження й експериментальні розробки у сфері інших природничих і технічних наук

ПІБ керівника підприємства/установи/організації
Васильєв Анатолій Васильович

Юридична адреса підприємства/установи/організації
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Фактична адреса
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Поштова адреса
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Телефон
+38 (0542) 64-04-99

Посилання на веб сторінку підприємства/установи/організації
<https://sumdu.edu.ua>

ІНФОРМАЦІЯ ПРО ОРГАНІЗАЦІЮ СУБВИКОНАВЦЯ ПРОЄКТУ

Найменування підприємства/установи/організації
Інститут фізики Національної академії наук України

Організаційно-правова форма підприємства/установи/організації
Державна організація (установа, заклад, підприємство)

Підпорядкованість підприємства/установи/організації
Національна академія наук України

Код ЄДРПОУ
05417302

Код(и) КВЕД
72.19 Дослідження й експериментальні розробки у сфері інших природничих і технічних наук

Стратегічні напрями наукової діяльності
фізика конденсованого стану, включаючи фізику м'якої речовини; нанофізика та наноелектроніка;
фізика лазерів, нелінійна та сингулярна оптика, голографія; фізика поверхні, емісійна та плазмова
електроніка

ПІБ керівника підприємства/установи/організації
Бондар Михайло Віталійович

Юридична адреса підприємства/установи/організації
проспект Науки 46, м. Київ, 03680

Фактична адреса
проспект Науки 46, м. Київ, 03028

Поштова адреса
проспект Науки 46, м. Київ, 03028

Телефон
+380 (44) 525 12 20

Посилання на веб сторінку підприємства/установи/організації
<http://www.iop.kiev.ua/ua/>

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту

Метою проєкту є створення матеріалознавчих і фізико-технологічних основ одержання нових перспективних напівпровідникових наноматеріалів, плівок і гетероструктур на їх основі з контрольованими та наперед заданими електричними, оптичними і структурними властивостями шляхом друку, придатних для використання в гнучкій електроніці, опто- і мікроелектроніці, сенсоріці та геліоенергетиці.

4.2. Основні завдання Проєкту

- розробка лабораторних методик одержання перспективних напівпровідникових наноматеріалів CuO , ZnO , NiO , $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$, SnS шляхом синтезу наночастинок колоїдно-поліольним методом, створення наночорнил на їх основі та осадження наноструктурованих плівок і гетеропереходів методом друку на 2D і 3D-принтерах;
- дослідження структурних, оптичних та фотоелектричних властивостей та визначення хімічного складу наноматеріалів;
- встановлення механізмів структуро- та фазоутворення наноматеріалів, визначення природи дефектів, дослідження їх впливу на структурно-чутливі фізичні характеристики матеріалів;
- встановлення кореляцій між фізичними властивостями наноматеріалів та фізико-технологічними умовами їх отримання; - оптимізація структурних та електричних властивостей наноматеріалів;
- розробка прототипів приладів фото- і термоелектрики та сенсорики на основі гетеропереходів та рекомендацій щодо подальшого використання отриманих наноматеріалів у приладах гнучкої електроніки.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми

Швидкий прогрес у технології сприяє всезростаючому попиту на електронні пристрої з покращеною продуктивністю та новою функціональністю. В останні роки значний інтерес

проявляється до гнучкої електроніки завдяки її потенційному застосуванню у гнучких дисплеях, сенсорах, датчиках, сонячних батареях, генераторах тощо. Важливим є також розробка гнучких медичних пристроїв для постійного моніторингу стану здоров'я людини. Тому, останнім часом розвиток такої електроніки став однією з найбільш актуальних тем у світовій науці. У подальшому це забезпечить розробку недорогих, ефективних та гнучких електронних пристроїв різного застосування.

- Новизна Проєкту

У результаті виконання проєкту будуть закладені матеріалознавчі основи одержання суспензій наночастинок, плівок та гетероперехідних систем на основі таких нових перспективних напівпровідникових матеріалів, як CuO, ZnO, NiO, CZTSSe, SnS для подальшого створення функціональних елементів електроніки для потреб сенсорики, опто- і мікроелектроніки, гнучкої електроніки, геліоенергетики, тощо, розробці лабораторної методики синтезу наночастинок та нанесення одно- та багатошарових систем на основі вказаних матеріалів.

- Методологія дослідження

Плівкові напівпровідникові матеріали будуть одержані шляхом друку наночорнилами із використанням струменевих 2D і 3D принтерів, тобто перспективної сучасної технології, яка є економічною, такою, що масштабується та не потребує складних етапів виробництва. Для цього будуть створені суспензії наночастинок, які можуть бути використані як чорнила. Основною вимогою для створення таких наночорнил є колоїдна стабільність нанокристалів в екологічно безпечному розчиннику. Це буде досягнуто розміщенням на поверхні нанокристалів органічних молекул із оптимальною довжиною карбонового ряду. При цьому буде використано такий перспективний метод синтезу нанокристалів, як колоїдно-поліольний синтез, в результаті чого буде створено наноматеріали різного фазового та хімічного складу. Після друку плівок і багатошарових систем з використанням розроблених чорнил, вивчення та оптимізації їх властивостей, будуть створені прототипи приладових структур на гнучких та прозорих підкладках для, так званої гнучкої електроніки, електроніки що носить, та мікроелектроніки. Буде перевірена також можливість друку плівок з використанням, так званих молекулярних розчинів.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

1. Визначено вплив післяростових відпалів при температурі $T_a = 300, 350, 400, 450, 500, 550$ °C протягом години в атмосфері на хімічний склад і структурні характеристики наночастинок та плівок NiO, нанесених на скляні підкладки з використанням друку чорнилами створеними на основі суспензії синтезованих частинок. Встановлено, що в наноструктурованих плівках, за виключенням зразка відпаленого при 450 °C, спостерігається суттєвий надлишок кисню над нікелем. Текстурованість досліджених шарів виявилася низькою та майже не покращувалася при збільшенні температури відпалу за виключенням плівки відпаленої при $T_a = 550$ °C де, очевидно, відбулися процеси рекристалізації. Показано, що значення періоду ґратки NiO змінювалося в інтервалі $a = (0,41717- 0,41954)$ нм для наночастинок та $a = (0,41717- 0,41954)$ для плівок. Після стабілізації при температурі $T_a = (400-450)$ °C період ґратки матеріалу для всіх зразків у подальшому монотонно зростає під час збільшення температури відпалу. Встановлено, що найбільш близький до стехіометричного період ґратки мали наночастинки відпалені при температурі $T_a = 500$ °C та плівки при $T_a = 550$ °C.

2. З використанням декількох методів визначено розмір ОКР та рівень мікрODEФОРМАЦІЙ ϵ у досліджених зразках. При цьому спостерігається загальна тенденція до збільшення L та зменшення

ε з підвищенням температури відпалу, як для плівок так і наночастинок. За рівнем мікродеформацій визначено значення мікронапружень σ у зразках. Показано, що у наночастинках NiO значення мікронапружень змінювалися в інтервалі $\sigma = (0,29-1,89)$ МПа, в той час як у плівках в інтервалі $\sigma = (0,49-1,22)$ МПа. Встановлено, що плівки оксиду характеризуються досить високою концентрацією дислокацій, особливо відпалені при низьких температурах. Зі зростанням температури відпалу концентрація дислокацій на межах ОКР L у наночастинках монотонно зменшується від $14,20 \cdot 10^{-16}$ лін/м² (300 °С) до $0,75 \cdot 10^{-16}$ лін/м² (550 °С), аналогічно веде себе концентрація дислокацій в середині ОКР зменшуючись від $1,22 \cdot 10^{-16}$ лін/м² (300 °С) до $0,07 \cdot 10^{-16}$ лін/м² (550 °С). Особливо швидке зменшення ρ відбувається при температурі відпалу вищій 400 °С. При одній і тій же температурі відпалу концентрація дислокацій обох видів була вища у плівках порівняно з наночастинками.

3. Для наноструктурованих плівок NiO виявлено структуру в спектрах ФЛ, яка зумовлена як оптичними переходами із участю локалізованих екситонних станів та донорно-акцепторних пар (ДАП), так і збуджених електронних локалізованих станів іонів Ni²⁺. Показано, що довгохвильовий край поглинання плівок NiO пов'язаний із переходами електронів із основного локалізованого рівня іонів Ni²⁺ в основну зону провідності, що формується 4s-станами іонів нікелю. Знайдено, що енергія такого фотоіонізаційного переходу складає близько 4,25 еВ. Встановлено, що підвищення температури відпалу плівок NiO особливо при температурах вищих 450 °С приводить до значного покращення їх структурних і оптичних характеристик, що необхідно для приладового використання тонких шарів.

4. Методом спреї-піролізу одержані наноструктуровані плівки CuO на скляних та гнучких підкладках. Визначено вплив температури підкладки T_s та відпалу T_a на їх морфологічні, структурні та оптичні властивості. З використанням рентгено-фазового аналізу було встановлено, що плівки CuO є однофазними та мають моноклінну структуру. Це підтверджено методом раманівської спектроскопії, яка дозволила виявити три фононні моди A1g, B1g і B2g моноклінного CuO. Зсув піків у спектрах різних зразків свідчить про наявність в них мікронапружень і дефектів, які порушують кристалічну ґратку CuO. Вимірювання методами атомно-силової мікроскопії (АСМ) та сканувальної електронної мікроскопії (СЕМ) показали, що отримані шари мають досить високу шорсткість поверхні. З'ясовано, що підвищення температури T_s під час нанесення плівок приводить до збільшення розміру зерен в них.

5. Оптичні дослідження дозволили встановити, що отримані плівки CuO мають високі значення коефіцієнта поглинання, що підтверджує можливість їх використання як поглинальних шарів СЕ. При цьому оптична ширина забороненої зони матеріалу зразків змінюється в діапазоні від $E_g = 1,45$ еВ до 1,60 еВ. Деяка розбіжність одержаних значень ширини забороненої зони зі значеннями характерними для об'ємного матеріалу може бути пов'язана з наявністю в зразках дефектів.

6. Встановлено природу поглинання світла наноструктурованими плівками оксиду міді. Показано, що таке поглинання зумовлене як прямими так і непрямыми оптичними переходами кристалічної фази CuO охоплює широкий спектральний діапазон від 500 до 1000 нм, що підтверджує можливість використання такого матеріалу як поглинальних шарів нового покоління СЕ. Показано, що високотемпературний відпал сприяє покращенню кристалічної структури плівок, що, очевидно, зумовлено збільшенням середнього розміру нанокристалітів. Виявлено, що шари оксиду міді після відпалів представляють собою суміш двох кристалічних фаз (CuO та Cu₂O), а при температурах відпалу $T_a = (450-500)$ °С відбувається перерозподіл вмісту цих фаз. При цьому визначальним стає внесок двоокису міді, що погіршує оптичну та кристалічну якість плівок. Встановлено достатньо добру оптичну та кристалічну якість плівок оксиду міді, отриманих на гнучких підкладках (поліамід та поліестер) та визначено шляхи подальшого її покращення шляхом відпалу.

7. На основі результатів оптичних та фотоелектричних досліджень проведена оцінка величини забороненої зони матеріалу наночастинок CuO та Cu₂O. Встановлено, що для CuO значення величин E_g складають 1,42 та 2,00 еВ для непрямих та прямих оптичних переходів, відповідно. В той же час, величина E_g прямих переходів фази Cu₂O складає 2,48 еВ. Встановлено, що в залежності від технологічних умов отримання наноструктурованих плівок, зокрема температури відпалу, відношення вмісту двох кристалічних фаз оксидів міді є різним. Це дає можливість управляти складом плівок, змінюючи умови їх відпалу.

8. Методом поліольно-колоїдного синтезу одержані наночастинки ZnO, леговані Al та In. Вивчено вплив кількості домішки у прекурсорі на структурні, субструктурні, морфологічні властивості та хімічний склад отриманих наноматеріалів у межах вмісту Al (In) 0-10%. Встановлено, що наночастинки ZnO, леговані до 3% Al (2% In), містять лише одну фазу гексагонального ZnO. Подальше збільшення концентрації Al (In) викликає утворення вторинних фаз Al₂O₃ (In₂O₃, In(OH)₃). При збільшенні вмісту Al (In) у прекурсорі також збільшуються середні розміри наночастинок. Встановлено, що збільшення концентрації Al (In) у прекурсорі веде до зростає його кількість у наночастинках майже лінійним чином. Успішне впровадження домішок до наночастинок підтверджується методами рентгенівської дифрактометрії та EDX. При цьому змінюється стехіометрія матеріалу. Якщо при низькій концентрації Al (In) наночастинки містять високу концентрацію атомів металу (вакансій кисню), то при високій - стехіометрія зміщується у сторону надлишку кисню.

9. Показано, що при збільшенні концентрації алюмінію у зразках їх період ґратки a збільшується від значень $a = 0,3245$ нм до $a = 0,3257$ нм, в той же час стала c змінюється слабо ($c = (0,5214 - 0,5211)$ нм) і є дещо більшою ніж довідникові значення. З'ясовано, що в легованих зразках до вмісту алюмінію 7% відбувається збільшення розміру ОКР після цього цей розмір починає зменшуватися. Одночасно при цьому рівень мікрореформацій в зразках спочатку зменшується, а потім починає зростати до значень $\epsilon = 1,57 \cdot 10^{-3}$. З використанням субструктурних характеристик наноматеріалу розрахована концентрація дислокацій в ньому. Встановлено, що наночастинки містять високу концентрації дислокацій $\rho = 10^{15}$ см⁻², при цьому їх концентрація при збільшенні вмісту алюмінію спочатку зменшується, а потім починає рости. Синтезовані нанокристали ZnO з контрольованим вмістом Al (In) можуть бути використані для створення наночорнил для друку активних елементів гнучкої електроніки, оптоелектроніки, сенсорної техніки, провідних струмознімальних шарів СЕ третього покоління тощо.

10. Проведено дослідження оптичних та фотоелектричних властивостей наночастинок ZnO, як нелегованих, так і легованих Al (In). Показано, що спектри ФЛ нелегованих наночастинок ZnO проявляють смуги, що пов'язані із наявністю поверхневих станів та внутрішніх дефектів типу вакансій кадмію. Поряд з цим, спостерігаються особливості на короткохвильовому краю ФЛ, які зумовлені проявом повздовжньо-поперечного розщеплення екситонних станів або випроміненням, зумовленим міжзонними переходами, що свідчить про достатньо хорошу кристалічну якість наночастинок. Проявляється також смуга ФЛ при 620 нм, пов'язана із рекомбінаційними процесами з участю рівня дефектів типу вакансій кисню. Тобто для чистих наночастинок ZnO ФЛ визначається рекомбінаційними процесами із участю вакансій кадмію та поверхневих станів. Для наночастинок ZnO, легованих 1% Al в спектрі ФЛ проявляється вузька інтенсивна лінія при 397,5 нм, яка асоціюється із рекомбінацією електронів із локалізованих рівнів нижче зони провідності та дірок валентної зони, а також широка смуга при 620 нм, яка відповідає рекомбінаційним процесам із участю вакансії кисню. При збільшенні концентрації домішки до 3% визначальною в спектрі ФЛ є смуга, зумовлена поверхневими станами, енергетичне положення яких залежить від величини деформації наночастинок. Таким чином, встановлено, що в процесі легування наночастинок ZnO визначальним є участь поверхневих станів та екситонів локалізованих на них, оскільки при великих концентраціях домішкови атоми, в основному, розміщуються на поверхні наночастинок та межах їх розділу.

11. Для зменшення високої концентрації антиструктурних дефектів у кестеритних матеріалах, які суттєво погіршують їх властивості, проведена заміна атомів Zn у кристалітній ґратці сполуки $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ на атоми Mg (Sn на Ge). В результаті методом спреї-піролізу в широкому інтервалі зміни складу ($0 < x < 0,2$), отримані плівки твердого розчину $\text{Cu}_2\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{SnS}_4$ ($\text{Cu}_2\text{ZnSn}_x\text{Ge}_{1-x}\text{S}_4$). Методами рентгенівської дифракції та EDX встановлено, що в результаті легування Mg (Ge), фазова структура сполуки $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ не змінюється, а Mg успішно займає позиції Zn (Sn - Ge) у кристалічній ґратці матеріалу. При цьому вміст магнію у плівках $\text{Cu}_2\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{SnS}_4$ змінюється майже лінійним чином при низькій концентрації (<50%) цього елемента у прекурсорі, стабілізуючись на рівні (15-16)% при подальшому збільшенні цієї концентрації у розчині. Одночасно ефективність вбудовування таких елементів як Cu, Sn, S у ґратку плівок твердого розчину $\text{Cu}_2\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{SnS}_4$ залежить від вмісту в них магнію та цинку. Утворення чистої кестеритної фази у плівках, підтверджено методом раманівської спектроскопії, яка свідчить, що форма спектру сполуки $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ з малим вмістом магнію повністю відповідає довідниковій. На спектрі присутні піки при частотах зміщення 116, 299, 339 та 375 cm^{-1} , які відповідають модам фононних коливань A1, A2 і E, відповідно, атома S в кестеритній сполуці. У поєднанні з результатами дифрактометричних досліджень аналіз спектрів раманівського розсіювання дозволяє стверджувати, що вторинні фази в плівках сполуки $\text{Cu}_2\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{SnS}_4$ не виявляються. Це свідчить про однофазність такого матеріалу.

12. Дослідження оптичних властивостей плівок дозволило встановити, що поглинання наноструктурованих плівок $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ охоплює широку спектральну область від 700 до 1000 нм і зумовлене міжзонними оптичними переходами. Показано, що ширина забороненої зони для нелегованих плівок, отримана шляхом апроксимації краю поглинання, складає $E_g = 1,47$ еВ при $T = 300$ К. Отже, досліджувані плівки мають кестеритову кристалічну структуру. Однак, слід очікувати, що реальне значення величини E_g є дещо більшим, оскільки ця величина визначається максимальним значенням коефіцієнта поглинання. Це також підтверджується результатами вимірювання спектрів ФЛ тонких шарів, де спостерігається широка смуга з максимумом при енергії 1,56 еВ, що пов'язана із рекомбінацією носіїв з участю енергетичних зон наночастинок. Встановлено, що легування атомами магнію приводить до деякого зменшення величини E_g до значень (1,12 – 1,27) еВ, що може бути зумовлено утворенням твердих розчинів або деформацією наночастинок та зміною енергії хімічних зв'язків Sn-S. Таким чином, використаний нами метод нанесення плівок твердих розчинів $\text{Cu}_2\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{SnS}_4$ різного складу дає можливість одержати однофазний напівпровідниковий матеріал з контрольованим вмістом цинку та магнію, що дозволяє покращити його електрофізичні та оптичні характеристики.

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

Одержані в процесі синтезу наноматеріали на основі сполук CuO, ZnO, NiO, $\text{Cu}_2\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{SnS}_4$ володіють основними фізичними характеристиками, що відповідають світовому рівню, а по деяким параметрам переважають їх. Виготовлені наночорнила для друку принтерами не містять небезпечних і токсичних компонентів та є дешевими, що дозволяє використовувати їх навіть у домашніх умовах. Отримання таких наносистем з використанням розроблених методів приводить до економії енергетичних ресурсів та дозволяє створювати наночорнила для друку функціональних елементів великої площі на різноманітних гнучких підкладках, у тому числі папір, тканини, шкіра, тощо.

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

Запропонований проект започатковує розробку проривної технології виготовлення чутливих елементів гнучкої електроніки на основі оксидних та інших перспективних напівпровідникових наноматеріалів з використанням 2D та 3D принтерів, яка відноситься до технологій четвертої індустріальної (технологічної) революції. За думкою цілого ряду вчених більшість виробів промисловості, будівництва, домашнього побуту у найближчому майбутньому будуть друкуватися. Запропонована лабораторна методика друку чорнилами є енергоощадною, екологічно безпечною та такою, що може бути використана у специфічних умовах (дома, в умовах військових конфліктів або умовах обмеженого простору).

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проекту в суспільній практиці.

Розроблені новітні лабораторні методики отримання перспективних оксидних напівпровідникових наноматеріалів шляхом синтезу наночастинок та створення наночорнил на їх основі, з подальшим друком одношарових та багатшарових систем із використанням 2D і 3D принтерів дозволять отримати структури із контрольованими фізичними властивостями. У подальшому, вони будуть використані для створення на їх основі прототипів, а в подальшому, при продовженні фінансування, ефективних пристроїв гнучкої електроніки, оптоелектроніки, сенсорики та геліоенергетики, зокрема, сонячних елементів нового покоління.

Особливість таких наноматеріалів пов'язана із використанням дешевої, простої і, в той же час, ефективної нанотехнології диспергування синтезованого наноматеріалу в екологічно безпечних та дешевих розчинниках.

Отримані результати також будуть використані в наукових дослідженнях, пов'язаних із розвитком сучасних уявлень щодо механізмів структуро- та фазоутворення наноструктурованих напівпровідникових плівок, цілеспрямованого формування дефектної структури таких матеріалів, а також її впливу на структурно-чутливі оптичні та електронні характеристики наноматеріалів. Таким чином, отримані результати дозволять розробити наукові основи плівкового матеріалознавства та будуть використані для визначення оптимальних фізико-технологічних умов друку шарів напівпровідникових сполук з контрольованими фізичними властивостями.

Окрім того, отримані при виконанні проекту наукові результати можуть бути впроваджені в ряді організацій України при проведенні наукових досліджень та в навчальному процесі. Результати досліджень будуть опубліковані в престижних фахових міжнародних журналах Q1 та Q2 кватилів та представлені на міжнародних конференціях. Будуть подані та отримані патенти на корисні моделі.

Анотований звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування.

Науковий керівник Проекту

Завідувач кафедри електроніки і комп'ютерної техніки Сумського державного університету

Опанасюк Анатолій Сергійович



(підпис)