



ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. директора Інституту фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України

Мельник В.П.

М.П.

АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу в рамках реалізації проекту
із виконання наукових досліджень і розробок

«Сенсор диму на основі плазмон-поляритонного фотодетектора»

Назва конкурсу: «Наука для безпеки людини та суспільства»
Реєстраційний номер Проекту: 2020.01/0348

Підстава для реалізації Проекту з виконання наукових досліджень і розробок (реєстраційний номер та назва Проекту) 2020.01/0348

«Сенсор диму на основі плазмон-поляритонного фотодетектора»

Рішенням наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Наука для безпеки людини та суспільства» протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21.

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Тривалість виконання Проекту: 2020р. - 2021 р.

Початок – дата укладання Договору про виконання наукових досліджень і розробок; 03.11.2020р.

Закінчення – 15 грудня 2021 рік.

Загальна вартість Проекту, грн. 1 555 400,00 (один мільйон п'ятсот п'ятдесят п'ять тисяч чотириста гривень 00 копійок)

Вартість Проекту по роках, грн.:

1-й рік 344 000,00 (триста сорок чотири тисячі гривень 00 копійок)

2-й рік 1 211 400,00 (один мільйон двісті одинадцять тисяч чотириста гривень 00 копійок)

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проекту буде залучено 5 виконавців, з них:

доктори наук 0 ;

кандидати наук 4 ;

інші працівники 1.

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї)
СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України

03028, м. Київ, пр. Науки, 41

р/р UA678201720313291002201012876

у ДКСУ в м. Києві

МФО 820172

ЄДРПОУ 05416952

В.о. директора, проф., д.ф.-м.н. В.П.Мельник

Проект виконується без залучення субвиконавців.

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Розробка прототипу оптичного сенсора диму на основі плазмон-поляритонного фотодетектора з пониженою імовірністю хибного спрацювання від часточок звичайного пилу.

4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

1. Розробка конструкції плазмон-поляритонного фотодетектора (ППФ).
2. Виготовлення ППФ з використанням технології інтерференційної фотолітографії.
3. Характеризація морфологічних, оптичних та електрофізичних характеристик ППФ.
4. Розробка робочої камери сенсора, електронних схем узгодження і підсилення сигналу з ППФ.
5. Розробка стенду для випробувань.
6. Проведення тестових випробувань з використанням різного типу джерел диму та наявності пилу в середовищі.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

До складу систем протипожежної сигналізації входять, датчики температури, відеокамери, хімічні датчики по продуктах горіння, а також - сенсори диму. Найбільш розповсюджені серед них є сенсори іонізаційного та фотоелектричного типу. Однак у них є недолік, пов'язаний з хибним спрацюванням на пилові частинки, не пов'язані з пожежею. Нещодавно з'явився новий принцип розрізняння продуктів горіння від пилових частинок, що полягає у збудженні поверхневого плазмон-поляритонного резонансу (ППР) в золотій плівці, що межує з продуктами горіння, в геометрії Кречмана. Реєстрація ППР відбувається з допомогою додаткового фотодетектора.

- Новизна Проєкту (до 400 знаків)

В проекті для збудження і реєстрації ППР пропонується використати плазмон-поляритонний фотодетектор (ППФ), що являє собою фоточутливу структуру (бар'єр Шоттки, р-п перехід) з металевою (Au або Ag) дифракційною граткою на поверхні. Залежність фотоструму ППФ в умовах ППР від умов на поверхні буде використана для реєстрації частинок диму (розміром 0,1-10 мкм), водночас вона буде не чутлива до частинок пилу, які значно більше по розміру, а тому погано прилягають до поверхні, оскільки ППР є поверхневою хвилею, локалізованою на відстані в кілька мікрон.

- Методологія дослідження (до 400 знаків)

Буде застосовано: інтерференційна фотолітографія - для виготовлення ППФ; спектральна еліпсометрія – для визначення оптичних параметрів і товщин складових ППФ; СЕМ та АСМ – для характеристики поверхні ППФ; спектрально-кутові залежності фотоструму в умовах ППР – для характеристики резонансу в ППФ; вольт-амперні, та вольт-фарадні характеристики – для електрических досліджень; тестування на стенді – для визначення реакції ППФ на дим від різних джерел при наявності пилу та підвищеної вологості.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) 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)

В ході виконання проєкту в 2021 році досліджено поверхню виготовлених структур ППФ методами скануючої електронної та атомно-силової мікроскопії та отримано морфологічні параметри виготовлених дифракційних граток, що підтвердили отримання їх запланованих характеристик: період 1.2 мкм та 0.8 мкм. Глибина модуляції при цьому склала 100-130 нм. Вимірювані спектрально-кутові залежності фотоструму у видимому та близькому ІЧ діапазонах в околі плазмон-поляритонного резонансу. Резонанс фотоструму може бути налаштований на спектрально-кутовий діапазон від 0.6 мкм до 1.1 мкм та від 0 до 30 градусів. Досягнуто величину поляризаційної чутливості I_p/I_s від 3 до 5, по абсолютному значенню величина фоточутливості сягає 0.1 А/Вт, спектральна та кутова півширина резонансу від 100 нм до 200 нм та від 5 до 10 градусів відповідно. Проведена всебічна характеристика електрофізичних властивостей ППФ.

Методами Вольт-Амперних та Вольт-Фарадних характеристик визначені висота бар'єру 0.4 еВ - 0.5 еВ, параметр неідеальності п від 2 до 3. Досягнуті параметри ППФ наведені в Таблиці.

Параметр	Технічні показники ППФ			
Напівпровідник	Si			
Плазмон-несучий метал	Au			
Робоча довжина хвилі світла λ , нм	600-1000			
Період дифракційної гратки, нм	1200		800	
Номер дифракційної гратки	№ 3.2	№ 4.2	№ 5.4	№ 6.4
Глибина модуляції дифракційної гратки, нм	103	123	109	114
Інтенсивність ПППР (Максимальна поляризаційна чутливість), I_p/I_s	3:1	3.5:1	4.5:1	5:1
Кутова півширина максимуму резонансу (при $\lambda=800$ нм) $\Delta\Theta$, град	5.2°	5.2°	5.0°	5.0°
Фоточутливість в максимумі резонансу, А/Вт	0.1	0.1	0.08	0.08
Параметр неідеальності ВАХ	<3.5			
Висота бар'єру, еВ	>0.4			

Розроблена конструкція камери сенсора з урахуванням особливостей роботи ППФ. Робота робочої камери сенсора відбувається на модульованому по інтенсивності джерелі світла. Розроблена електронна система виділяє і підсилює змінну складову сигналу.

Розроблено і виготовлено стенд для випробувань сенсорів диму різного типу, в тім числі і на основі ППФ та проведено випробування на ньому з використанням різних джерел диму: деревини, тканини та цигарок. Отримано параметри розробленого сенсора диму на основі ППФ та визначена реакція на дим від цигарок, від бавовняної тканини та від деревини. А саме, дим від всіх протестованих джерел призводить до суттєвого зсуву спектрального (10÷27 нм) та кутового (1÷5 градусів) положення плазмон-поляритонного резонансу і пов'язаного з ним фотоструму в сторону більших довжин хвиль і більших кутів, що є експериментально-доведеною фізичною основою для побудови датчиків диму на основі розроблених ППФ. Ступінь цього зміщення різна для різних типів диму. Проведено тестування в умовах підвищеної вологості (100%). Показано, що максимально можлива вологість (до випадання роси) практично не зсуває ні спектральне (<0.5 нм), ні кутове (<0.2 градуса) положення резонансу, при цьому вплив диму набагато більший. Проведено тестування в умовах підвищеної запиленості. Показано, що як і очікувалось, ВПЛИВ ПИЛУ НЕ ЗСУВАЄ РЕЗОНАНС, а призводить тільки до зменшення величини фотоструму внаслідок затінення частини поверхні ППФ.

Отримано патент України на корисну модель: №148155 від 14.07.2021, Бюл. №28. Україна, МПК (2019.01) G01N21/55. Спосіб реєстрації резонансу в плазмон-поляритонних фотодетекторах /С.В.Мамикін, О.В.Штикало, В.І.Минько, О.С.Кондратенко, І.Б.Мамонтова, В.Р.Романюк (Україна); заявник та патентовласник Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України. <https://sis.ukrpatent.org>. Ідентифікатор електронного примірника 0221120721.

Подано заявку на отримання патенту України на винахід (№ а202107072 від 10.12.2021) МПК (2019.01) G01N21/55. Спосіб виготовлення плазмон-поляритонного фотодетектора на основі *n-p* переходу в кремнії / **Мамікін С.В., Штикало О.В., Минько В.І., Душейко М.Г., Кондратенко О.С., Мамонтова І.Б.**, Романюк В.Р.

Опубліковано статті: 1) Gnilitskyi, I., **Mamykin, S.V.**, Lanara, C., Hevko, I., Dusheyko, M., Bellucci, S., & Stratakis, E. (2021). Laser nanostructuring for diffraction grating based surface plasmon-resonance sensors. *Nanomaterials*, 11(3), 591. <https://doi.org/10.3390/nano11030591>, Q1, IF=5.076. 2) **Mamykin S.V.**, Gnilitskyi I.M., Dusheyko M.G., DeVol T.A., Bliznyuk V.N. Femtosecond laser nano-structuring for surface plasmon resonance-based detection of uranium // *Applied Surface Science*. – 2021. – V.576, Part A. 151831, ISSN 0169-4332. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151831>, Q1, IF=6.707.

Зроблено доповіді на конференції: 1) **Штикало О.В.**, Семікіна Т.В., **Мамікін С.В.** Детектор диму на основі плазмон-поляритонного фотодетектора. // Proceeding of young scientists conference on semiconductor physics with international participation «Lashkaryov's readings», April 5-7, 2021, Kyiv, Ukraine. P. 31-32. ISBN 978-966-02-9603-9. 2) **Штикало О.В.**, Семікіна Т.В., **Мамікін С.В.** Спосіб реєстрації резонансу в плазмон-поляритонних фотодетекторах. // Proceeding of young scientists conference on semiconductor physics with international participation «Lashkaryov's readings», April 5-7, 2021, Kyiv, Ukraine. P. 33-34. ISBN 978-966-02-9603-9.

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

В ході виконання проекту виготовлено основу сенсорів диму, а саме плазмон-поляритонні фотодетектори (ППФ) на основі Si. Переваги ППФ при виготовленні сенсорів диму: ППФ в порівнянні з призмовими системами для збудження і реєстрації поверхневого плазмонного резонансу (ППР) має простішу конструкцію, хороші резонансні властивості та малі габарити. Один елемент використовується як для збудження ППР, так і для його реєстрації. Низький вміст золота та можливість виготовлення масиву елементів на одному кристалі дозволяє отримати низьку собівартість пристрою. В порівнянні з іншими сенсорами диму, розроблений сенсор на основі ППФ НЕ ЧУТЛИВИЙ до пилу, та практично не чутливий до високої вологості.

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

Практична цінність розроблених ППФ, як основи сенсорів диму обумовлена широким використанням протипожежних сигналізацій у повсякденному житті. Часто таким пристроям доводиться працювати в умовах високої запиленості, що призводить до хибного спрацювання звичайних оптических або ж іонізаційних сенсорів. Необхідність локалізації і завчасного попередження пожеж примушує до густого розташування таких сенсорів на відстані 4-5 метрів, що збільшує загальну їх кількість на об'єкті. Таким чином, існує потреба в дешевих, пилостійких і компактних сенсорах диму. Запропонований ППФ, як основа таких сенсорів, НЕ ЧУТЛИВИЙ до пилу, та практично не чутливий до високої вологості.

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

Результати виконання проекту можуть бути у першу чергу використані для розробки сенсорів диму та систем протипожежної безпеки на їх основі. Розроблений тип сенсорів має потенціал мініатюризації, оскільки використовуються технології мікроелектроніки, а сам кристал сенсору може бути зроблений дуже малого розміру. Реєстрація задимленості відбувається по виникненню контакту продуктів горіння та/або по адсорбції частинок диму на малу площину кристалу, а не по розсіянню або пропусканню світла крізь вимірювальну камеру, яка може бути доволі габаритною. Також датчик може використовуватись для моніторингу навколошнього середовища. Після модифікації вимірювальної камери, ППФ може замінити фотодетектори які вже використовуються в промислових датчиках диму фотоелектричного типу. Використання розробленого пилостійкого сенсору диму матиме особливий ефект у відповідальних випадках, коли хибне спрацювання внаслідок наявності пилу, може спричинити великі матеріальні втрати,

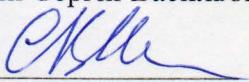
наприклад в літаках, коли це призводить до негайної посадки і передчасного незапланованого переривання маршруту руху.

Звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування.

Науковий керівник Проекту

Зав. від., к. ф.-м. н.

Мамікін Сергій Васильович



(підпис)