УДК 535.215; 535.3; 535.421; 621.315.592; 621.382.2; 621.383.4; 621.793; 681.586
УКПП 72.19.13
№ РК 0120U104805
Інв. №

Національна академія наук України

Інститут фізики напівпровідників (ІФН) ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
03028, м. Київ, проспект Науки, 41; тел/факс (044) 525 40 20

ЗАТВЕРДЖУЮ
В. о. директора
Інституту фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
_____ В.П. Мельник
(підпис)
«10» грудня 2021 р.

НАУКОВИЙ ЗВІТ
ПРО РЕЗУЛЬТАТИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТУ

за договором № 33/01/0348 від 28.04.2021 р.

СЕНСОР ДИМУ НА ОСНОВІ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОННОГО ФОТОДЕТЕКТОРА

грантова підтримка Національного фонду досліджень України
у межах конкурсу «Наука для безпеки людини та суспільства»
(заключний)

Науковий керівник НДР
завідувач відділом,
канд. фіз.-мат. наук _____ С.В. Мамикін
(підпис)
«10» грудня 2021 р.

2021

Результати роботи розглянуто та прийнято Вченою радою Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, протокол від «14» грудня 2021 р. № 21.

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник НДР

Завідувач відділом, старший дослідник, канд. фіз.-мат. наук — _____ (підпис) — С.В. Мамикін (вступ, розділи 1-6, висновки)

« 14 » грудня 2021 р.

Виконавці:

Старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук — _____ (підпис) — В.І. Минько (розділи 2)

« 14 » грудня 2021 р.

Старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук — _____ (підпис) — О.С. Кондратенко (розділи 3,6)

« 14 » грудня 2021 р.

Старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук — _____ (підпис) — В.Р. Романюк (розділи 5)

« 14 » грудня 2021 р.

Наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук — _____ (підпис) — І.Б. Мамонтова (розділи 3)

« 14 » грудня 2021 р.

Інженер 2-ї кат. — _____ (підпис) — О.В. Штикало (розділи 2-4,6)

« 14 » грудня 2021 р.

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 90 с., 6 розділів, 5 табл., 42 рис., 1 дод., 37 джерел.

Об'єктом дослідження даного проєкту є збудження поверхневих плазмон-поляритонних хвиль на періодично профільованих металевих плівках плазмон-активного металу (золота), що є одночасно інтерфейсом з тестованим середовищем та частиною фоточутливої структури (бар'єра Шотткі, *p-n* перехід) на пластині Si і призводить до резонансного збільшення фотоструму при певних умовах та його використання для детектування частинок диму.

Предметом дослідження є плазмон-поляритонні фотодетектори (ППФД), утворені на основі тонких профільованих металевих плівок і фоточутливої структури (бар'єру Шотткі, *p-n* переходу) на пластині монокристалічного Si.

Метою роботи є розробка прототипу оптичного сенсора диму на основі ППФД з пониженою імовірністю хибного спрацювання від дрібнодисперсних частинок звичайного пилу.

В проєкті проведено чисельне моделювання резонансних характеристик ППФД. Було отримано, що для збудження поверхневого плазмон-поляритонного резонансу (ПППР) на довжині хвилі максимального за інтенсивністю резонансу для золотої плівки, що визначається спектральним положенням максимуму відношення дійсної частини діелектричної проникності до її уявної частини і складає ~800 нм, при куті падіння світла 20° період дифракційної ґратки має бути ~1200 нм, а глибина її модуляції 75 нм. Для отримання резонансу при кутах падіння світла близьких до нормального, період має бути ~800 нм. Товщина золотої плівки має бути в середньому 45 нм.

Виготовлено ППФД на основі Si з використанням технології інтерференційної фотолітографії з хорошими оптоелектричними та електрофізичними характеристиками. Досліджено морфологію їх поверхні методами скануючої електронної та атомно-силової мікроскопії і отримано параметри виготовлених дифракційних ґраток, що підтвердили отримання їх запланованих характеристик: період 1.2 мкм та 0.8 мкм. Глибина модуляції при

цьому склала 100-130 нм. Виміряні спектрально-кутові залежності фотоструму у видимому та ближньому ІЧ діапазонах в околі плазмон-поляритонного резонансу. Резонанс фотоструму може бути налаштований на спектрально-кутовий діапазон від 0.6 до 1.1 мкм та від 0 до 30°. Досягнуто величину поляризаційної чутливості I_p/I_s від 3 до 5, абсолютне значення величина фоточутливості сягає 0.1 А/Вт, спектральна та кутова півширина резонансу від 100 до 200 нм та від 5° до 10°, відповідно. Проведена всебічна характеризація електрофізичних властивостей ППФД. З допомогою вольт-амперних (ВАХ) та вольт-фарадних (ВФХ) характеристик визначені висота бар'єру φ_b=0.4 ÷ 0.5 еВ, параметр неідеальності n від 2 до 3.

Розроблено метод реєстрації резонансу в ППФД, що використовує як резонанс фотоструму, так і зменшення коефіцієнта відбивання світла від поверхні ППФД. Внаслідок такого підходу інтенсивність резонансів зросла в 1.8 разів, а їх півширина зменшилась в 1.33 рази.

Розроблена конструкція камери сенсора з урахуванням особливостей роботи ППФД. Робота сенсорного фотодетектора відбувається на періодично-модульованому по інтенсивності джерелі світла. Розроблена електронна система виділяє і підсилює змінну складову сигналу.

Розроблено і виготовлено стенд для дослідження чутливості сенсорних елементів та датчиків диму різного типу, в тім числі і на основі ППФД. Проведено випробування на стенді з використанням різних джерел диму: деревини, тканини та цигарок. Отримано параметри розробленого сенсора диму на основі ППФД та визначено, що контакт з димом від всіх протестованих джерел призводить до суттєвого зсуву спектрального (10÷27 нм) та кутового (1°÷5°) 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 ППФД. Величина цього зміщення різна для різних типів диму.

Проведено тестування сенсорних елементів на основі ППФД в умовах підвищеної вологості (100%). Показано, що максимально можлива вологість (до випадіння роси) практично не зсуває ні спектральне (<0.5 нм), ні кутове (<0.2°) положення резонансу, при цьому вплив диму набагато більший.

Проведено тестування сенсорних елементів на основі ППФД в умовах підвищеної запиленості. Показано, що як і очікувалось, наявність пилу не зсуває спектральне чи кутове положення резонансу, а призводить тільки до зменшення величини фотоструму внаслідок затінення частини поверхні ППФД.

За результатами виконання проєкту отримано один патент України на корисну модель, подано одну заявку на отримання патенту України на винахід, опубліковано дві статті в журналах Q1 (*Nanomaterials,* Impact factor=5.076 та *Applied Surface Science,* Impact factor IF=6.707), зроблено дві доповіді на конференції.

Ключові слова: Сенсор диму, Поверхневий плазмонний резонанс, Плазмон-поляритонний фотодетектор.

ABSTRACT

Report SRW: 90 p., there are: 6 chapters, 42 figures, 5 tables, 1 app., 37 sour.

The object of study of this project is the excitation of surface plasmon-polariton waves on periodically profiled metal films of plasmon-carried metal (gold) which is both an interface with the test environment and part of the photosensitive structure (Schottky barrier, *p-n* junction) on the Si monocrystal wafer which leads to resonant enhancement of the photocurrent and its use for smoke particles detection.

The subject of the study is the plasmon-polariton photodetectors (PPPD), formed on the basis of thin profiled metal films and photosensitive structure (Schottky barrier, *p-n* junction) on the Si monocrystal wafer.

The aim of the work is to develop a prototype of an optical smoke sensor based on PPPD with a reduced probability of false positives from finely dispersed dust particles.

The numerical modeling of resonant characteristics of PPPD is carried out in the project. It was obtained that for the excitation of surface plasmon-polariton resonance (SPPR) at the maximum resonance intensity wavelength for gold film, which is determined by the spectral position of the maximum ratio of the real part of the dielectric constant to its imaginary part and is ~ 800 nm, at an angle of 20^{o}, the diffraction grating period should be ~ 1200 nm, and the depth of its modulation 75 nm. To obtain resonance at angles of incidence of light close to normal, the period should be ~ 800 nm. The thickness of the gold film should be 45 nm in average.

Si-based PPPDs are made using interference photolithography technology with good optoelectrical and electrophysical characteristics. Their surface was studied by scanning electron and atomic force microscopies and the morphological parameters of the fabricated diffraction gratings were obtained, which confirmed the obtaining of their planned characteristics: the periods of 1.2 μm and 0.8 μm. The modulation depth was 100-130 nm. The spectral and angular dependences of the photocurrent in the visible and near-infrared ranges in the vicinity of plasmon-polariton resonance excitation were measured. The resonance of the photocurrent can be adjusted to the spectral-angular

range from 0.6 to 1.1 μm and from 0 to 30°. The value of polarization sensitivities I_p/I_s are from 3 to 5, the absolute value of photosensitivity reaches 0.1 A/W, spectral and angular half-width of resonance are 100 to 200 nm and 5 to 10 degrees, respectively. A comprehensive characterization of the electrophysical characteristics of PPPD has been carried out. The height of potential barrier φ_b=0.4÷ 0.5 eV, the parameter of nonideality n=2÷3 were determined by the methods of current–voltage and capacitance-voltage characteristics.

A method for recording of the resonance in PPPD has been developed, which uses both photocurrent resonance and reduction of the light reflection coefficient from the PPPD surface. As a result of this approach, the intensity of resonant curves increased in 1.8 times and their half-width narrowed in 1.33 times.

The design of the sensor chamber is developed taking into account the peculiarities of PPPD application. The operation of the sensor takes place with a intensity modulated light source. The developed electronic system extract and amplifies the variable component of the electrical signal.

An equipped smoke box for the sensitivity testing of smoke sensors of various types, including those based on PPPD, has been developed and manufactured. Tests were conducted using different sources of smoke: wood, cotton fabric and cigarettes. The investigations of the developed smoke detector based on PPPD sensor have shown that the smoke from all tested sources leads to a significant shift of the spectral (10 ÷ 27 nm) and angular (1 ÷ 5°) position of the plasmon-polariton resonance band and the associated photocurrent band towards greater wavelengths and larger angles, which are experimentally proven physical basis for the construction of smoke detectors based on the developed PPPD. The degree of this shift is different for different types of smoke.

Some tests were performed in conditions of high humidity (100%). It is shown that the maximum possible humidity (before dew) does not shift either the spectral (<0.5 nm) or the angular (<0.2 degrees) resonance position, and the effect of smoke is much greater.

Some tests were carried out in conditions of high dust content. It is shown that, as expected, the effect of dust does not shift the resonance band position, but only leads to a decrease in the photocurrent due to the shading of PPPD surface.

As a result of the project, one patent of Ukraine for a utility model was obtained, one application for a patent of Ukraine for an invention was filed, two articles were published in Q1 (*Nanomaterials,* with Impact factor = 5.076 and *Applied Surface Science,* with Impact factor = 6.707), two presentations on the conferences were made.

Keywords: Smoke sensor, Surface plasmon resonance, Plasmon-polariton photodetector.

Зміст

РЕФЕРАТ **3**

ABSTRACT **6**

Зміст **9**

1 Розробка конструкції ППФД 15

1.1 Розробка дизайну конструкції сенсора диму 15

1.2 Теоретичні розрахунки оптимальних параметрів дифракційної ґратки для розроблюваних ППФД 16

2 Виготовлення ППФД з використанням технології інтерференційної фотолітографії 20

3 Характеризація морфологічних, оптичних та електрофізичних характеристик ППФД 24

3.1 Дослідження поверхні виготовлених структур методами скануючої електронної та атомно-силової мікроскопії, отримання морфологічних параметрів виготовлених дифракційних ґраток 24

3.2 Оптичні дослідження ППФД 28

3.2.3 Оптичні дослдіження ДҐ у видимому та ближньому ІЧ діапазонах для визначення інтенсивності та ширини плазмон-поляритонного резонансу 34

3.3 Фотоелектричні та резонансні характеристики ППФД 36

3.4 Електричні властивості виготовлених ППФД 41

3.4.1 Вольт-Амперні характеристики ППФД 41

3.4.2 Вольт-Фарадні характеристики ППФД 43

4. Розробка робочої камери сенсора, електронних схем узгодження і підсилення сигналу з ППФД 44

4.1 Розробка і виготовлення робочої камери сенсора 44

4.2 Розробка електронних схем узгодження і підсилення сигналу з ППФД 46

5 Розробка та виготовлення стенду для випробувань 49

5.1 Дим, процеси утворення і проблеми при детектуванні 49

5.2 Історичні аспекти формування вимог до тестування детекторів диму 54

5.3 Конструкція камери 59

5.4 Обладнання камери 63

6. Проведення тестових випробувань сенсора диму на основі ППФД 66

6.1 Вплив вологості на фотострум ППФД 66

6.2 Вплив пилу на фотострум ППФД 67

6.3 Проведення тестових випробувань з використанням різного типу джерел диму 68

6.3.1 ППФД на основі ґратки з періодом 1200 нм 69

6.3.2 ППФД на основі ґратки з періодом 800 нм 71

Висновки 73

Перелік наукових праць, виданих за темою дослідження під час виконання проєкту. 77

Патенти 77

Статті 77

Матеріали конференцій 78

Перелік джерел посилання 79

Додаток 1 Спосіб реєстрації резонансу в плазмон-поляритонних фотодетекторах 83

Реферат 83

Формула корисної моделі 84

Опис 85

Джерела інформації: 88

Скорочення та умовні позначки

АСМ – атомна силова мікроскопія;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

СЕМ – скануюча електронна мікроскопія;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ВФХ – вольт-фарадна характеристика;

ДҐ – дифракційна ґратка;

ППФ , ППФД– плазмон-поляритонний фотодетектор;

ПППР – поверхневий плазмон-поляритонний резонанс;

ПППХ – поверхнева плазмон-поляритонна хвиля;

I_p/I_s – відношення фотострумів ППФД при освітленні *p*- та *s*- поляризованим світлом, або поляризаційна чутливість;

I_{ph} – фотострум;

φ_b – висота бар'єра;

n – параметр неідеальності ВАХ.

I_o – струм насичення ВАХ

λ – довжина хвилі у вакуумі;

$\Delta\Theta$ – кутова півширина резонансу;

n – показник заломлення;

k – коефіцієнт екстинкції;

ε', ε'' – дійсна та уявна частини діелектричної проникності, $\varepsilon'=n^2-k^2$, $\varepsilon''=2\cdot n\cdot k$;

$k = 2\pi/(\lambda/n)$ - хвильовий вектор падаючого випромінювання;

$G = 2\pi/a$ – обернений вектор ґратки з періодом a;

R_p, R_s – коефіцієнти відбивання *p*- та *s*-поляризованого світла;

r_p, r_s – амплітудні коефіцієнти відбивання *p*- та *s*-поляризованого світла;

T_p, T_s – коефіцієнт пропускання в підкладку *p*- та *s*-поляризованого світла;

NIST - Національний інститут стандартів і технологій, США (*National Institute of Standards and Technology, USA)*

UL - Underwriters Laboratories

Вступ

До складу систем протипожежної сигналізації, зазвичай, входять багато видів сенсорів, що пов’язано з великою різноманітністю типів пожеж, горючих матеріалів і інших умов, за яких вони відбуваються [1]. Деякі з ознак пожежі можуть виникати і за звичайних умов, не пов’язаних із виникненням пожежі. Тому для зменшення кількості хибних спрацювань реалізуються багатоканальні системи отримання інформації, а сигнал формується за складним алгоритмом, іноді із залученням штучного інтелекту [2]. Тому так важливо розширення типів сенсорів для охоплення якомога більшого спектру ознак пожеж. Серед сенсорів є датчики температури, відеокамери, хімічні датчики на продукти горіння, а також сенсори диму [3]. Найбільш важливі і розповсюджені серед них є детектори диму.

Традиційно детектори диму бувають двох типів, іонізаційного та оптичного [4]. Перші використовують радіоактивне джерело, частіше всього америцій, для іонізації повітря в камері, створюючи канал для протікання електричного струму. Частинки диму перешкоджають іонізації і зменшують струм, викликаючи сигнал тривоги. Другий тип сенсорів використовує явище розсіяння і зміни напрямку поширення променя світла на частинках диму, що потрапили у камеру детектора. Факт розсіяння або перешкоджання ходу променя реєструється фотодетектором як наявність диму. Кожен з цих типів детекторів диму має свої переваги і недоліки. Розділяють наступні типи диму [5]: дим з тліючої стадії пожежі, як правило, складається з великих частинок горіння - від 0.3 до 10.0 мкм, та дим зі стадії пожежі з відкритим горінням, котрий, як правило, складається з мікроскопічних частинок горіння - від 0.01 до 0.3 мкм. Іонізаційні детектори найкраще виявляють швидкоплинні пожежі, що продукують дим з частинками 0.01-0.4 мікрона, темного чи чорного кольору, в той час як більш сучасні фотоелектричні детектори ефективніші при виявленні повільно-тліючих пожеж, з димом світлого (білого або сірого) кольору, з більшими частинками 0.4–10 мкм. Фотоелектричні детектори диму швидше реагують на займання у його ранній стадії (тління, до того, як він спалахне полум’ям). Іонізаційні детектори диму

реагують швидше (як правило 30–60 секунд) у стадії пожежі з вогнем. Але іонізаційні детектори гірше діють у середовищах з інтенсивним потоком повітря, і через це фотоелектричний детектор диму є надійнішим для виявлення диму як для фази пожежі з тлінням, так і з відкритим вогнем.

Однак у цих основних типах датчиків є недолік, пов’язаний з хибним спрацюванням на аерозольні або пилові частинки, що пов’язані, наприклад, зі звичайною діяльністю у кухні, ванній кімнаті, на будівельному майданчику, а не з виникненням пожежі [6]. Застосовується кілька підходів до вирішення цієї проблеми, що ускладнюють конструкцію детекторів: використання в детекторах кількох довжин хвиль, кількох кутів [7], застосування додаткових хімічних сенсорів на продукти горіння [8], серед яких найбільш перспективний сенсор CO [8, 9], зазвичай у вигляді електрохімічної комірки.

Нещодавно був запропонований новий тип селекції продуктів горіння від пилових частинок [10]. Принцип його роботи полягає у збудженні поверхневого плазмон-поляритонного резонансу (ППРП) в золотій плівці, що межує з середовищем з продуктами горіння, в геометрії Кречмана з використанням скляної призми зв’язку. Збільшення концентрації оксиду вуглецю змінює оптичні параметри середовища і призводить до кутового зсуву ППРП, що реєструється по зміні інтенсивності променя світла додатковим фотодетектором. В той же час, кутове і спектральне положення ППРП є нечутливе до звичайного пилу, тому що завдяки великим розмірам частинок пилу вони слабко прилягають до поверхні плазмон-активної золотої плівки і не можуть суттєво змінити параметри середовища в тонкому шарі, де поширюється хвиля ППРП.

В цьому проєкті для збудження і реєстрації ППРП пропонується використати плазмон-поляритонний фотодетектор (ППФД) [11], що являє собою фоточутливу структуру (бар`єр Шотткі, *p-n* перехід) з металевою (Au або Ag) дифракційною ґраткою на поверхні напівпровідника (Si). Саме цей тип мікрорельєфу принципово дозволяє збуджувати ППРП завдяки узгодженню хвильового вектора поверхневої плазмон-поляритонної хвилі і світла без використання призми

зв’язку, як в геометрії Кречмана. А вбудоване електричне поле в приповерхневому шарі напівпровідника розділяє генеровані світлом та збудженим в золотій плівці ППП електрон-діркові пари, створюючи фотострум. Фотострум має резонансну компоненту. Вона має максимальне значення лише за певної поляризації, довжини хвилі та куті падіння світла, коли виконуються умови збудження ППП. Через те, що ППП є поверхневою хвилею, що експоненційно загасає за межами золотої плівки на відстані порядку довжини хвилі, вона дуже чутлива до оптичних параметрів приповерхневого шару товщиною порядку довжини хвилі, а саме до збільшеної концентрації CO, CO_2, [10] або до частинок диму, розмір яких знаходяться в діапазоні 0.1-10 мкм [5] і одночасно буде не чутлива до частинок пилу зі значно більшими розмірами, що погано прилягають до поверхні. Це призводить до меншої імовірності виникнення хибної тривоги у запилених приміщеннях. Кутова або спектральна залежність фотоструму повністю відтворює особливості збудження ППП, і тому може бути використана для його реєстрації без використання додаткового фотоелемента, який би реєстрував зміни інтенсивності відбитого променя, як у випадку стандартних схем з використанням призми зв’язку.

Основою сенсора диму є ППФД, тому одним із завдань проєкту є розробка дизайну та конструкції ППФД і його виготовлення з оптимізованими параметрами. Від того, наскільки інтенсивним і вузьким буде резонанс фотоструму в ППФД, буде залежати кінцева чутливість сенсора до диму. Тому необхідно вирішити такі завдання як: визначення оптимальне розташування ППФД в робочій камері детектора диму, розташування джерела світла та кута падіння на ППФД; чисельно промоделювати резонансні характеристики ППФД з метою їх оптимізації [11]; виготовити ППФД з оптимізованими параметрами з використанням технології інтерференційної фотолітографії [12]; мікроскопічна, оптична та електрофізична характеризація виготовлених ППФД; внесення корекції до технології виготовлення ППФД та пошук можливостей здешевлення виробництва, підвищення їх якості іншим підходом у виготовленні ППФД, зокрема, з використанням плазмонних наночастинок, в яких, як досліджено

автором проєкту С. Мамикіним, локальний плазмонний резонанс (і його чутливість до параметрів навколишнього середовища), може бути підсилений ковзаючим світловим променем [13], дифрагованим ґраткою; проектування камери сенсора з допомогою програмного пакета OpenSCAD та виготовлення з допомогою 3D друку; розробка і виготовлення електронних схем підсилення і обробки сигналу з ППФД з допомогою програмного пакету PROTEUS; розробка стенду для випробувань; проведення тестових випробувань з використанням різних типів джерел диму, наявності пилу в середовищі та високій вологості.

Для дослідження властивостей ППФД та його складових застосовуються: спектральна еліпсометрія – для визначення оптичних параметрів і товщин складових ППФД [14]; СЕМ та АСМ – для характеризації поверхні ППФД [15]; спектрально-кутові залежності фотоструму в умовах ПППР – для характеризації резонансу в ППФД [16]; вольт-амперні та вольт-фарадні характеристики – для електричних досліджень [17].

1 Розробка конструкції ППФД

1.1 Розробка дизайну конструкції сенсора диму

Для визначення основних конструктивно-морфологічних параметрів ППФД як основи для сенсорів диму потрібно визначитись з умовами, в яких він буде працювати, а саме: яка буде оптимальна довжина хвилі світла та кут падіння збудження ПППР.

Спочатку необхідно визначитись з довжиною хвилі, що задається в першу чергу типом «плазмонного» металу. Нажаль, тут вибір небагатий, існують три метали, в яких можна отримати хороші параметри пазмонного резонансу – золото, срібло та алюміній. Серед них срібло швидко хімічно деградує, а алюміній має хороші «плазмонні» властивості в УФ та синій області спектра, для коротких довжин хвиль. Найкраще це ілюструє Рисунок 1, де наведена залежність $-\varepsilon'/\varepsilon''$ по спектру, яка відображає інтенсивність збудження плазмон-поляритонної хвилі (ППХ) [18] для згаданих металів. Видно, що з точки зору узгодження зі

спектральною чутливістю кремнію та уникнення впливу великих частинок пилу (за рахунок зменшення розсіяння при діагностиці якомога більшою довжиною хвилі) найкраще підходить хімічно інертне золото. Робочий спектральний діапазон для золота з врахуванням викладених вимог є ~800 ÷ 900 нм.

Таким чином, з міркувань стабільності характеристик найкраще вибрати Au як плазмон-активний матеріал, а робочою довжиною хвилі, що буде використовуватись в сенсорі диму, взяти λ~800 нм. Це буде сприяти меншому розсіянню світла на частинках пилу у порівнянні зі світлом видимого діапазону, і, відповідно, меншій імовірності хибного спрацювання сенсора диму.

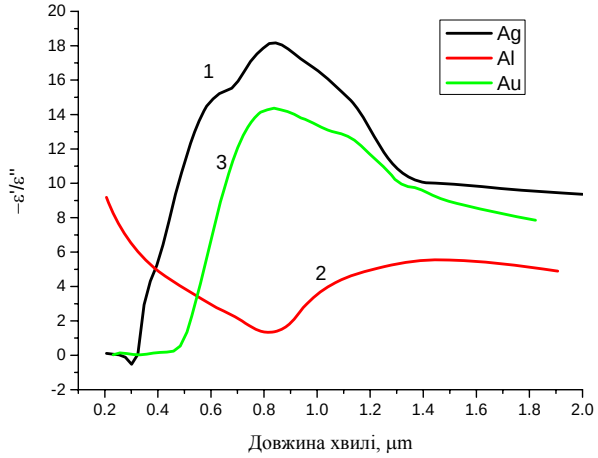


Рисунок 1 – Спектральна залежність відношення дійсної до уявної частини діелектричної проникності плівок (-ε`/ε``) широко застосовуваних «пламонних» металів Ag - (1), Al - (2), Au - (3)

Кут падіння світла буде вибиратись із конструктивних особливостей робочої камери сенсора.

1.2 Теоретичні розрахунки оптимальних параметрів дифракційної ґратки для розроблюваних ППФД

Для збудження ППР на робочій довжині хвилі світла 800 нм та періоді дифракційної ґратки ~1200 нм має відбуватися при куті падіння 20°, що визначається умовами фазового синхронізму [18]:

$$k \cdot \sin\theta \pm mG = k_{PP}, \quad (1)$$

де $k = 2\pi/(\lambda/n)$ - хвильовий вектор падаючого випромінювання з довжиною хвилі λ у вакуумі; n – показник заломлення середовища; θ – кут падіння світла; m - ціле число ($m \neq 0$) і позначає порядок дифракції; $G = 2\pi/a$ – обернений вектор ґратки з періодом a, k_{PP} - хвильовий вектор ППХ, що для гладкого металевого інтерфейсу з діелектриком визначається співвідношенням [18]:

$$k_{PP} = \pm 2\pi/(\lambda/n) \cdot [\varepsilon_{Me}\varepsilon/(\varepsilon_{Me}+\varepsilon)]^{1/2}, \quad (2)$$

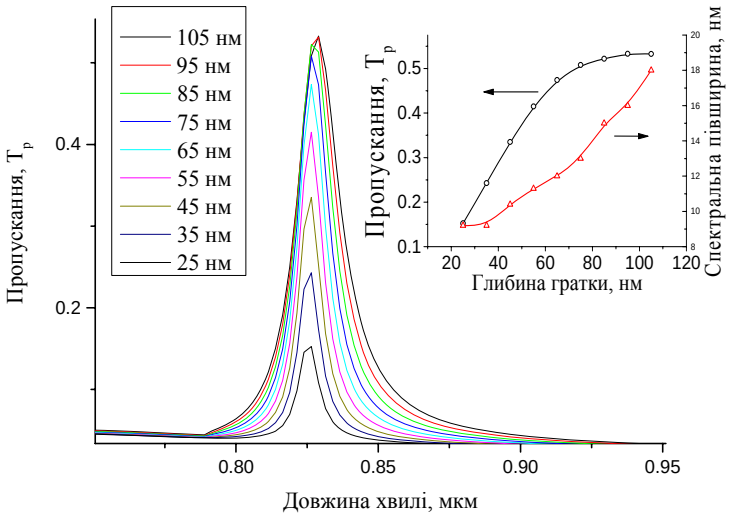
де k_{PP} має знак "+" при $m > 0$, або "-" при $m < 0$. Тут, ε_{Me} - комплексна діелектрична функція металу на довжині хвилі λ, $\varepsilon = n^2$ - діелектрична проникність середовища, що межує з металом.

Як показано в роботі [19], структури з ДҐ для збудження ППХ мають більшу чутливість для газових середовищ з середнім показником заломлення близьким до $n \sim 1$, яким є дим, ніж системи на основі призмового збудження ППХ [10]. Фактично, оптимізація параметрів ДҐ до газових середовищ з частинками диму із-за їх різної природи і типу полягає в знаходженні таких параметрів ДҐ при даних довжині хвилі та куті падіння, при яких досягається максимально інтенсивний резонанс з мінімальною шириною, щоб було надійніше детектувати його зміщення внаслідок впливу частинок диму.

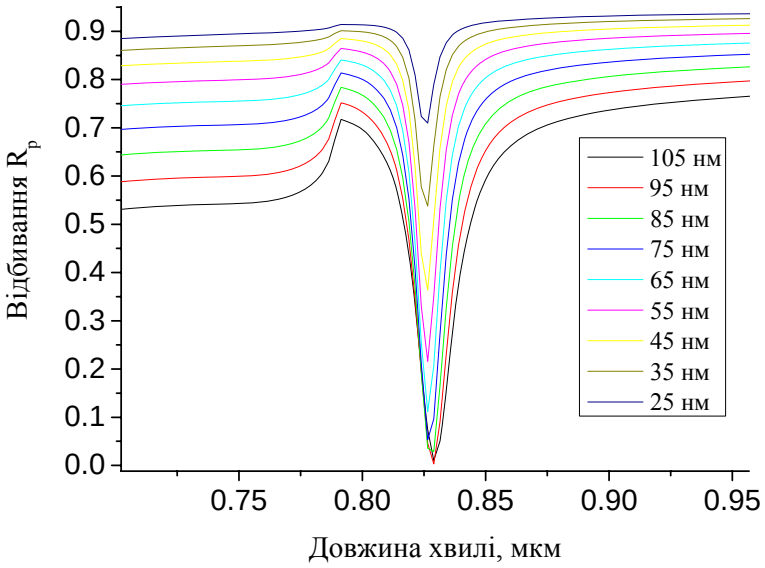
Для періоду ДҐ a=1200 нм, довжини хвилі λ=800 нм p-поляризованого світла та кута падіння світла Θ=20° була виконана оптимізація глибини ДҐ (Рисунок 2) та товщини плазмон-активного шару Au (Рисунок 3) за критерієм збільшення його поляризаційної чутливості I_p/I_s та пропускання світла в підкладку (T_p). Оскільки фотострум ППФД пропорційний коефіцієнтові пропускання світла в напівпровідник (T_p,T_s) та інтенсивності падаючого світла, поляризаційна чутливість є фактично відношення T_p/T_s, яке може бути пораховано за методикою, описаною в [11, 20].

Видно, що із зростанням глибини ДҐ коефіцієнт пропускання світла T_p зростає до певних меж і сягає насичення. Далі починає суттєво зростати

спектральна півширина резонансу (вставка до Рисунку 3 а, червона крива). Таким чином, оптимальна глибина ДҐ становить 75 нм.

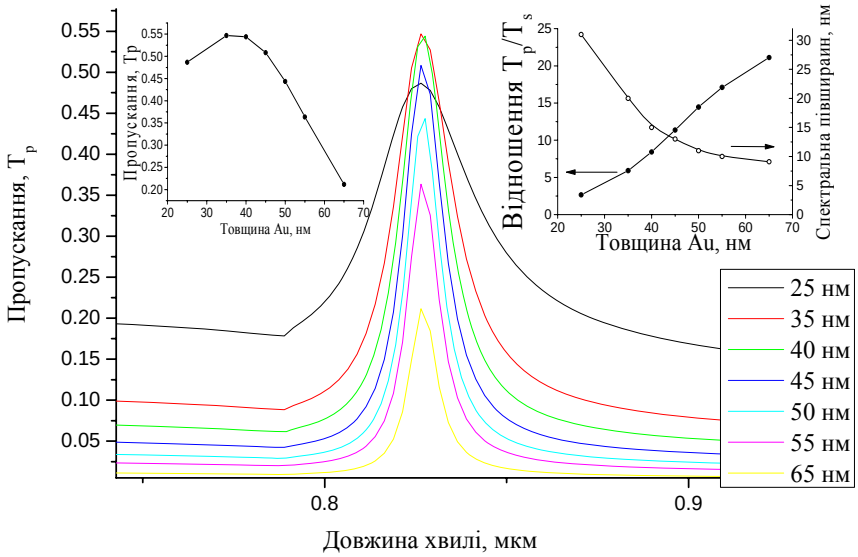


а)

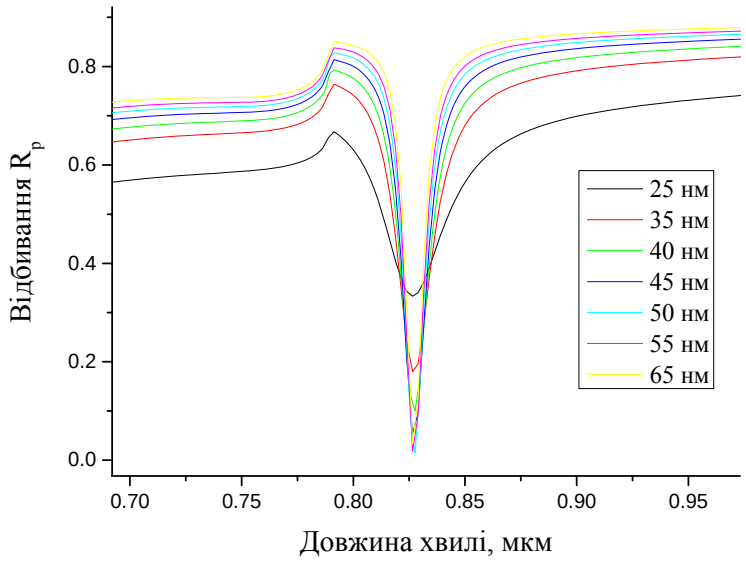


б)

Рисунок 2 – Спектральні залежності пропускання в підкладку T_p (а) та відбивання від підкладки R_p (б) *p*-поляризованого світла для різної глибини модуляції дифракційної ґратки (як позначено на рисунку) з періодом 1200 нм. На вставці (а) представлено залежність пропускання світла в максимумі резонансу та спектральної півширини резонансу від глибини ґратки



а)



б)

Рисунок 3 – Спектральна залежність пропускання в підкладку T_p (а) та відбивання від підкладки R_p (б) *p*-поляризованого світла для різної середньої товщини металевої плазмон-активної плівки Au (позначена на рисунку). На лівій вставці рис.(**а**) залежність пропускання світла T_p в максимумі резонансу. На правій вставці рис.(**а**) – відношення пропускання T_p/T_s та спектральної півширини резонансу від середньої товщини металевої плазмон-активної плівки Au

Зі зміною товщини плівки Au також змінюються параметри резонансу (Рисунок 3). Для малих товщин плівки спостерігається широкий резонанс, із зростанням товщини він стає інтенсивнішим і звужується, а потім починає зменшуватись за абсолютною величиною, а півширина сягає мінімальних значень. При цьому відношення T_p/T_s продовжує збільшуватись за рахунок зменшення T_s компоненти. Оскільки для ППФД також є важливою абсолютна фоточутливість в резонансі, оптимальною товщиною плівки золота була вибрана товщина 45 нм, при якій ширина резонансу перестає суттєво зменшуватись, а величина пропускання T_p в фотоактивну зону ППФД залишається високою.

Спектральні залежності коефіцієнта відбивання R_p повторюють основні тенденції поведінки коефіцієнта пропускання T_p за виключенням того, що зростанню T_p в резонансі відповідає зменшення R_p.

Таким чином, з проведених розрахунків отримано цільові параметри ДҐ: період 1200 нм, глибина модуляції 75 нм, товщина шару Au 45 нм. Для кутів падіння світла близьких до нормального, теоретичні розрахунки аналогічні вищенаведеним, дають період ДҐ 800 нм, глибину модуляції 50 нм.

Зсув ПППР залежить від товщини і показника заломлення діелектричної плівки на поверхні золотої ДҐ. Таку плівку можуть формувати частинки диму, що осідатимуть на поверхню виготовлених ППФД. Розрахунки, зроблені С.В.Мамикіним в роботі [21] показують, що такі діелектричні плівки призводять до довгохвилевого зсуву ПППР при вимірах спектральних характеристик, та в сторону більших кутів при вимірі кутових характеристик відбивання світла або фотоструму.

2 Виготовлення ППФД з використанням технології інтерференційної фотолітографії

Для виготовлення ППФД на основі Si та Au можна застосовувати кілька підходів. Потрібно забезпечити формування досить високого бар’єру для

розділення фотогенерованих носіїв заряду. Оскільки Au є металом з високою роботою виходу, контакт між Au та *n*-Si має бути бар'єром Шотткі. Такий бар'єр можна сформувати також в системі Au–Cr–p-Si. Також після цього потрібно забезпечити тильний омічний контакт, зазвичай це Al до *p*-Si. Підбір параметрів технології, нажаль, потребує багато часу, більшого за виділений на виконання відповідного етапу. Тому було прийняте рішення використати готовий *n-p* перехід на Si (111) КДБ-10, з глибиною залягання 100 нм та сформованими омічними тильними контактами з Al. На такий підхід [22] авторами проєкту було оформлено і подано заявку на патент України на винахід [23]. Легування *n*-області підкладки, що використовується, є досить високим. Тому очікується, що бар'єр між Au та *n*-Si буде не дуже високий за рахунок тунельних ефектів, і в цілому *n-p* перехід буде добре працювати для розділення фотогенерованих носіїв.

Виготовлення необхідних періодичних рельєфних структур на поверхні кремнію здійснювали методом інтерференційної фотолітографії з використанням халькогенідного фоторезисту [11, 12, 15]. Особливістю даної технології у порівнянні зі стандартною, коли ДҐ витравлюється в напівпровіднику, є профілювання виключно металевої плазмон-активної плівки Au. За рахунок цього межа поділу метал/напівпровідник зберігається плоскою, з низькою рекомбінацією фотогенерованих носіїв. З'являється можливість використання вже готових, якісних *p-n* переходів. В цілому такий ППФД має простішу конструкцію і хороші резонансні властивості [11].

Перед формуванням плазмонної структури на зворотній стороні кремнієвої пластини був отриманий електричний омічний контакт. Для цього шляхом вакуумного термічного напилення у вакуумі $\sim 10^{-3}$ Па на пластину нанесено шар Al товщиною 200 нм та відпалено при температурі близько 400°C упродовжі 30 хв. Далі, безпосередньо перед встановленням у вакуумну камеру, робоча сторона пластини Si була очищена в 5% водному розчині HF та етиловому спирті, після чого промивалась дистильованою водою та висушувалась стиснутим повітрям. Наступними етапами було послідовне вакуумне термічне осадження на поверхню Si адгезивного шару Cr товщиною ~3 нм та шару Au (20 нм). Після охолодження

пластини до кімнатної температури на поверхню Au термічним випаровуванням нанесено шар фоторезисту $As_{40}S_{40}Se_{20}$ товщиною ~150 нм. Експонування фоторезисту проводилось в зоні інтерференції лазерних пучків випромінювання гелій–кадмієвого лазера ЛГ-70 (λ=441.6 нм). Величина оптимальної експозиції для даного халькогенідного фоторезисту складає 0.2–0.5 Дж/см^2. Після експонування проводилось селективне травлення фоторезисту для утворення маски, яка забезпечує фізичний доступ травника до заданих ділянок шару Au. Разом з тим, форма профілю отриманого рельєфу та його глибина повинні відповідати обумовленим параметрам. Травник, що використовувався для фоторезисту $As_{40}S_{40}Se_{20}$, містить етилендіамін ($C_2H_8N_2$) як діючу речовину, та диметилсульфоксид (C_2H_6OS) як розчинник, у співвідношенні ~1:50. При оптимальній температурі травника (20 – 25°C), час процесу травлення складає близько 3 хвилин. Після створення рельєфної літографічної маски проводилось селективне видалення шару Au в травнику на основі розчину KI та I_2 в етиловому спирті та дистильованій воді. Завершальним етапом формування структури було вакуумне термічне нанесення на отриманий рельєф шару Au товщиною 25 нм. Після виготовлення, пластини різались алмазним різаком на кристали розміром 2×3 мм.

Схематичне зображення постадійного (1-5) процесу виготовлення дифракційних ґраток на поверхні Si та кінцевий вигляд перерізу ППФ наведено на Рисунку **4.** На етапі (5) схематично зображено переріз такої структури. На Рисунку 5 наведено АСМ зображення поверхні структури з періодом дифракційної ґратки 1200 нм.

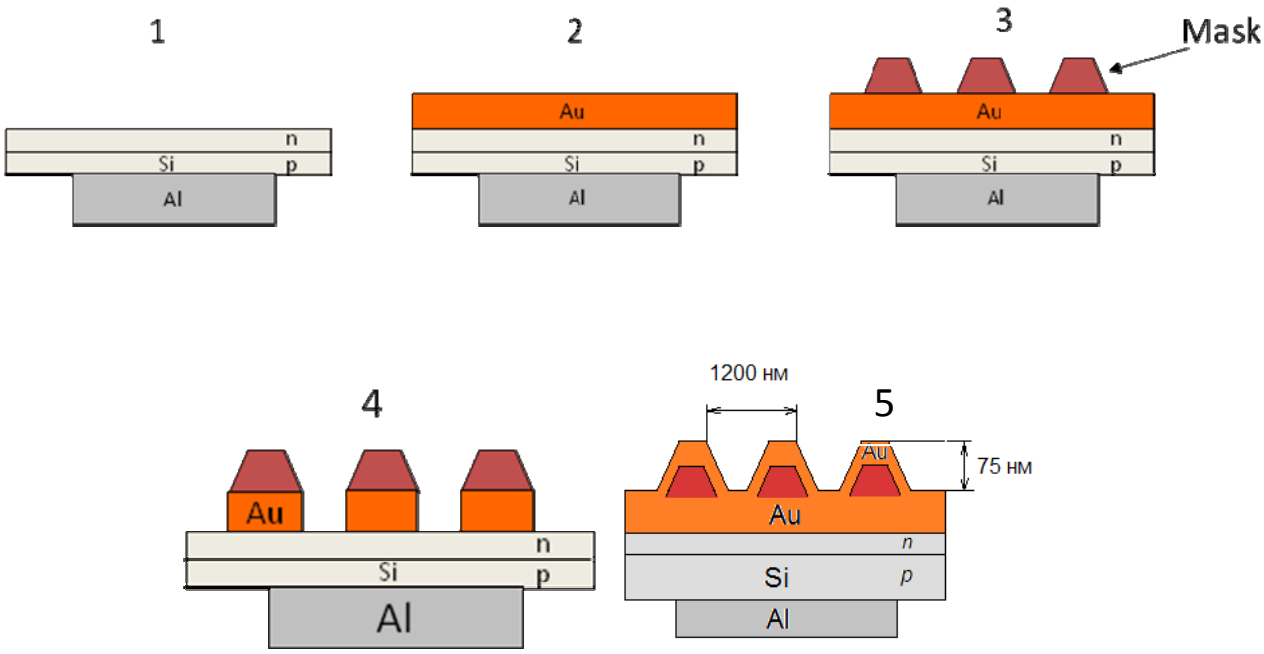


Рисунок 4 – Зліва на право та зверху вниз, схематичне зображення (1-5) стадій процесу виготовлення дифракційних ґраток на поверхні Si та кінцевий вигляд перерізу структури ППФД (5)

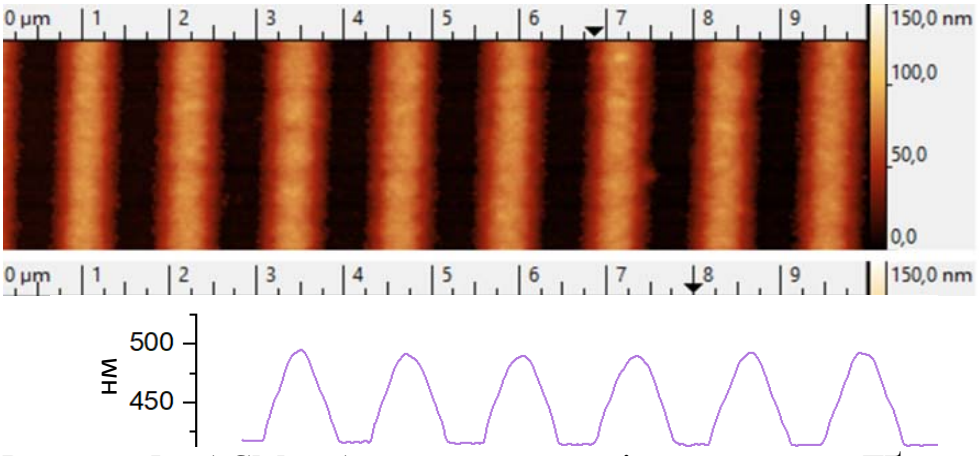


Рисунок 5 – АСМ зображення поверхні виготовленої ДҐ з періодом дифракційної ґратки 1200 нм та її профіль перерізу

3 Характеризація морфологічних, оптичних та електрофізичних характеристик ППФД

3.1 Дослідження поверхні виготовлених структур методами скануючої електронної та атомно-силової мікроскопії, отримання морфологічних параметрів виготовлених дифракційних ґраток

Робочі поверхні структур ППФД були охарактеризовані методами скануючої електронної (СЕМ) та атомної силової (АСМ) мікроскопії. СЕМ зображення були отримані за допомогою електронного растрового мікроскопа JSM-6700 з енерго-дисперсійною та катодо-люмінісцентною приставками. Роздільна здатність для структур Au-Si за даних умов вимірів становить порядку 5 нм. АСМ зображення отримані з допомогою скануючого зондового мікроскопа NanoScope IIIa Dimension 3000TM в режимі typing mode.

Додатково, з метою підвищення резонансних характеристик, було виготовлено та охарактеризовано серію ППФД с дифракційною ґраткою з періодом 800 нм. Як показано раніше, золото має найкращі оптичні властивості для збудження ППРД в околі довжин хвиль світла λ=800 нм. Така ґратка буде резонансною на довжині хвилі λ=800 нм при нормальному падінні, коли одночасно збуджуються ПППХ на +1 та -1 порядках дифракції, збільшуючи таким чином інтенсивність резонансу.

Типовий переріз структури ППФД представлений на Рисунку 6. СЕМ зображення поверхні ППФД, що показали найкращі резонансні характеристики, з періодами 1200 нм (зразки 3.2 та 4.2) та 800 нм (зразки 5.4 та 6.4) представлені на Рисунках 7 та 8. Визначено основні геометричні та статистичні параметри. Дані з урахуванням оптичних вимірів дифракційної ефективності (методика наведена в попередньому звіті) зведено в Таблиці 1. З аналізу СЕМ зображень видно (Таблиця 1), що досягнуто потрібний період ґраток 1200 нм, та 800 нм. Переріз ґраток, отриманих таким способом є трапецієподібним. Поверхня має нанонеоднорідності розміром менше 100 нм.

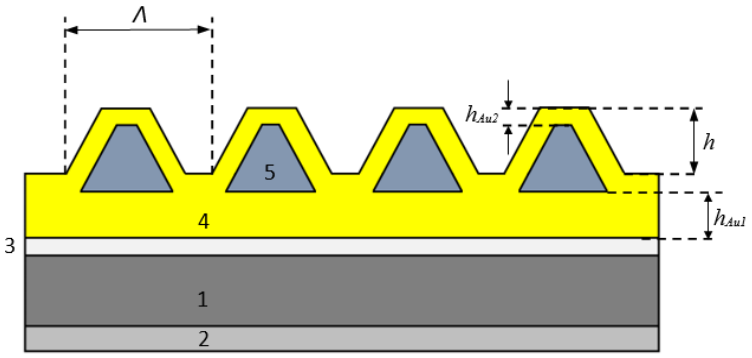


Рисунок 6 – Зображення перерізу структури ППФД. Підкладка – кремній *p*-типу (1), омічні контакти до підкладки – алюміній 200 нм (2), адгезійний шар на підкладці - хром 5 нм (3), плазмон-активний метал - золото 20 нм (4), маска з халькогенідного напівпровідника (5)

На Рисунках 7, 8 наведено СЕМ зображення поверхні з періодом дифракційної ґратки 1200 нм (Зразок 4.2, Рисунок 7) та 800 нм (Зразок 6.4, Рисунок 8).

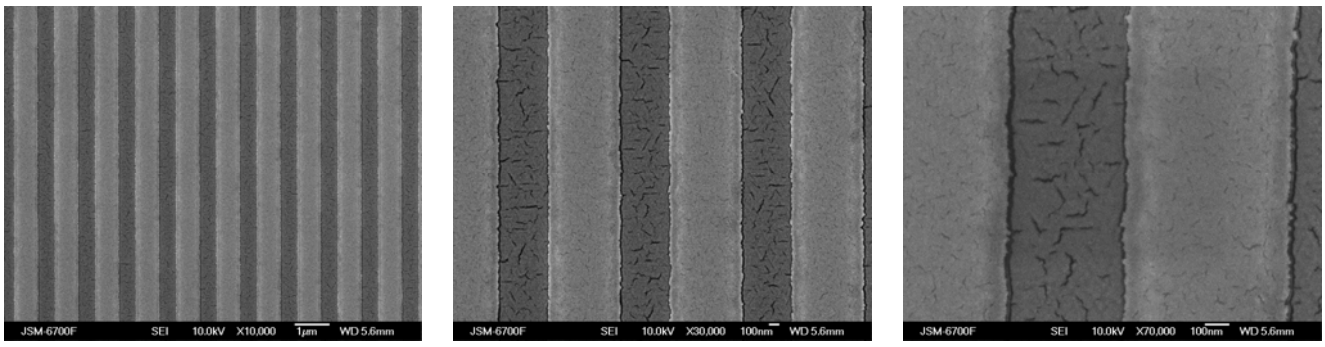


Рисунок 7– СЕМ зображення поверхні Au дифракційних ґраток на підкладці Si з періодом 1200 нм, зроблені з різним збільшенням

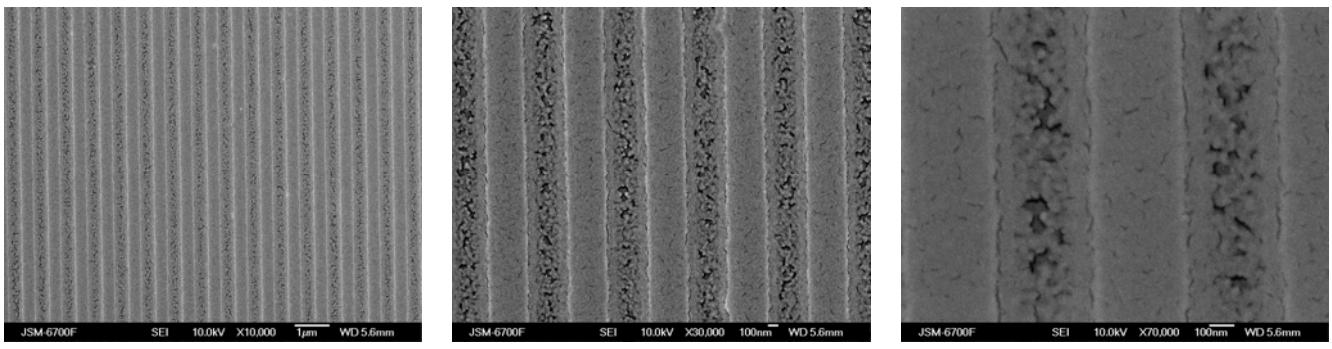
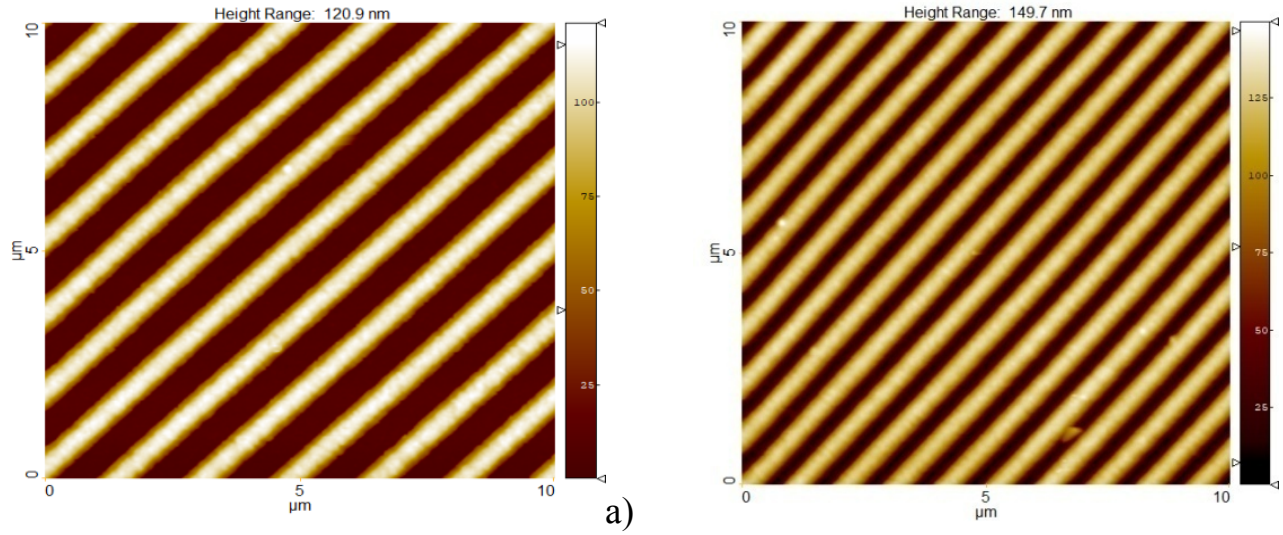


Рисунок 8 – СЕМ зображення поверхні Au дифракційних ґраток на підкладці Si з періодом 800 нм, зроблені з різним збільшенням

Таблиця 1 **– Розрахована з оптичних вимірювань дифракційної ефективності глибина дифракційних ґраток, а також дані АСМ та СЕМ**

Зразок	Оптичні виміри		Дані АСМ	Дані СЕМ
	Середня товщина шару золота, нм	Глибина ґратки, нм	Глибина ґратки, нм	Період ґратки, нм
3.2	16	116	103	1200
4.2	18	145	123	1200
5.4	15	120	109	800
6.4	15	121	114	800

Структури досліджувались з допомогою АСМ (Рисунок 9-11), що дозволило визначити період отриманих ДҐ, який складав 1200 нм та 800 нм, а також їх глибину ~100-130 нм.



а)

б)

Рисунок 9– АСМ зображення поверхні Au дифракційних ґраток на підкладці Si з періодом 1200 нм (а) та 800 нм (б)

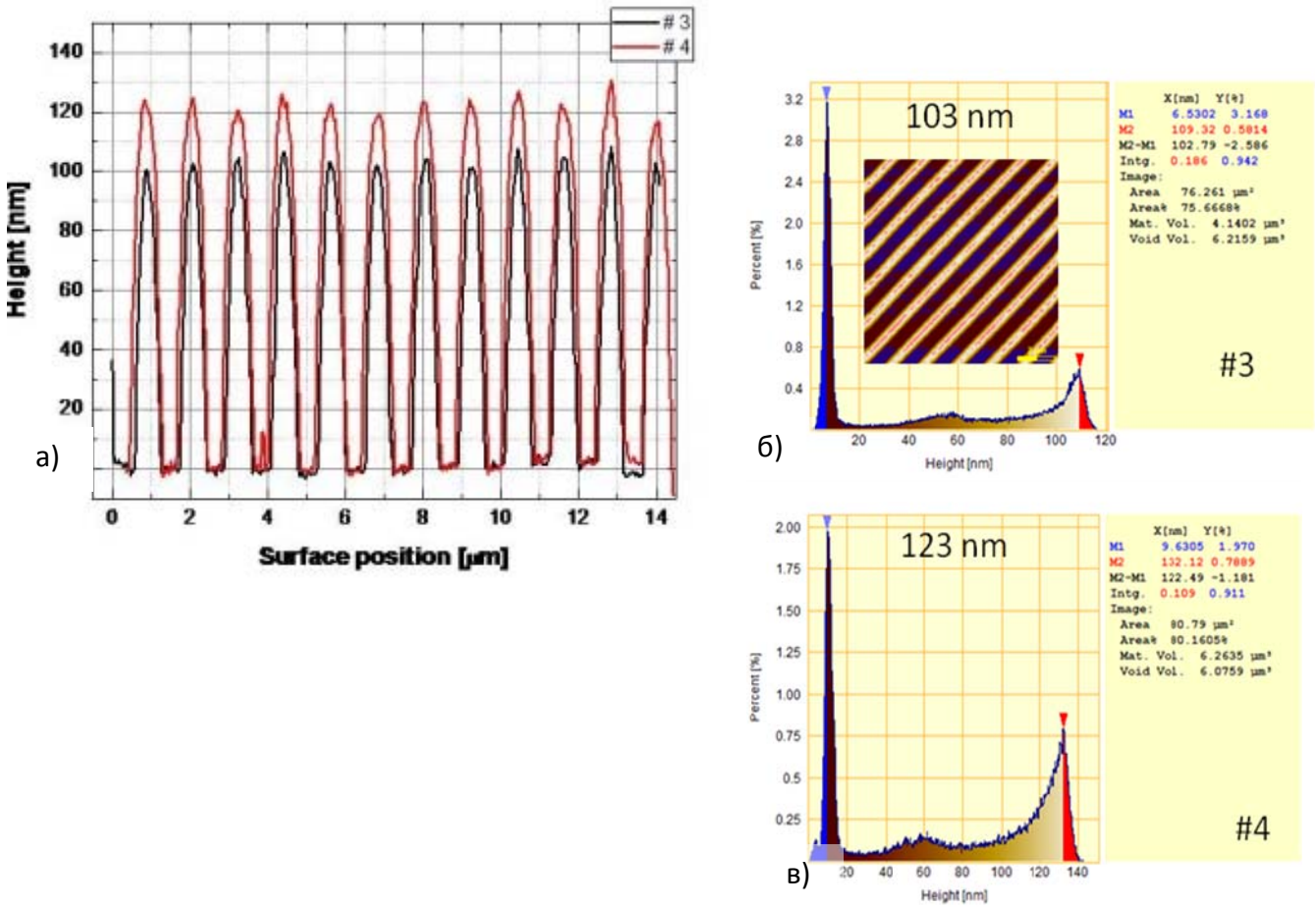


Рисунок 10 – Статистичний аналіз результатів АСМ поверхні Au дифракційних ґраток на підкладці Si з періодом 1200 нм.

а) Профілі сканування зонда для зразків 3.2 та 4.2.

б,в) Статистика розподілу висот при скануванні зразків 3.2 (б) та 4.2 (в) для визначення середньої глибини ґратки

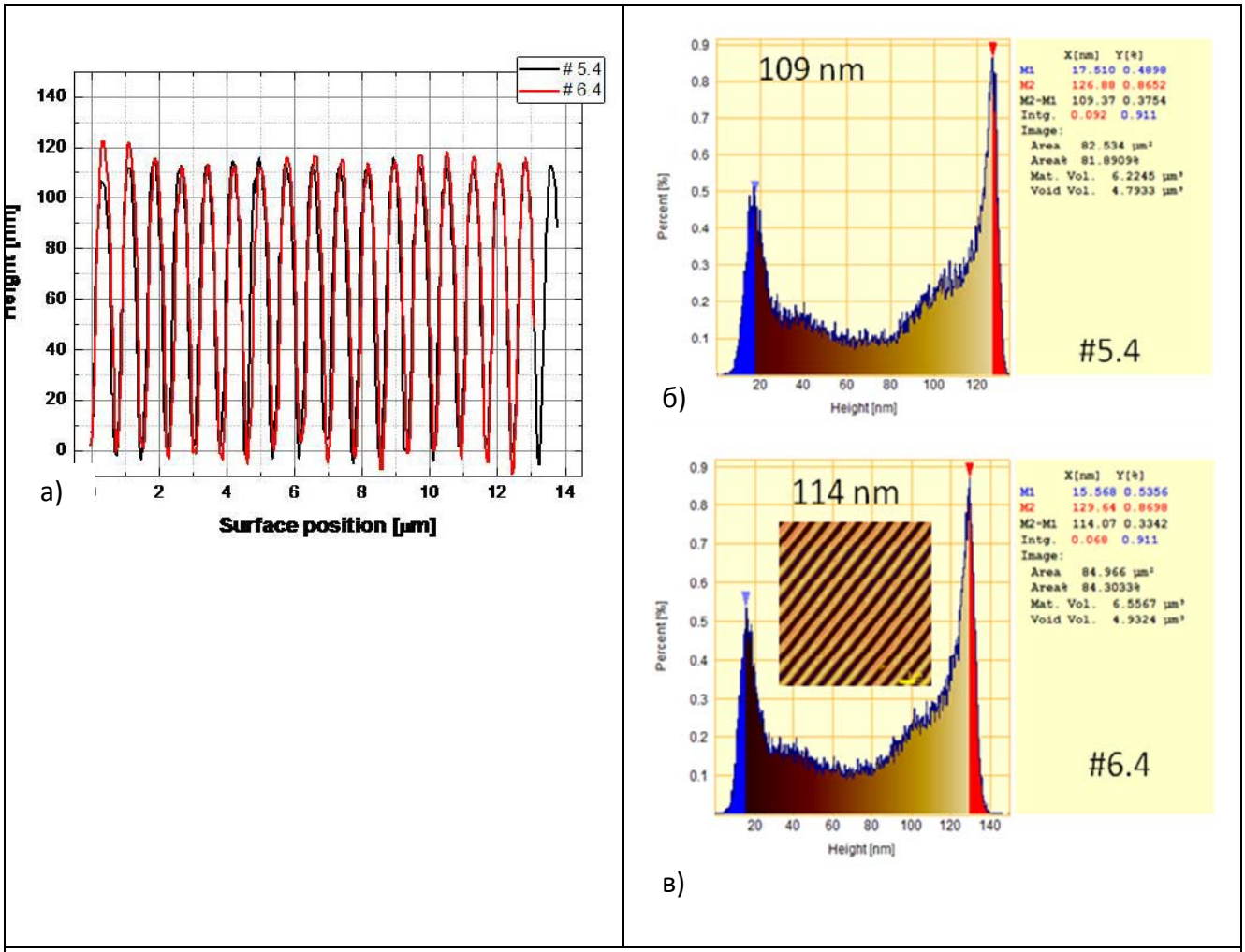


Рисунок 11 – Статистичний аналіз результатів АСМ поверхні Au дифракційних ґраток на підкладці Si з періодом 800 нм. а) Профілі сканування зонда для зразків 5.4 та 6.4.

б,в) Статистика розподілу висот при скануванні зразків 5.4 (б) та 6.4 (в) для визначення середньої глибини ґратки

3.2 Оптичні дослідження ППФД

3.2.1 Оптичні параметри плівок багатошарових структур ППФД

Для визначення структурних та оптичних параметрів плівок, що утворюють багатошарову структуру ППФД, фотолітографічних масок ($As_{40}S_{40}Se_{20}$), Si підкладок, проводились оптичні дослідження як самих структур так і сателітних (з кожної стадії) зразків методом спектральної багатокутової еліпсометрії на спектральному еліпсометрі SE-2000 (Semilab) та спектроскопії пропускання-відбивання поляризованого світла і розв’язання оберненої задачі

еліпсометрії/спектроскопії для визначення цих параметрів. Для розрахунків застосовувалась модель однорідної плівки на підкладці. На Рисунку 12 представлено спектральні залежності оптичних параметрів плівок золота, а на Рисунку 13 - халькогенідного фоторезисту ($As_{40}S_{40}Se_{20}$), отриманих на різних стадіях технологічного процесу (Рисунок 4). Так, для покращення адгезії золота на напівпровідникову (Si) (та сателітну скляну) підкладу було осаджено проміжний шар хрому (товщиною ~3 нм), а потім плівку золота товщиною ~20 нм. Дані оптичних вимірів показують, що плівка хрому не є суцільна, і цей проміжний шар складаються на 50% з хрому та 50% із золота. Оптичні параметри цієї тонкої плівки золота близькі до параметрів об'ємного металу, що забезпечує хороші передумови для збудження плазмонного резонансу.

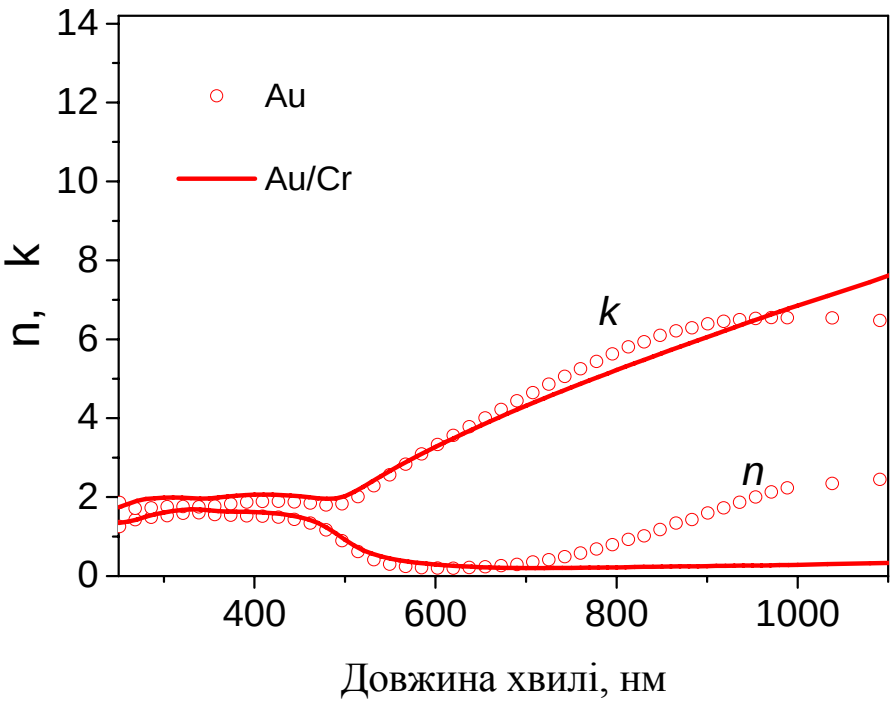


Рисунок 12 – Отримані зі спектрально-еліпсометричних вимірів спектральні залежності оптичних параметрів сателітних плівок золота, осаджених на скляну підкладку з підшаром хрому (суцільні криві, друга стадія на Рисунку 4) та без нього (точки, п'ята стадія на Рисунку 4)

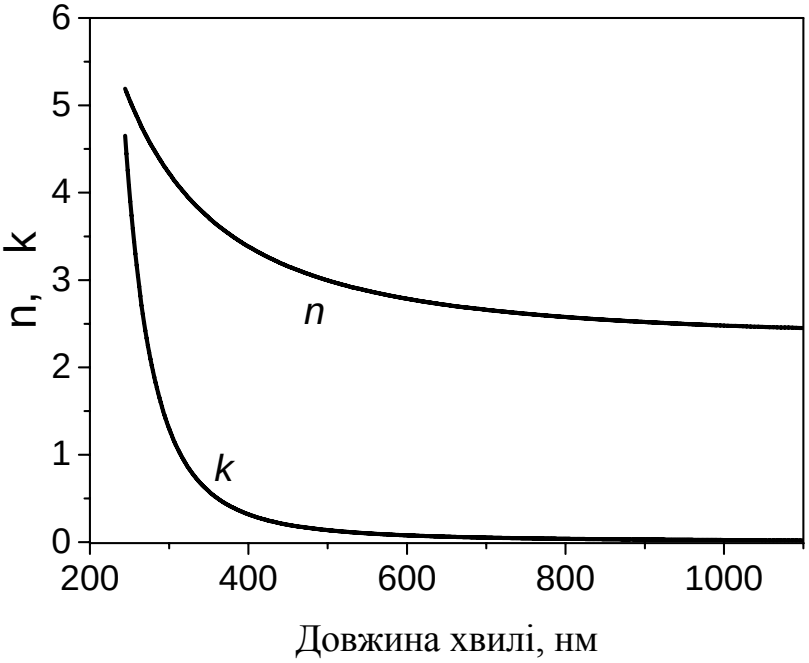


Рисунок 13 – спектральні залежності оптичних параметрів плівки халькогенідного фоторезисту ($As_{40}S_{40}Se_{20}$) товщиною 165 нм на склі

На третій стадії (Рисунок 4) осаджувалась плівка халькогеніду товщиною, як отримано з оптичних вимірів, 165 нм. Після фотолітографічного експонування і витравлювання засвічених ділянок халькогенідної плівки, на останній стадії проводилось термічне осадження плівки золота на результуючий рельєф.

Аналіз сателітного зразка на склі показує, що товщина цієї плівки ~23 нм, а оптичні параметри в області фоточутливості отриманого ППФД на кремнії (400-1100 нм) близькі до параметрів об'ємного матеріалу, і незначно відрізняються від них в близькій ІЧ області спектру. В даному випадку варто відмітити, що параметри золотої плівки на склі і параметри цієї плівки, осадженої на структуру, яка вже має підшари хрому і золота, будуть відрізнятися. І, судячи з наших результатів, підшар хрому забезпечує хороші об'ємні параметри золота. Тому ми очікуємо, що коефіцієнт заломлення *n* верхньої плівки золота на ППФД не збільшиться (так як збільшився на сателітному скляному зразку), що важливо для забезпечення якості плазмонного резонансу, котре визначається відношенням

$|\varepsilon'/\varepsilon''|^2 >> 1$, де $\varepsilon'=n^2-k^2$, $\varepsilon''=2\cdot n\cdot k$, і для золота у видимому та ближньому ІЧ діапазоні $|\varepsilon'/\varepsilon''|^2 \sim |k/(2\cdot n)|^2$.

3.2.2 Оптичні властивості ДҐ виготовлених ППФД

Глибина модуляції виготовлених дифракційних ґраток оцінювалась оптичним методом з вимірів інтенсивності дзеркально відбитого (0-го порядку) та інтенсивності -1 порядку дифракції від структури, розташованої під 45° до напрямку падіння пучка *p*-поляризованого світла (ТМ хвиля) на поверхню з довжиною хвилі 633 нм у припущенні, що профіль ДҐ є синусоїдальний. Результати порівнювались з розрахунком за методикою [20] і по збігу розрахунку з експериментом визначались параметри ґраток. На Рисунку 14 представлена схема таких вимірювань, а на Рисунку 15 представлено залежність інтенсивності відбитого світла від кута спостереження в залежності від напрямку розповсюдження падаючого світла.

Як видно з Рисунку 15, ґратки з періодом 1200 нм, в залежності від глибини, показують різну інтенсивність відбивання світла для дзеркального (0-го) та –1-го порядків дифракції. Загалом, із збільшенням глибини модуляції збільшується інтенсивність –1-го порядку і зменшується інтенсивність 0-го порядку. Отримані з таких залежностей дані та співставлення їх з розрахунком по методиці [20] представлені в Таблиці 2. З аналізу СЕМ зображень (Таблиця 2) видно, що досягнуто потрібний період ґраток 1200 нм та 800 нм. Переріз ґраток, отриманих таким способом, є трапецієподіюним. Поверхня має нанонеоднорідності розміром менше 100 нм.

В Таблиці 2 також наведені дані глибини ДҐ, отримані з АСМ для порівняння. В цілому оптичні виміри дають результати, що в основному корелюють з даними АСМ, хоча спостерігаються деякі відхилення як в більшу, так і в меншу сторону.

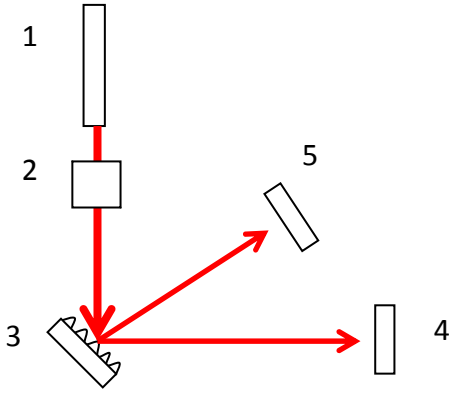


Рисунок 14 – Схема вимірювання інтенсивності 0-го та -1-го порядків дифракції *p*-поляризованого світла від ґраток при падінні світла з довжиною хвилі 633 нм під кутом 45° до нормалі: 1 - лазер, 2 - поляризатор (призма Глана), 3 - дифракційна ґратка, 4, 5 – фотодетектори для вимірювання інтенсивності 0-го та -1-го порядків дифракції

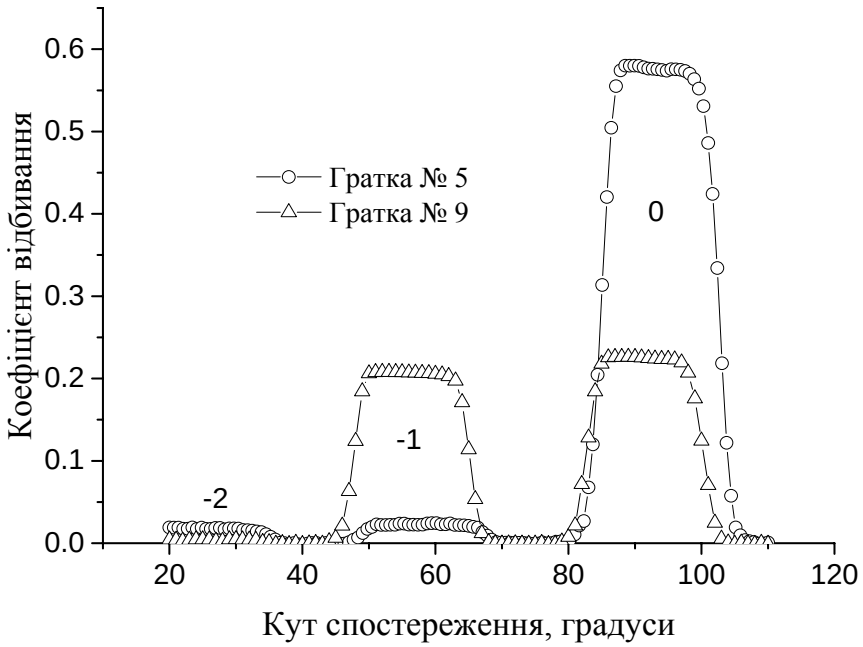


Рисунок 15 – Кутова залежність виміряного коефіцієнта відбивання *p*-поляризованого світла від ґратки №5 та №9, розташованих під кутом 45 градусів до променя світла з довжиною хвили 633 нм. На рисунку зображені номери порядків дифракції, що спостерігається в даних умовах.

Таблиця 2 – Дифракційна ефективність та розрахована з неї глибина дифракційних ґраток, отримані з оптичних вимірювань, а також дані АСМ.

Зразок	Період ДҐ, нм	Глибина модуляції ДҐ, нм	Експер. I_0	Теорія I_0	Експер. I_{-1}	Теорія I_{-1}	Відношення I_{-1}/I_0	Глибина з АСМ, нм
№2	1151	37	0.58	0.582	0.023	0.023	0.04	50
№3	1173	42	0.531	0.531	0.027	0.027	0.052	75
№4	1152	39	0.616	0.621	0.028	0.028	0.045	75
№5	1159	41	0.594	0.594	0.029	0.029	0.049	76
№9	1184	151	0.226	0.228	0.208	0.206	0.906	120

Причиною може бути відхилення профілю ґратки від синусоїдальної, в припущенні чого проводились розрахунки дифракції світла. Оскільки розрахунок оптимальної глибини ґратки проводився саме в припущенні синусоїдального профілю, то для коректної оцінки відхилення значення від оптимальної глибини варто орієнтуватися саме на дані оптичних вимірів. А за цими даними більшість ДҐ мала трохи менше за оптимальне значення глибини, а одна гратка (№9) - вдвічі більшу величину.

Дисперсію поверхневих плазмон–поляритонних хвиль добре видно на мапі залежності відношення коефіцієнтів відбивання світла в *p*-поляризації до *s*-поляризації R_p/R_s в залежності від кута падіння та довжини хвилі падаючого світла (Рисунок 16). Збудженню ПППХ відповідає мінімум R_p/R_s, оскільки вона збуджується світлом *p*-поляризації (ТМ хвиля). На цьому рисунку суцільними чорними кривими також показана дисперсія ПППХ для мод, збуджених дифрагованими +1, +2, +3, –1, –2, –3 порядками дифракції [12]. Спектрально-кутове положення ПППХ визначається умовами фазового синхронізму (Рівн.(1) та Рівн. (2)).

Слід відмітити, що ППФД є унікальною структурою, де збудження ПППР проявляється як у збільшенні фотоструму, так і в зменшенні відбиття світла *p*-поляризації. Це відкриває можливість створення комбінованого методу реєстрації ПППР [24] (наведеного в Додатку 1, на основі чого оформлено патент на корисну модель [25]), що використовує обидва згаданих вище фізичних фактора. Отримані

таким чином резонансні криві для виготовлених ППФД стали в 1.8 разів інтенсивніші та в 1.33 рази вужчі за визначені стандартним шляхом.

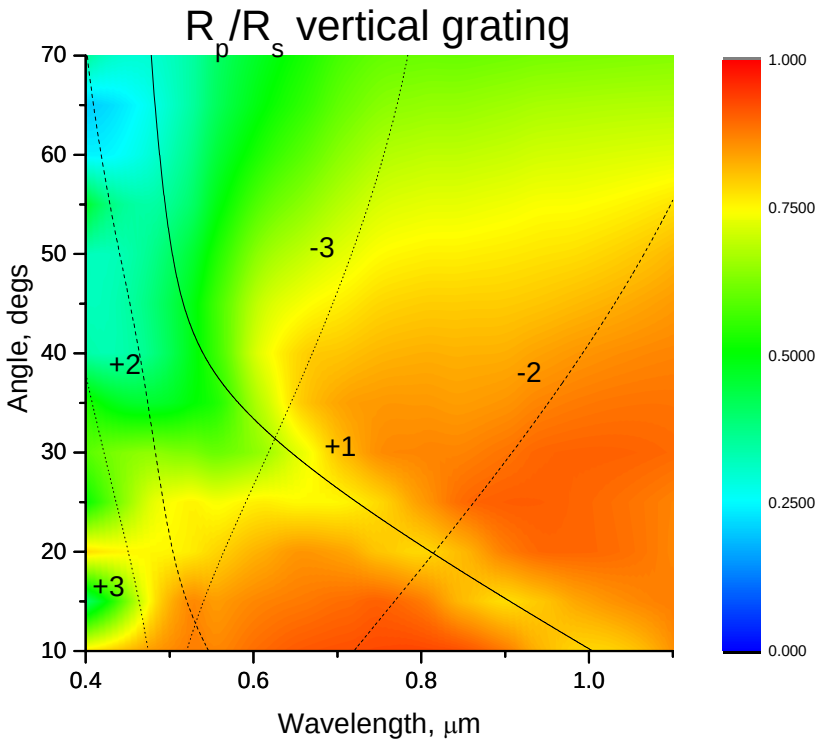


Рисунок 16 – Мапа відношення R_p/R_s для зразка №5 з дисперсією ПППХ для вказаних на рисунку дифракційних порядків.

З Рисунку 16 видно, що в основному збуджується ПППХ, що відповідає +1 порядку дифрагованого світла. Інші моди практично не збуджуються.

3.2.3 Оптичні дослдіження ДҐ у видимому та ближньому ІЧ діапазонах для визначення інтенсивності та ширини плазмон-поляритонного резонансу

В проєкті досліджено як оптичні властивості складових ППФД – золотих плівок та халькогенідних масок $As_{40}S_{40}Se_{20}$, так і виготовлених ДҐ, отримані методом багатокутової спектральної еліпсометрії. На Рисунках 17, 18 представлені еліпсометричні спектри кута $\Psi=\arctan(r_p/r_s)$ при різних кутах

падіння світла для виготовлених структур з ДҐ 1200 нм та 800 нм відповідно, з яких можна оцінити глибину і півширину ППШР.

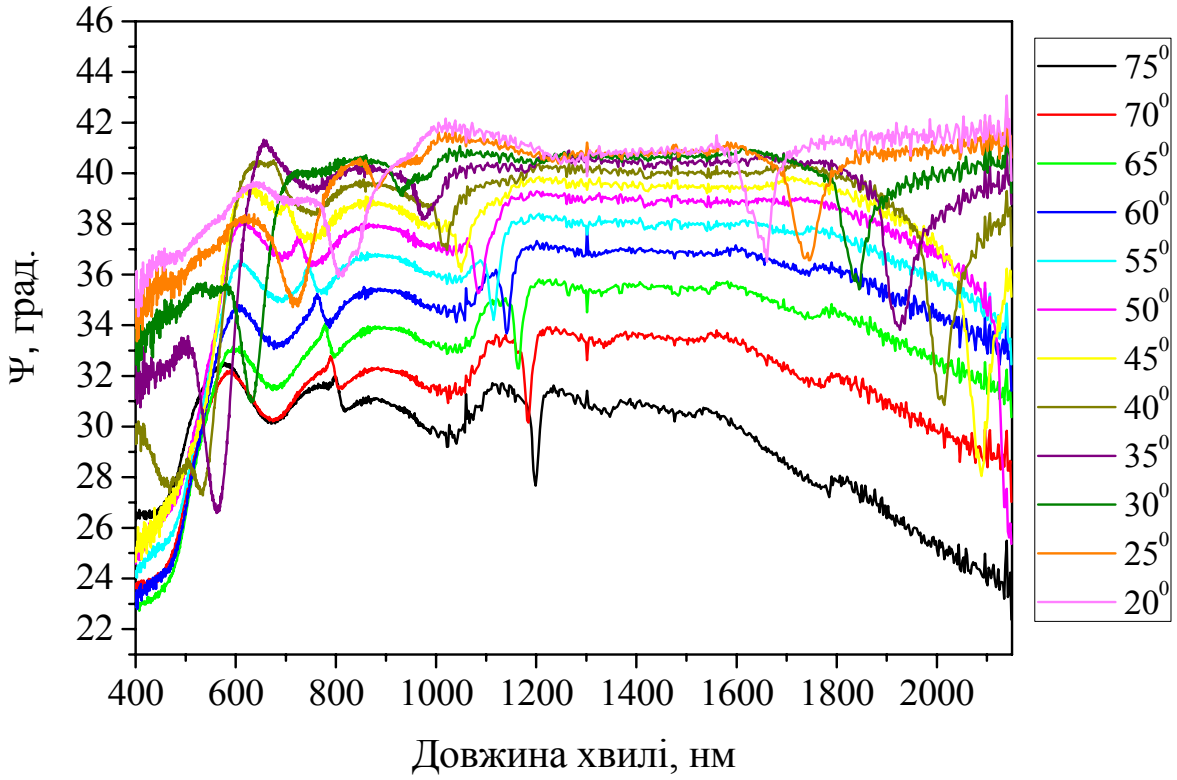


Рисунок 17 – Експериментальні спектри еліпсометричного кута Ψ при різних кутах падіння світла для структури з ДГ з періодом 1200 нм (Зразок 3.2)

Методику і приклад розрахунку положення гілок ППШР наведено Рисунку 16 для ґратки з періодом 1200 нм. Найбільш інтенсивний і гострий ППШР для ґратки 3.2 спостерігається для +1 та -1 порядків дифракції, також спостерігається доволі інтенсивний -2-й порядок. Оцінювана півширина ППШР є 14 нм для -1 порядку та 50 нм для -2 порядку.

На Рисунку 18 для структури 5.4 з ДҐ з періодом 800 нм найбільш інтенсивний і гострий ППШР спостерігається тільки для -1 порядку дифракції. Оцінювана півширина ППШР є 13 нм.

Як видно з порівняння Рисунків 17 та 18, ґратка з періодом 800 нм показала більш інтенсивний і вузький резонанс, що є причиною кращої поляризаційної чутливості відповідних ППФД, як буде продемонстровано згодом. В цілому, спектральна та кутова півширина резонансу у фотострумі (100 ÷ 200 нм та 5 ÷ 10 градусів відповідно) виглядає більшою, ніж у вимірах відбивання світла (спектрі еліпсометричного кута Ψ), що пов'язане з кутовою збіжністю (6 градусів) пучка світла, що використовувався для вимірювання фотоструму, в той час, як збіжність пучка в еліпсометрі є 0.1 градус.

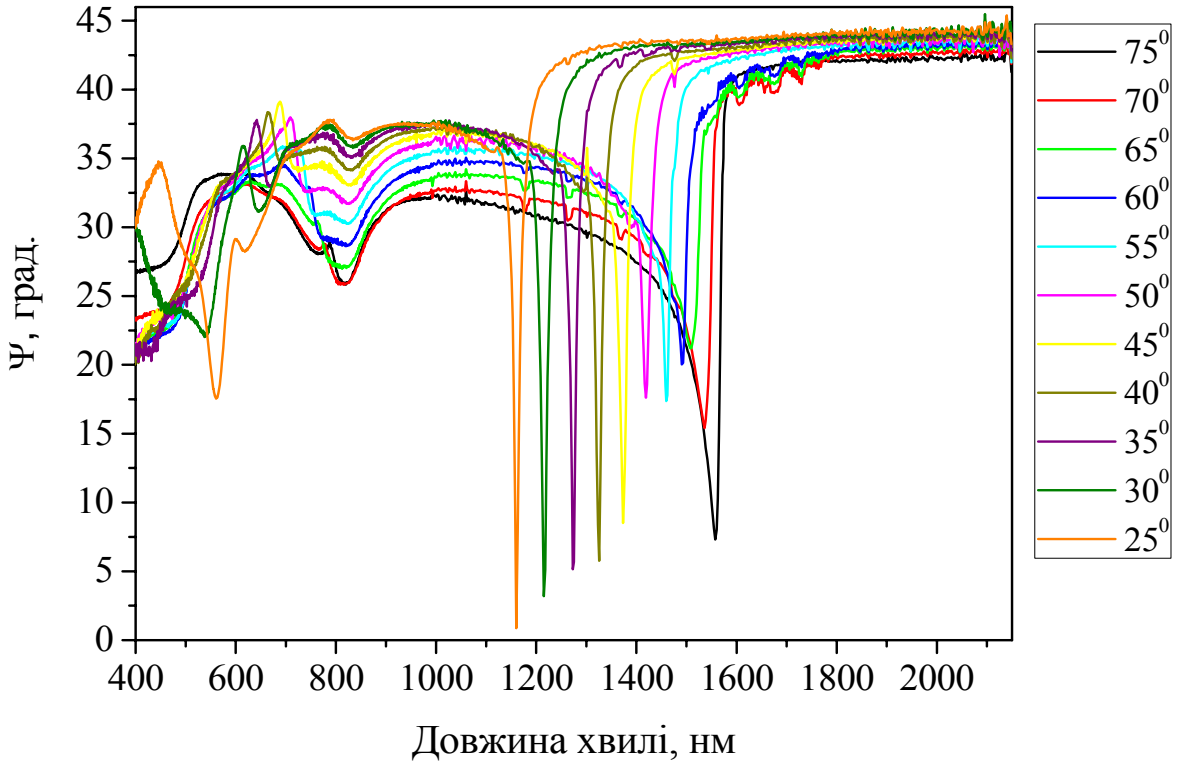


Рисунок 18 – Експериментальні спектри еліпсометричного кута Ψ при різних кутах падіння світла для структури з ДГ з періодом 800 нм (№5.4)

3.3 Фотоелектричні та резонансні характеристики ППФД

На Рисунку 19 та Рисунку 20 представлені спектральні та кутові залежності фотоструму вихідного *n-p* переходу на Si та розроблених на його основі ППФД з

періодом ДҐ 1200 нм. Видно, що після виготовлення ДҐ, фотострум набуває резонансного характеру при *p*-поляризованому освітленні. В *s*-поляризації особливості обумовлені виключно спектральними особливостями пропускання золота (максимум в районі 0.5 мкм). Досягнута на величина поляризаційної чутливості (відношення фотоструму в *p*-поляризації в резонансі до фотоструму *s*-поляризації на тій же довжині хвилі) I_p/I_s становить 3.4:1 для ДҐ №9 з глибиною 151 нм, що є навіть вище, ніж заплановано в проєкті. При цьому фоточутливість в резонансі складає >0.1 А/Вт. Параметри ряду виготовлених ДҐ та ППФД на їх основі представлені в Таблиці 3.

Таблиця 3 - Резонансні та електричні параметри розроблених ППФД з періодом 1200 нм.

Параметр	Технічні показники ППФД				
Підкладка, напівпровідник	Si				
Плазмон-активний метал	Au				
Робоча довжина хвилі світла λ, нм	600-1000				
Період дифракційної ґратки, нм	1200				
Номер дифракційної ґратки	№2	№3	№4	№5	№9
Глибина модуляції дифракційної ґратки, нм	37	42	39	41	151
Інтенсивність ПППР (Максимальна поляризаційна чутливість), I_p/I_s	2.4:1	2.4:1	2.3:1	2.1:1	3.4:1
Кутова півширина максимуму резонансу (при λ=800 нм) ΔΘ, град	5.2°	5.2°	5.0°	5.0°	9°
Фоточутливість в максимумі резонансу, А/Вт	0.07	0.10	0.06	0.06	>0.12
Параметр неідеальності ВАХ	<3.5				
Висота бар’єру, еВ	>0.4				

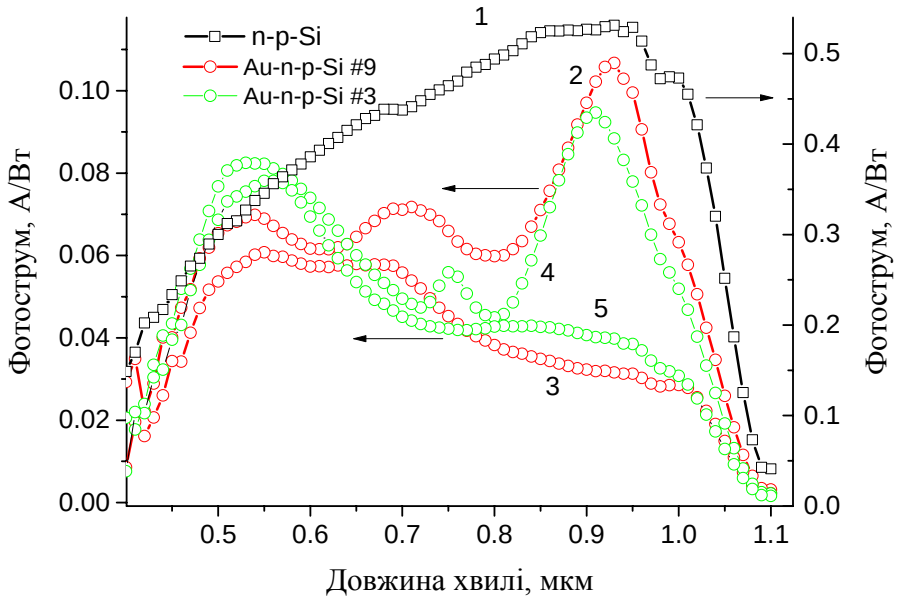


Рисунок 19 – Спектральні характеристики фотоструму вихідної *n-p*-Si структури та розроблених на її основі ППФД (на ДҐ №9 з глибиною 151 нм(2,3) та на ДҐ №3 з глибиною 42 нм (4,5)) при освітленні *p*- (2,4) та *s*- (3,5) поляризованим світлом, при куті падіння світла 15°

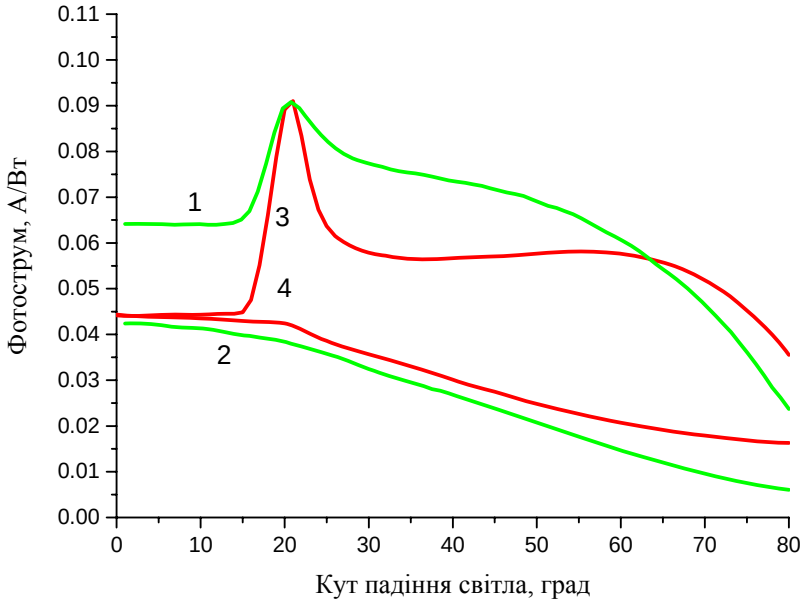


Рисунок 20 – Кутові залежності фотоструму розроблених ППФД при освітленні *p*- (1,3) та *s*- (2,4) поляризованим світлом з довжиною хвилі 800 нм для структури з ДҐ №9 (1,2), що має глибину модуляції 151 нм та ДҐ №3 (3,4), що має глибину модуляції 42 нм.

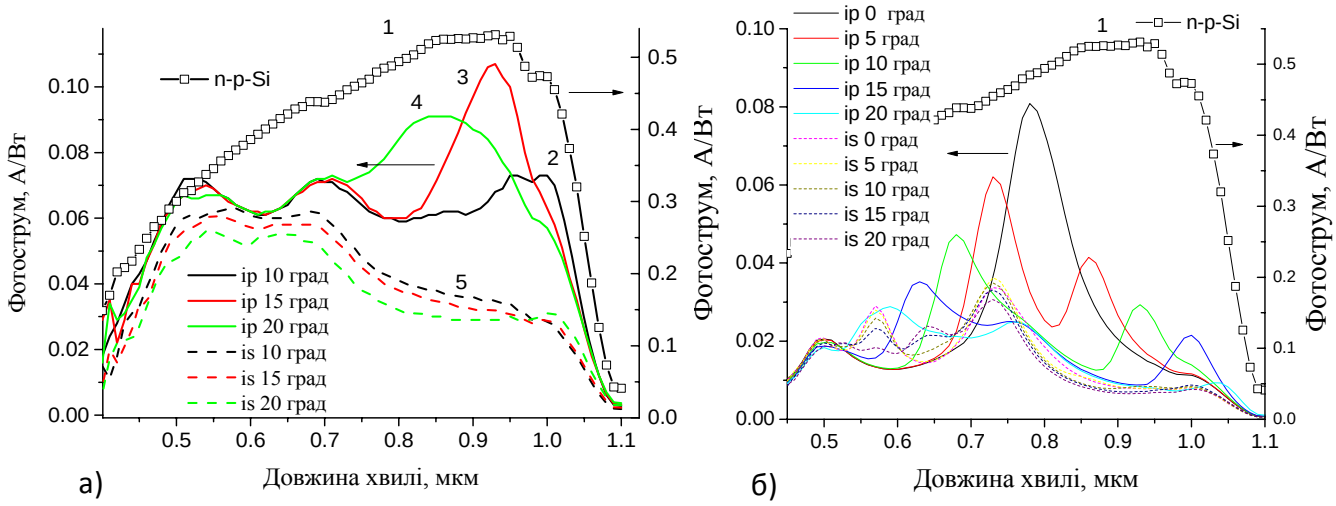


Рисунок 21 – Спектральні характеристики фотоструму вихідної *n*-*p*-Si структури (1) та розроблених на її основі ППФД, при різних кутах падіння світла, позначених на рисунку, та для ППФД на основі ДҐ з періодом 1200 нм (а) та 800 нм (б) .

а) ДҐ № 4.2 з періодом 1200 нм для p- (2,3,4) та s- (5) поляризації світла.

б) ДҐ № 6.4 з періодом 800 нм для p- (суцільні криві) та s- (пунктирні криві) поляризації світла, при різних кутах падіння світла, позначених на рисунку

При виготовленні ППФД на основі ДҐ з періодом 800 нм було покращено поляризаційні спектральні характеристики фотоструму. На Рисунку 21 для порівняння представлені спектри фотоструму для різних кутів падіння *p*- та *s*-поляризованого світла для найкращих структур з ДҐ з періодом 1200 нм (3.2, 4.2) та 800 нм (5.4, 6.4). На Рисунку 22 представлені спектри коефіцієнта поляризаційної чутливості для наведених структур.

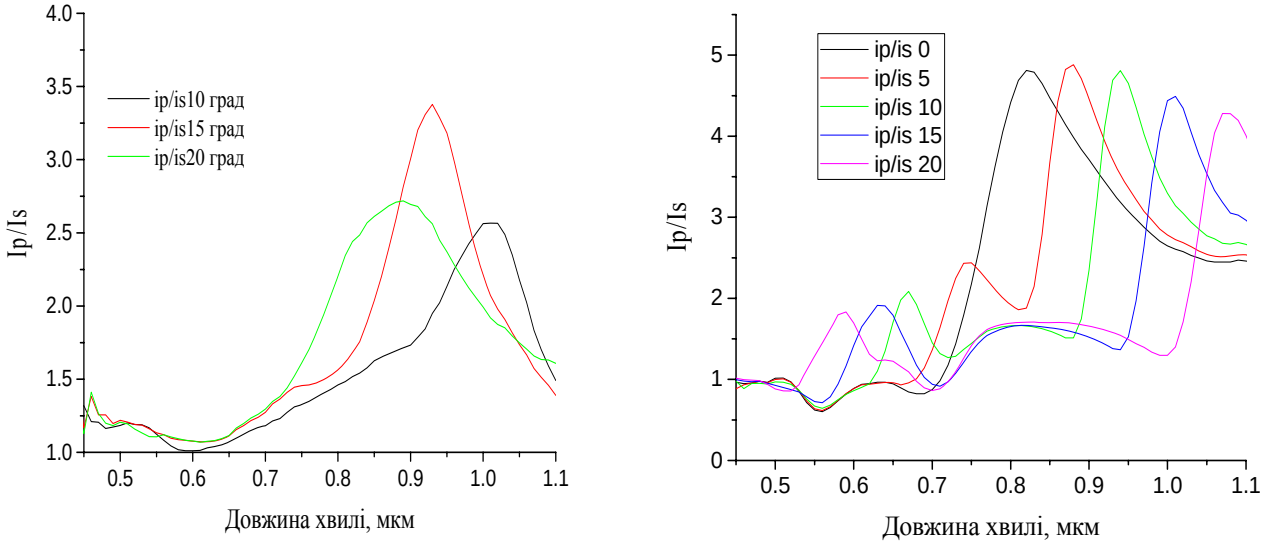


Рисунок 22 – Спектри поляризаційної чутливості I_p/I_s фотоструму для зразків № 4.2 (а) та № 6.4 (б) з ДҐ 1200 нм та 800 нм відповідно, для різних кутів падіння світла

В Таблиці 4 зведені їх технічні характеристики. Досягнута величина поляризаційної чутливості (відношення фотоструму в *p*-поляризації в резонансі до фотоструму *s*-поляризації на тій же довжині хвилі) I_p/I_s сягає 3.5:1 для ДҐ з періодом 1200 нм та 5:1 для ДҐ з періодом 800 нм, що є вище запланованого. При цьому фоточутливість в резонансі складає 0.08 ÷ 0.1 А/Вт.

Таблиця 4 - Резонансні та електричні параметри розроблених ППФ

Параметр	Технічні показники ППФ			
Підкладка, напівпроідник	Si			
Плазмон-активний метал	Au			
Робоча довжина хвилі світла λ, нм	600-1000			
Період дифракційної ґратки, нм	1200		800	
Номер дифракційної ґратки	№ 3.2	№ 4.2	№ 5.4	№ 6.4
Глибина модуляції дифракційної ґратки, 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	5.2°	5.2°	5.0°	5.0°

λ=800 нм) ΔΘ, град				
Фоточутливість в максимумі резонансу, А/Вт	0.1	0.1	0.08	0.08
Параметр неідеальності ВАХ	<3.5			
Висота бар'єра, еВ	>0.4			

3.4 Електричні властивості виготовлених ППФД

3.4.1 Вольт-Амперні характеристики ППФД

Електричні властивості виготовлених ППФД досліджувались методами вольт-амперних (ВАХ) та високочастотних вольт-фарадних характеристик (ВФХ). На Рисунку 23 представлені типові прямі ВАХ до (крива 1) та після (крива 2) виготовлення золотої дифракційної ґратки з періодом 1200 нм (Зразки 3.2 та 4.2) та 800 нм (Зразки 5.4 та 6.4) на поверхні *n-p* переходу в Si.

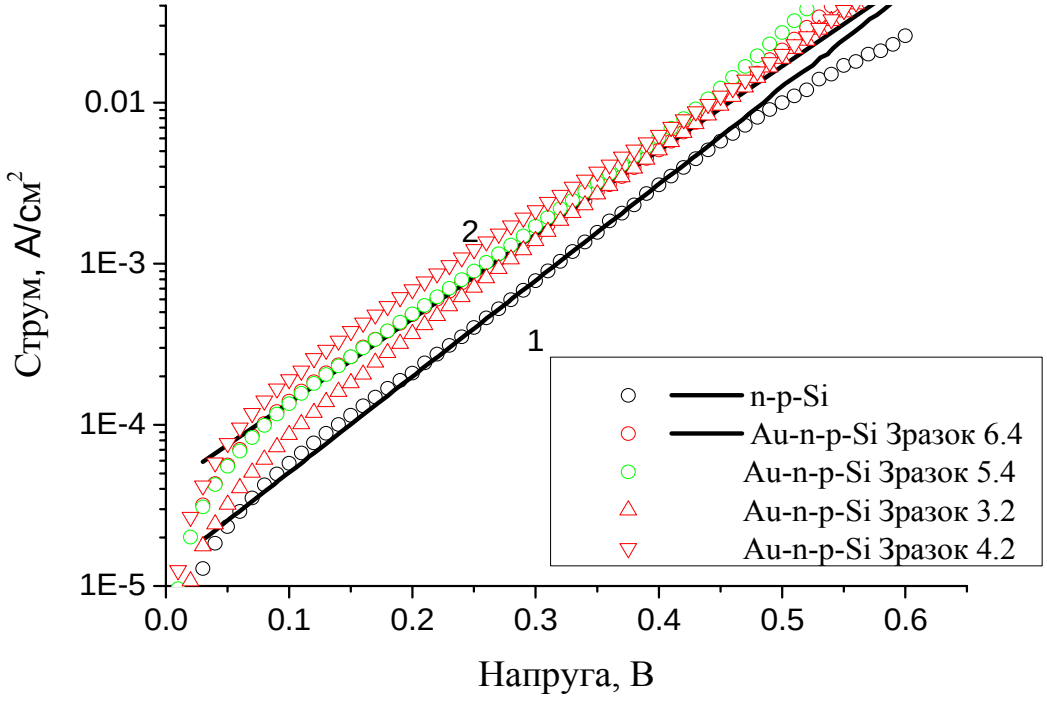


Рисунок 23 – Вольт-амперні характеристики вихідного *n-p* переходу на Si (1) та кількох виготовлених ППФД Au-n-p-Si на його основі (2) для зразків з ДҐ 1200 нм (3.2, 4.2) та з ДҐ 800 нм (5.4, 6.4)

З ВАХ вихідного *n-p* переходу в Si отримано, що його параметр неідеальності при 0.3 В прямого зміщення n=2.86, а темновий струм відсічки I_0=1.23×10^{-5} А/см^2. При нанесенні золотої дифракційної ґратки параметр неідеальності при 0.3 В прямого зміщення збільшується до n=3.0÷3.4, а темновий струм відсічки до I_0=2.0×10^{-5} ÷1.0×10^{-4} А/см^2. Таким чином, параметри ВАХ трохи погіршуються, але несуттєво. Варто відмітити, що параметри дифракційної ґратки на металевій плівці практично не впливають на електричні характеристики, що є перевагою і особливістю даної технології виготовлення ДҐ, коли інтерфейс між підкладкою Si і металевою плівкою залишається плоским, із сталими характеристиками [11], і не залежить від параметрів ДҐ.

Деяке погіршення характеристик пов'язано з інтерфейсом між Au та підкладкою. Під час тривалих по часу обробок при формуванні дифракційної ґратки на поверхні підкладки утворюється проміжний оксид SiO_2, який також може погіршувати струмопроходження.

Також відбувається загальне зменшення висоти бар'єру внаслідок того, що Au з *n*-Si формує, бар'єр Шотткі який включений назустріч *n-p* переходу в Si, як це показано на зонній діаграмі на Рисунку 24. Наявність тонкого проміжного шару Cr (до 5 нм) між Au та верхнім шаром Si *n*-типу, який використовується для покращення адгезії, трохи покращує ситуацію, зменшуючи бар'єр Шотткі (оскільки Cr формує омічний контакт з *n*-Si), однак при такій малій товщині він є несуцільний, і очевидно, Au в деяких місцях вступає в контакт з *n*-Si. Зробити товщим шар Cr не можна, бо це погіршить умови збудження ППП Р. Очевидно найкращим рішенням було би використання *p*-*n*-Si, коли на підкладці Si *n*-типу був би створений тонкий *p*-шар, на якому би далі створювали Au ДҐ. Au та *p*-Si створюють омічний контакт, і можна було би позбутися, таким чином, зустрічного бар'єру Шотткі між Au та Si.

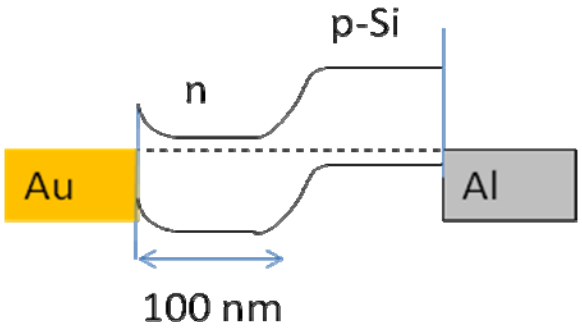


Рисунок 24 – Зонна діаграма розроблених ППФД з *n-p* переходом, що залягає на глибині порядку 100 нм від поверхні Si

3.4.2 Вольт-Фарадні характеристики ППФД

На Рисунку 25 представлені типові ВФХ до та після виготовлення золотої дифракційної ґратки на поверхні *n-p* переходу в Si. З ВФХ в координатах $1/C^2$ від напруги по відсічці на осі напруг можна оцінити висоту бар'єра [17]. Для вихідного *n-p* переходу в Si відсічка дає значення 0.8 В, після нанесення Au дифракційної ґратки це значення зменшується до 0.4 В. Таким чином, формування контакту між Au та *n*-частиною Si підкладки призводить до деякого зменшення висоти бар'єра.

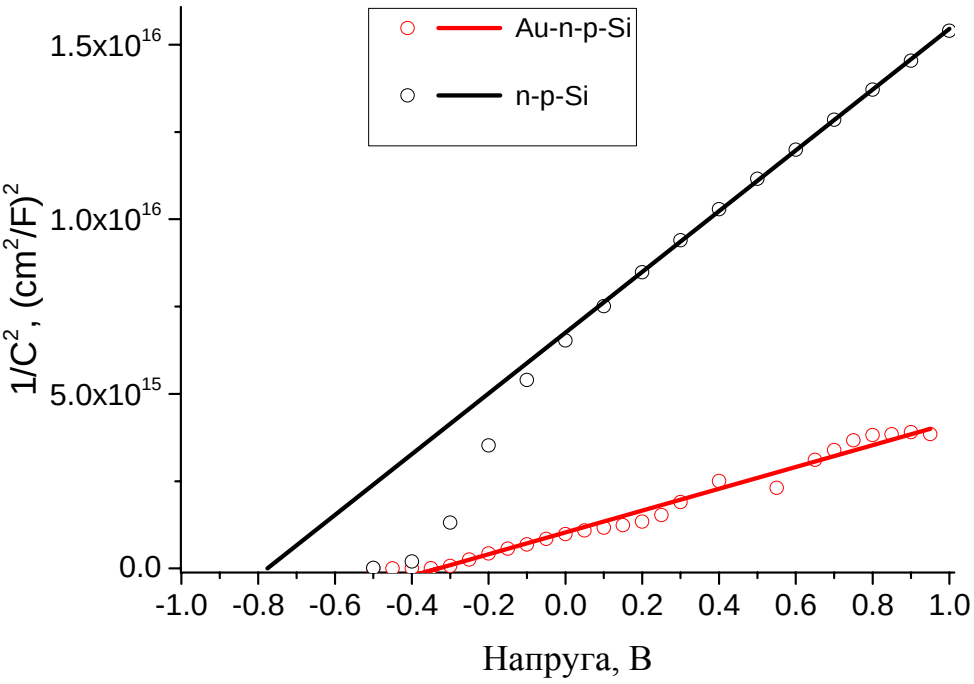
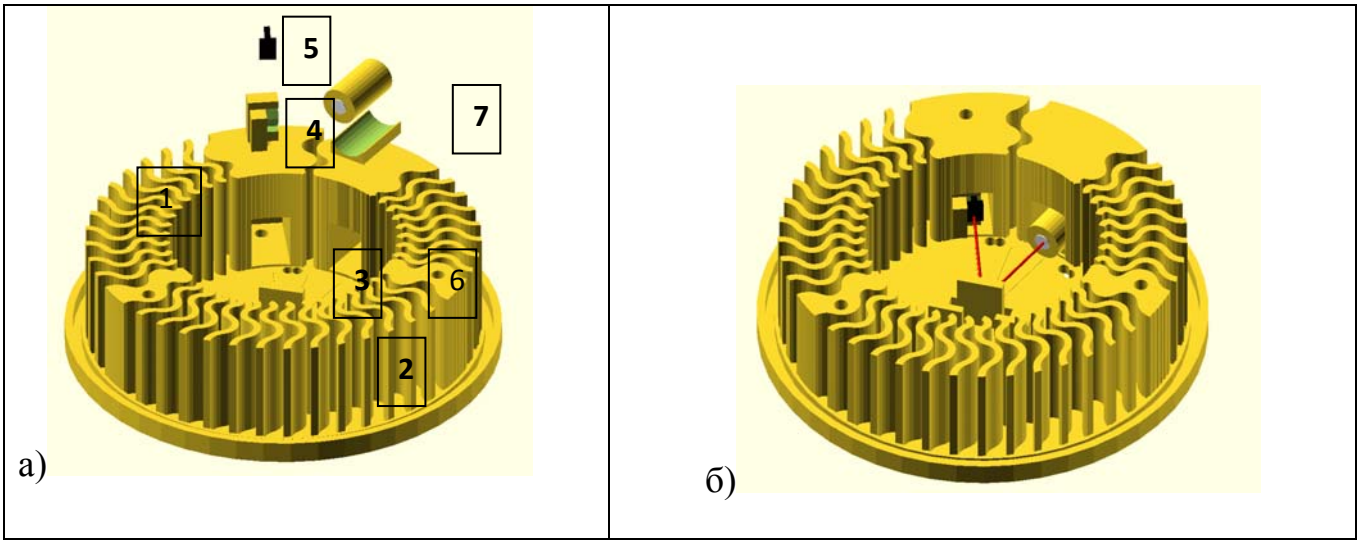


Рисунок 25 – Вольт-фарадні характеристики вихідного *n-p* переходу на Si (чорні символи) та виготовлених (червоні символи) ППФД

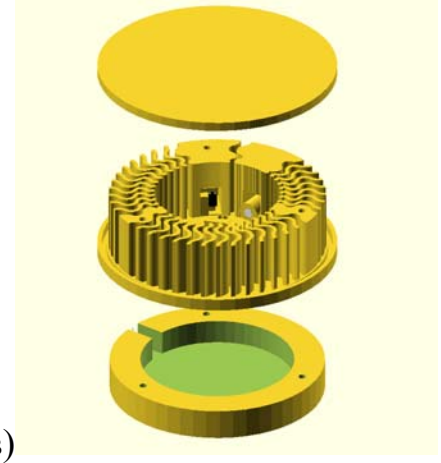
4. Розробка робочої камери сенсора, електронних схем узгодження і підсилення сигналу з ППФД

4.1 Розробка і виготовлення робочої камери сенсора

Грунтуючись на відомих рішеннях і промислових зразках оптичних датчиків диму [26-28] (для майбутньої сумісності розробленого сенсора з існуючими технологіями і виробничими процесами), була розроблена камера датчика диму з використанням відкритого програмного забезпечення для 3D моделювання OpenScad [29]. Розроблена 3D модель внутрішнього простору датчика диму наведена на Рисунку 26. Вона складається з кількох частин для зручності виготовлення і модифікації. Модель містить оптично-затіненні отвори для проникнення диму (1), місце для розташування сенсора диму на основі ППФД (2), місце для додаткового фотодатчика (не обов'язкове в кінцевому варіанті датчика диму) (3) для вимірювання відбитого від поверхні ППФД світла, кріплення фотодатчика (4) та сам фотодатчик (5), місце для джерела освітлення (6) (лазерного діода або світлодіода), саме джерело світла (7).



а) б)

в) 

г)

Рисунок 26 – Дизайн конструкції камери датчика диму для ППФ з періодом ДҐ 1200 нм.

А) конструкція і складові внутрішньої частини камери.

Б) внутрішня частина камери в зборі із зображенням ходу променів лазера.

В) зображення складових камери: кришка (1), внутрішня частина камери сенсора диму (2), відсік для розміщення електронних схем підсилення і обробки сигналу (3).

Г) вигляд камери в зборі

В такому датчику кут падіння світла на сенсор диму складає 20° від нормалі до поверхні сенсора, зробленого на основі ДҐ з періодом 1200 нм. Довжина хвилі джерела світлу вибирається з наявних промислових лазерних або світлодіодів і є порядку 800 нм. У випадку використання більш ефективного ППФД з підвищеним коефіцієнтом поляризаційної чутливості на основі ДҐ з періодом 800 нм, додатковий фотодатчик 5 не використовується, а сам ППФД розташовується під нормальним до світла кутом.

На Рисунку 27 наведені фотографії виготовленої методом 3D-друку камери сенсора в зборі з червоним лазером, використаним для наочності, оскільки джерело 800 нм, при якому буде працювати сенсор, є невидимим для людського ока.

а)

б)

в)

Рисунок 27 – Фотографія виготовленої методом 3D друку камери сенсора в зборі з червоним лазером для наочності в різних ракурсах (а,б) та вигляд камери сенсора в зборі (в)

4.2 Розробка електронних схем узгодження і підсилення сигналу з ППФД

Електронна схема обробки сигналу від сенсору диму розроблена для підсилення і вимірювання змінної складової фотоструму, що генерується в ППФД модульованим світлом лазера, фотодіода, або механічно модульованим світлом від лампи розжарювання після монохроматора. Цим досягається загальне збільшення чутливості, оскільки змінний струм легше підсилювати та суттєво зменшується вплив фонової постійної засвітки.

Схема електронної частини підсилення і обробки сигналу з ППФД розроблена з допомого програми Proteus 8.9 [30, 31], є розвитком підходу [24], запатентованого авторами проєкту в [25], та наведена на Рисунку 28.

Схема складається із схематичного зображення ППФД у вигляді діода D1, перетворювача фотострум-напруга на основі операційного підсилювача (ОП) U2:A, резистора, що регулює коефіцієнт перетворення фотострум-напруга R1, підсилювача змінного струму на основі ОП U2:B з резисторами, що регулюють коефіцієнт підсилення R2, R3, випрямляча змінного струму на основі ОУ U3:A, фільтра низьких частот R6C2. Канал підсилення і перетворення фотоструму для опорного фотодетектора повністю аналогічний каналу для ППФД. Після обробки підсилений і випрямлений сигнал з ППФД та опорного фотодетектора подаються на АЦП вхід IO8 (AD0) та опорний канал АЦП AREF мікропроцесора відповідно. Схема містить мікропроцесор Atmega328P у складі готового модуля Arduino UNO, що використовується для оцифровування сигналів та передачі інформації в персональний комп’ютер для аналізу через послідовний інтерфейс UART.

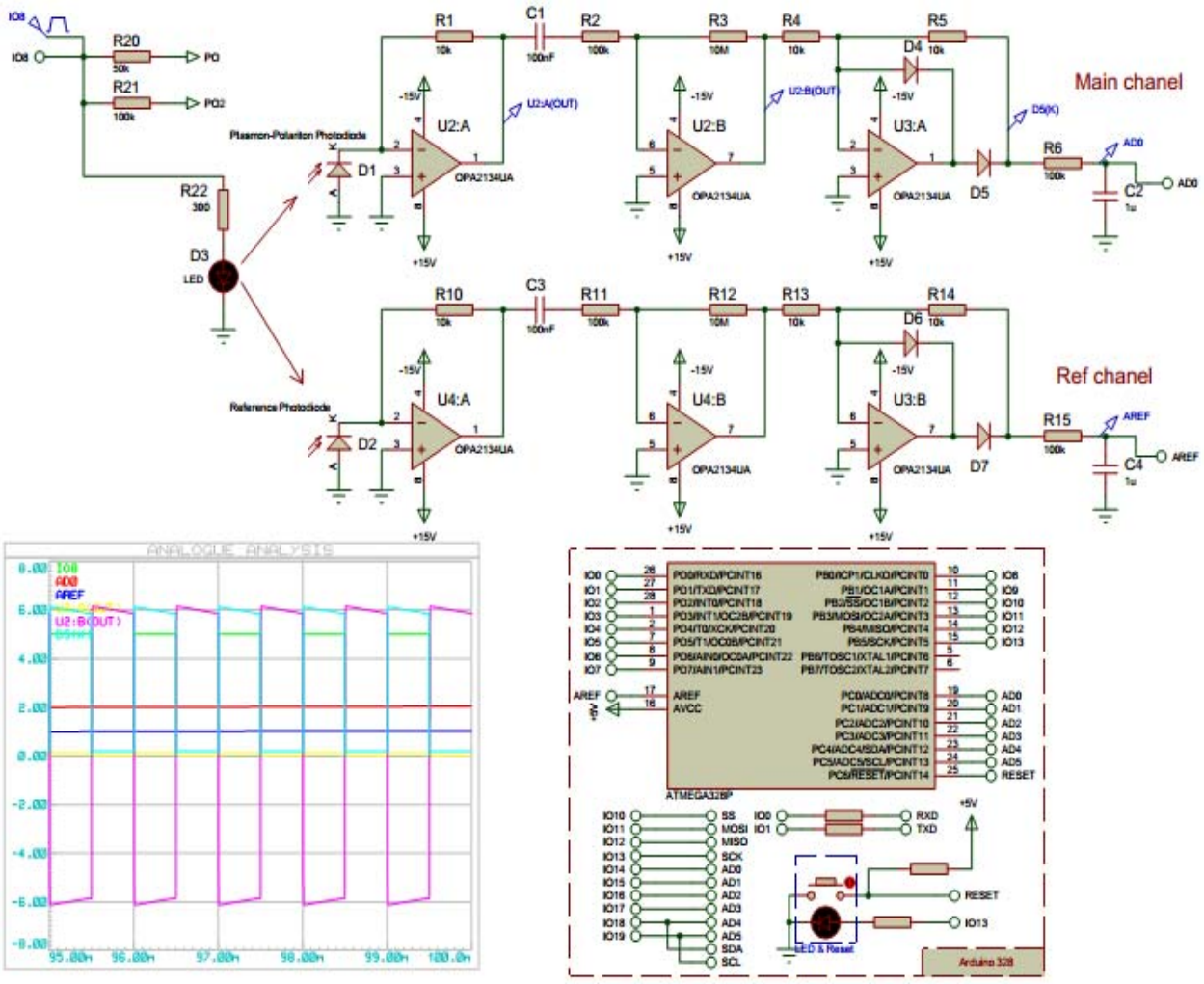


Рисунок 28 – Принципова електрична схема обробки електричних сигналів з ППФД та опорного фотодетектора. На вставці – діаграми сигналів IO8-періодичний сигнал (меандр, 5В, 1000Гц), що подається на світлодіод; U2:A – сигнал ППФД після перетворення фотострум-напруга; U2:A – сигнал ППФД після підсилювача змінного струму; D5(K) – сигнал ППФД після випрямлення; AD0 – сигнал з ППФД після фільтра низьких частот R6C2; AREF - сигнал з опорного фотодіода після фільтра низьких частот R15C4

5 Розробка та виготовлення стенду для випробувань

5.1 Дим, процеси утворення і проблеми при детектуванні

Людство у своєму повсякденному житті стикається з великою різноманітністю аерозольних систем – хмари, тумани, вулканічний та ґрунтовий пил тощо. Аерозолі надзвичайно важливі для організації безпечної життєдіяльності людей та охорони навколишнього середовища. Залежно від дисперсності аерозолю (розміру частинок) поділяють такі види аерозолів – пил, хмари, дими [32]:

- пил (розмір частинок дисперсної фази більше 10 мкм (10^{-5}м)),
- хмари, туман (10 ... 0.1 мкм (10^{-7} – 10^{-5} м)),
- дими (0.1 ... 0.001 мкм (10^{-9} – 10^{-7} м)).

Дими утворюються при горінні або сублімації летких речовин, а також в результаті хімічних і фотохімічних реакцій. Частинки димів, найбільш високодисперсної системи, маючи малі розміри на відміну від пилу (більш грубодисперсної системи), практично не осідають під дією сили тяжіння.

Пожежа може швидко охопити велику площу в житлових будинках та підсобних спорудах лише в тих випадках, коли спалахнуть пролиті горючі рідини (наприклад, падіння на підлогу керогазу); у газифікованих будинках це може мати місце при вибухоподібному спалаху газу. Найчастіше в житлових будинках пожежа починається з появи незначного полум'я, якому передує більш менш тривалий період нагрівання або тління твердих горючих предметів, матеріалів, речовин.

На сьогоднішній день найпопулярніші та найпоширеніші системи пожежної сигналізації засновані на виявленні диму. Для виявлення пожежі застосовують дві методики виявлення диму: фотоелектричні детектори (розсіювання світла) та іонізаційні детектори. Однак пошук альтернативних методів виявлення для підвищення безпеки мешканців та зменшення кількості помилкових тривог є активною сферою досліджень.

Горіння – екзотермічна реакція окислення речовини, яка супроводжується виділенням диму та виникненням полум’я або світінням.

Для виникнення горіння необхідна одночасна наявність трьох чинників: горючої речовини, окисника та джерела запалювання. При цьому горюча речовина та окисник повинні знаходитися в необхідному співвідношенні один до одного і утворювати таким чином горючу суміш, а джерело запалювання повинно мати певну енергію та температуру, достатню для початку реакції. Горючу суміш визначають терміном "горюче середовище". Це середовище, здатне самостійно горіти після видалення джерела запалювання. Для повного згоряння необхідна присутність достатньої кількості кисню, щоб забезпечити повне перетворення речовини в його насичені оксиди. За недостатньої кількості повітря окислюється тільки частина горючої речовини. **Залишок розкладається з виділенням великої кількості диму**. В цих умовах також утворюються токсичні речовини, серед яких найбільш розповсюджений продукт неповного згоряння – оксид вуглецю (CO), який може призвести до отруєння людей. На пожежах, як правило, горіння відбувається з браком окисника і виділенням великої кількості диму, що серйозно ускладнює пожежогасіння внаслідок погіршення видимості або наявності токсичних речовин у повітряному середовищі.

Продукти горіння — це газоподібні, тверді і рідкі речовини, що утворились в процесі горіння. Склад продуктів горіння залежить від складу горючої речовини і умов протікання реакції горіння. Продукти горіння утворюють дим.

Дим – це дисперсна система з продуктів горіння та повітря, що складається з газів, парів та розпечених частинок. стійка дисперсна система, що складається з дрібних твердих і рідких частинок (дисперсної фази), що знаходяться у зваженому стані в газах, що утворюється при згорянні чогось. Дим – типовий аерозоль з розмірами твердих частинок від 10^{-8} до 10^{-5} м. На відміну від пилу, більш грубодисперсної системи, частки диму практично не осідають під дією сили тяжіння. Частинки диму можуть бути ядрами конденсації атмосферної вологи, у результаті виникає туман.

Розрізняють два види горіння: повне (при достатній або надлишковій кількості кисню) та неповне (при нестачі кисню).

Продуктами повного горіння є діоксид вуглецю, азот, вода тощо. При неповному горінні звичайно утворюються їдкі та отруйні горючі і вибухонебезпечні продукти: **окис вуглецю, спирти, кислоти, альдегіди**.

Для виникнення горіння необхідно 14% кисню у повітрі. При зниженні концентрації кисню до 10% процес горіння переходить до процесу тління. При концентрації кисню менше 10-16% процес горіння не починається. При пожежі в приміщенні, куди не надходить кисень, а вікна та двері закриті, вогонь буде слабшати і згасне після того, як наявний кисень буде витрачений. Зниження концентрації кисню у повітрі призводить до кисневого голодування людей. Так, при зниженні концентрації нижче 16% робота без індивідуальних засобів захисту органів дихання неможлива.

Всім доводилося спостерігати, що поки багаття тільки розпалюється, над ним стелиться білий димок. Коли багаття розгориться, то над самим полум'ям буде знаходитися велика кількість маленьких частинок сажі, що летять вгору, і тільки вже вище їх буде клубитись білий дим. Щойно первинні частинки сажі під впливом теплових потоків залишають зону реакції, відразу починається процес коагуляції, тобто об'єднання дрібних частинок у великі за величиною. В цьому випадку частинки сажі, що виходять при неповному згоранні, утворюють довгі ланцюжки, у яких ще з'являються електростатичні заряди. Якщо дим спочатку і містить тверді сферичні частинки, то в ньому в процесі коагуляції утворюються агрегати (з'єднані або злиплі між собою частинки) неправильної форми. Таким чином, спочатку з'являються якісь одні частинки диму, поступово вони стають іншими, а виявляти за допомогою пожежних сповіщувачів потрібно і ті, й інші.

Властивості диму характеризуються такими параметрами:

Концентрація диму — це маса продуктів горіння, ща містяться в одиниці об’єму. В зоні задимлення концентрація продуктів горіння знаходиться в інтервалі від $1 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ кг/м³.

Наявність конденсованої фази зумовлює непрозорість диму. Ступінь зниження прозорості залежить від концентрації, розміру та природи частинок дисперсної фази. Параметром, що характеризує оптичні властивості диму, є щільність задимлення.

Оптична щільність диму $M=10/d\ \lg(I_0/I_s)$. Звідси випливає, що оптична щільність диму M зростає від нуля разом з концентрацією диму і має розмірність дБ/м.

Токсичність продуктів горіння — здатність продуктів горіння викликати отруєння людей, що перебувають без індивідуальних засобів захисту органів дихання.

Температура диму. Температура продуктів горіння безпосередньо біля зони горіння може сягати 1000°С, але в приміщеннях температура диму зазвичай істотно нижче. Основним фактором, що впливає на температуру диму, є умови газообміну. Проте небезпечною для людей температурою вважається температура 70°С. Тривале перебування за такої температури пов'язане з ризиком для життя через перегрівання організму.

Дим, що складається з дрібнодисперсних частинок, утворюється внаслідок неповного згоряння. Він утворюється як при горінні з полум’ям, так і без нього, хоча характер частинок та форми їх утворення дуже різні. Дим при тлінні аналогічний диму, який виходить, коли будь-який вуглецевовмісний матеріал нагрівається до температур, за яких відбувається хімічне розкладання та еволюція летких продуктів горіння. Фракції з великою молекулярною вагою конденсуються в міру їх перемішування з холодним повітрям, що призводить до утворення туману, що складається з дрібних крапель смоли та рідин з високою температурою кипіння. Ці краплі прагнуть в умовах спокійного повітря злипатися, утворюючи дрібні частинки із середнім діаметром порядку одного мікрона, і осідають на поверхнях, утворюючи маслянистий залишок.

За характером дим при згорянні матеріалів з утворенням полум’я відрізняється від диму при тлінні. Він складається майже з твердих частинок. У той час, як невелика частина цих частинок може бути утворена при абляції

твердого матеріалу в умовах впливу на цей матеріал потужного теплового потоку, велика частина частинок утворюється в газовій фазі в результаті неповного згоряння та високотемпературних реакцій піролізу при низьких концентраціях кисню. Слід зазначити, що дим, який складається з твердих частинок, може утворитися навіть якщо вихідним горючим матеріалом є газ або рідина.

Тому, якщо об'єднати ці дані, властивості диму можна охарактеризувати так:

- дим, як один із небезпечних чинників пожежі, дуже важко відрізнити від інших аерозолів (пил, туман, побутові і промислові аерозолі тощо), оскільки він сам є аерозолем;
- різні матеріали при горінні виділяють дим зі своїми властивостями та характеристиками;
- на початковому етапі розвитку пожежі на властивості диму дуже сильно впливають параметри навколишнього середовища (температура та вологість у приміщенні, потоки повітря тощо);
- у процесі розвитку пожежі дим змінює свої фізичні властивості;
- при переміщенні та віддаленні від вогнища загоряння дим модифікується як за концентрацією, так і розмірами та формою своїх частинок.

Причин нестабільності параметрів диму кілька. Це як нестійкість самого диму як одного з видів аерозолю, так і зміни в параметрах самої пожежі – від тління однієї з речовин до обширного та інтенсивного горіння різних матеріалів та предметів.

І ось тут може виникнути питання: а якого розміру чи типу частинки диму має виявляти пожежна сигналізація. Насправді, для достовірного виявлення пожежі, ми повинні мати можливість виявлення частинок диму всіх розмірів, від найменших до великих, що мають як найменшу кінетичну теплову енергію, так і велику, незважаючи на електричний потенціал, який вони несуть. Жодної селективності до різних типів диму у пожежних сповіщувачів не повинно бути! Сенсор повинен виявляти пожежу на найбільш ранній стадії, коли вона тільки виникає, тобто коли самого диму ще ніби і не видно, але перші часточки диму почали досягати місця розміщення пожежного детектора. І потрібно це для того,

щоб була можливість ще на початковому етапі пожежі скористатись первинними засобами пожежогасіння і почати якнайшвидше евакуацію людей.

За останні 40 років рекомендований час евакуації під час пожежі в будинку скоротився з 17 хвилин до 3 хвилин через зміни в матеріалах інтер'єру і планах сучасних будинків.

5.2 Історичні аспекти формування вимог до тестування детекторів диму

У 1894 р. у м.Чикаго (Illinois, USA) інженер-електрик William Henry Merrill заснував Бюро електротехніки страховиків (Underwriters Electrical Bureau). Упродовж усього 20-го століття вони було відоме як Underwriters Laboratories (UL) і брали участь в аналізі безпеки багатьох нових технологій минулого століття, зокрема в поширенні електрики та розробці стандартів безпеки для електричних пристроїв і компонентів. У січні 2012 року Underwriters Laboratories перетворилася з неприбуткової організації на комерційну компанію в США. Нова дочірня компанія, яка називається просто UL LLC (UL limited liability corporation), взяла на себе діяльність Underwriters Laboratories з тестування та сертифікації продуктів. UL LLC є американською всесвітньою консалтинговою та сертифікаційною компанією з питань безпеки зі штаб-квартирою у Northbrook (Illinois, USA) [33]. Вона підтримує свої офіси у 46 країнах світу.

UL є однією з кількох компаній, схвалених Федеральним агентством США (Управління з безпеки та гігієни праці (OSHA)) для проведення тестування безпечності. OSHA підтримує список затверджених випробувальних лабораторій, які відомі як національно визнані випробувальні лабораторії. Лабораторії UL працюють, щоб сприяти створенню безпечних умов життя та праці за допомогою застосування науки про безпеку та техніки безпеки на основі небезпеки. UL працює для захисту ринку від підробок і неякісних товарів.

У середині 1970-х димові сигналізації починають набувати популярності. Виробники пожежних детекторів у співпраці з UL розробили 2 стандарти тестування та сертифікації:

– стандарт UL 167 для іонізаційних сенсорів (тільки для горіння з полум'ям) та

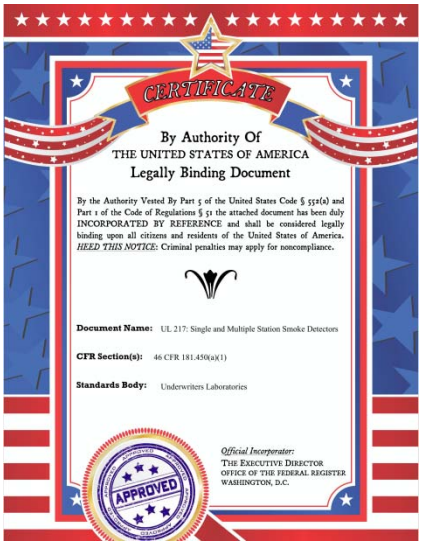
– стандарт UL 168 для фотоелектричних сенсорів (тільки для горіння з димом або тління).

Дослідження, проведені UL та NBS в 1975-1976 (т.зв. «Indiana Dunes»), щоб перевірити димові сигналізатори, показали, що обидві технології виявлення пожежі ефективні.

Результати цих досліджень були надалі використані для розробки єдиного стандарту димової сигналізації – UL 217 (1993 р.) (Рисунок 29). Він включав 4 тести на горіння, подібні до UL 167, і новий тест на тління (викликаний частими випадками пожеж, що починались із тління бавовняних матраців) [34].

Подальші дослідження показали, що димові сигналізатори, які відповідають критеріям ефективності ANSI/UL 217-2015, демонструють значно кращі загальні характеристики за рахунок розширення діапазону сценаріїв та параметрів пожежі, на які повинні реагувати сигналізатори тривоги, і мають більшу стійкість до хибних сигналів. За вдосконаленим стандартом показники димових сповіщувачів і сигналізації мають ставати кращими. Краща продуктивність – вища безпека.

Тенденція кількох останніх десятиліть полягає в тому, що в побут людей і в інтер’єри їх помешкань входять нові матеріали, переважно синтетичні, які характеризуються швидшим процесом горіння, іншими компонентними характеристиками диму. Сповіщувачі диму повинні бути ефективнішими у виявленні вогню від загоряння сучасних меблів і краще протистояти хибним сигналам тривоги від диму під час приготування їжі. Тому в стандарти періодично вводяться поправки і доповнення, котрі переважно стосуються розширення кола матеріалів як джерел диму, тестова камера ж залишається стандартною. Наприклад, поліуретан (PU, PUR), в залежності від рецептури, може бути жорстким, м'яким, пористим (спінений) або монолітним і тому надзвичайно поширений в оздобленні сучасного житла. Тому в редакцію стандарту ANSI/UL 217-2015 додано умови тестів детектування горіння поліуретану та на кухонні дими.



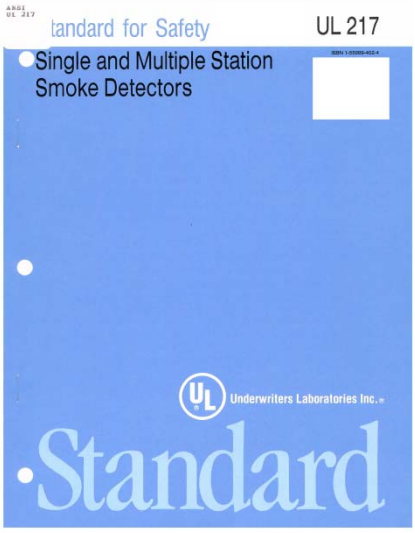


Рисунок 29 – Фото титульної та першої сторінки стандарту ANSI-UL 217 [34]

В Україні на такі вироби діє галузевий стандарт ДСТУ EN54-7 «Системи пожежної сигналізації» [35], який був впроваджений в 2005-2006 роках і по суті є ідентичним перекладом європейського стандарту 2000 року.

У стандарті UL 217 у пункті 38.3.3 [34] вперше перелічено вимоги до параметрів та компонентів димової камери, в котрій в першу чергу повинні проходити тестування на чутливість до різних типів диму нові датчики пожежної небезпеки. Ці вимоги до камери залишаються чинними до цього часу. ДСТУ EN 54-7:2004 містить Додаток А (обов'язковий) «Димовий канал для вимірювання значення порогу спрацювання», менш конкретизований порівняно з UL 217.

Бюро шахт США (The U.S. Bureau of Mines', USBM) використовували створену за існуючим стандартом UL 217 димову камеру (Рисунок 30) для дослідження детекторів диму, котрі використовуються в підземних шахтах [36]. Первинні дослідження в такій камері дозволяють швидко перевірити параметри великої кількості детекторів при стандартизованих умовах в лабораторії.

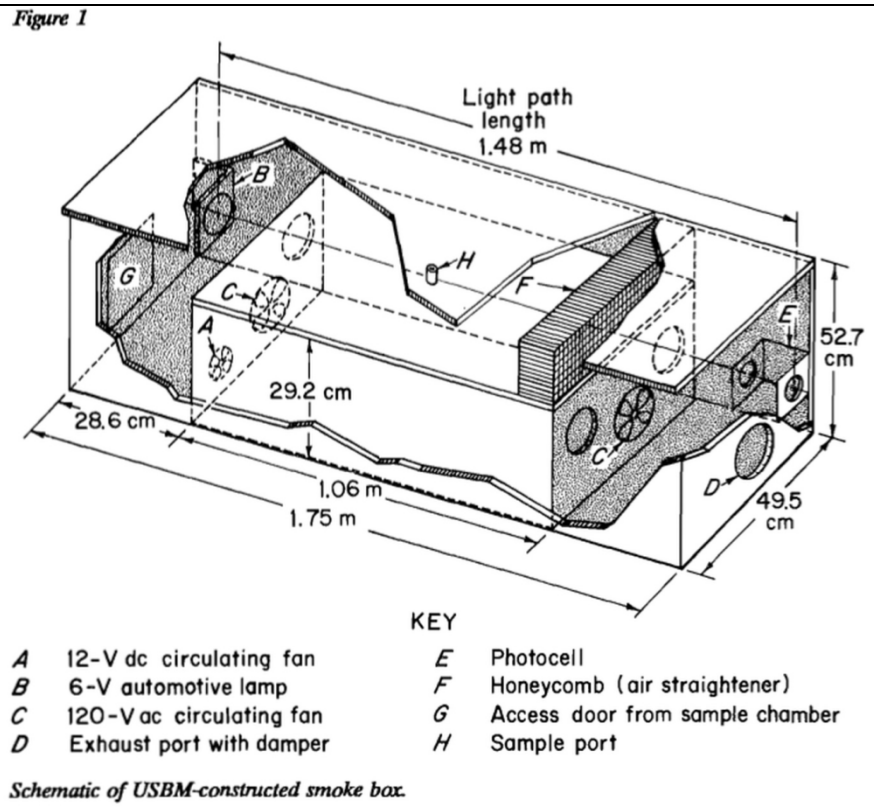


Рисунок 30 – Конструкція димової камери, створеної за існуючим стандартом UL 217, яку використовували Бюро шахт США (The U.S. Bureau of Mines', USBM) [36] для лабораторних досліджень детекторів диму, котрі використовуються в підземних шахтах

В роботі [37] представлено ескізи та фото сконструюваної в NIST димової камери (Рисунок 31) відповідно до специфікацій ANSI-UL 217. Чутливість усіх димових сигналізаторів перевіряють в таких димових камерах перед експериментами в кімнаті.

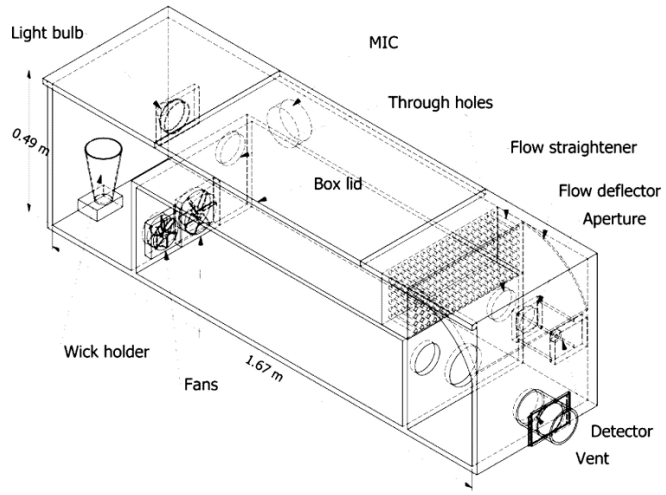


Рисунок 31 – Ескізи та фото сконструюваного в NIST димової камери відповідно до специфікацій ANSI-UL 217-2012 [37]. Чутливість усіх димових сигналізаторів перевіряють в таких димових камерах перед експериментами в кімнаті

Отже, тестова димова камера в загальному (неспеціалізованому) випадку повинна забезпечувати:

- створення димового середовища з різними джерелами та параметрами диму, аналогічно як в реальній ситуації пожежі;
- вимірювання оптичної щільності диму;
- вимірювання часу до реакції детектора;
- вимірювання температури та вологості;
- вимірювання іонізаційною камерою (MIC) для опорних вимірювань;
- вміст CO, CO_2, HCN (необов’язково);

- розподіл часточок диму за розмірами (необов’язково);
- розсіяння світла (необов’язково).

5.3 Конструкція камери

Враховуючи вимоги UL 217, ДСТУ EN54-7 та досвід інших розробників, нами було сконструйовано та виготовлено камеру для тестування основних параметрів чутливості сенсорних елементів датчиків диму.

Конструкція камери ґрунтується на вимогах UL 217 (пункт 38.3.3 в [34]) з мінімальними корекціями. На Рисунку 32 приведено 3D-модель, креслення та габаритні розміри розробленої камери, а на Рисунку 33 – фото виготовленої камери з різних ракурсів.

Камера виготовлена з вологостійкої фанери (типу ФСФ) товщиною 18 мм. Додатково, елементи корпусу камери покриті водостійким лаком, а всередині – чорною фарбою для нівелювання впливу зовнішньої фонової засвітки на точність оптичного вимірювання оптичної густини диму.

Димова камера має двокамерну будову. Внутрішні розміри зовнішньої камери (Д×Ш×В) – 1.696×0.46×0.49 м. Внутрішні розміри внутрішньої камери – 1.060×0.292×0.46 м. Об’єм камери всередині становить 0.383 м^3. Оскільки камера має герметичну конструкцію, то без додаткового доступу кисню, за недостатньої кількості повітря окислюватиметься тільки частина горючої речовини і створюються умови для тління або неповного горіння, що сприяє інтенсивному димоутворенню без відкритого вогню. При такій конфігурації камера має два сполучені відділення, котрі утворюють димовий канал замкнутого типу (дим циркулює (проти годинникової стрілки) і густішає, доки сповіщувач не спрацює). Внутрішня (нижня) камера служить для перемішування нових доз диму. Обіг диму всередині відбувається проти годинникової стрілки завдяки роботі електровентилятора. Дим розбивається лопатями цього вентилятора. Частота обертання вентилятора підібрана такою, щоб швидкість потоку диму у верхній горизонтальній робочій секції камері, де встановлюється тестовий зразок, задовольняла стандартні умови UL 217.

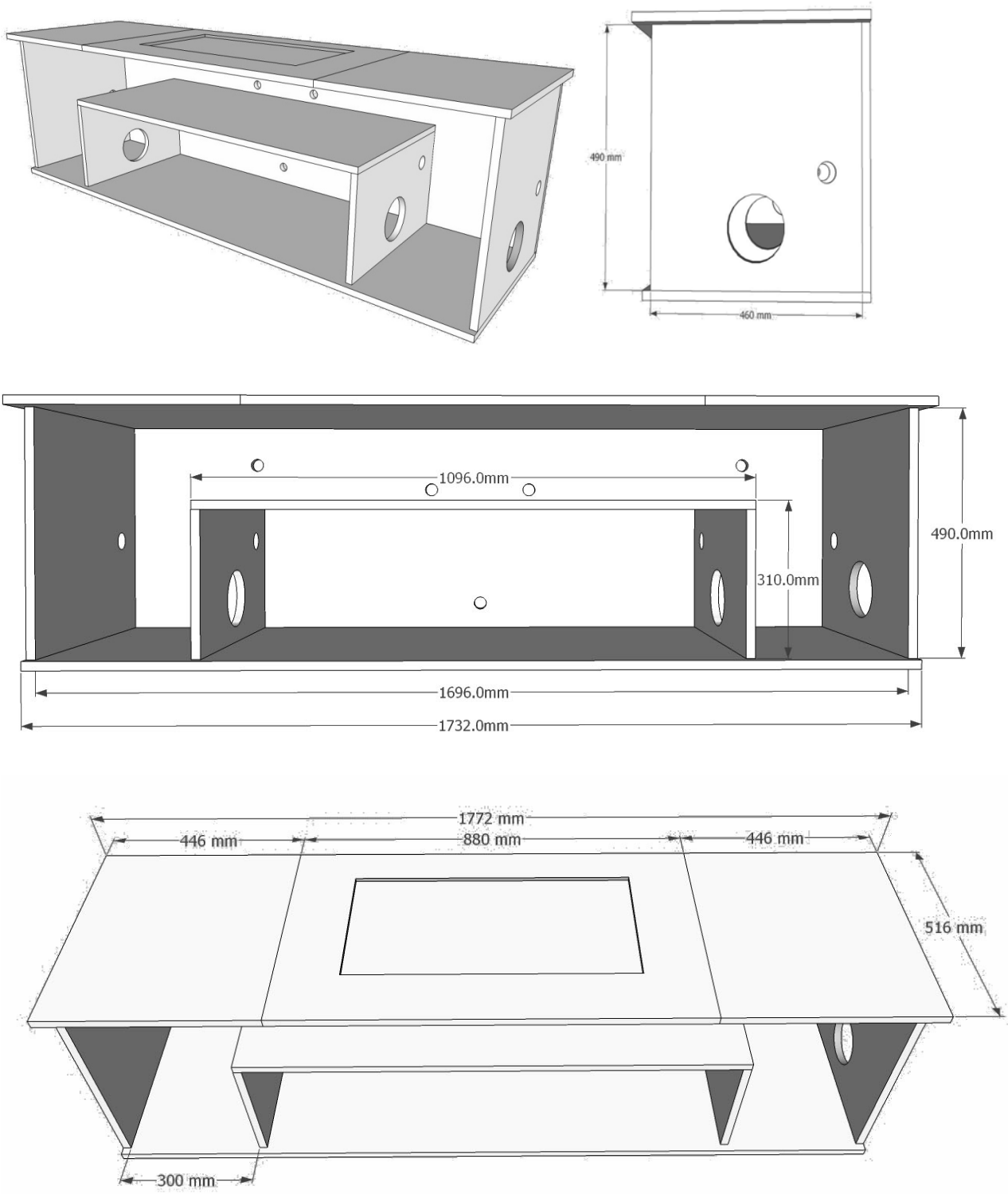


Рисунок 32 – Креслення та габаритні розміри розробленої в ІФН ім. В.Є.Лашкарьова при виконанні проекту НФДУ 2020.01/0348 (2020-2021 рр.) «Сенсор диму на основі плазмон-поляритонного фотодетектора» димової камери для дослідження чутливості та інших параметрів сенсорів диму. 3D-модель – зі знятою передньою стінкою

Рисунок 33 – Фотографії створеної камери

UL 217 нормує швидкість потоку в робочій частині камери на рівні 0.16±0.01 м/с, ДСТУ EN54-7 – 0.2±0.04 м/с. Горизонтальна робоча секція служить для розміщення тестових зразків – у ній температура і швидкість потоку відповідають необхідним умовам вимірювання. При потребі, передбачена можливість встановлення ще одного аналогічного вентилятора на виході внутрішньої камери та елементів підігріву поряд з димогенератором.

В лівій частині камери знаходиться генератор диму, побудований на основі нагрівача з ніхромового провідника максимальною потужністю 500 Вт, що живиться від 220 В. Також ліва бокова стінка камери містить отвір (закритий кришкою), в який, при потребі, можна запускати дим від зовнішнього генератора.

В правій боковій стінці зовнішньої камери знаходиться отвір, через який повністю або частково примусово (з допомогою зовнішнього витяжного вентилятора) відбувається вентилювання камери у випускну систему вентиляції.

Крізь усю довжину камери, завдяки 4-ом співвісним отворам, проходить шлях оптичного зондуючого променя оптичного вимірювача коефіцієнта пропускання диму. Максимальна довжина вимірювання обрана з міркувань, що для підвищення точності вимірювання дуже малих коефіцієнтів поглинання рекомендується брати максимальну товщину поглинаючого шару. Джерело випромінювання та фотоприймач монтуються у зовнішні стінки камери, щоб уникнути можливих температурних впливів від близькорозташованого нагрівача генератора диму та інших можливих чинників.

Камера містить кілька металевих елементів: два екрани-дефлектори з тонкої листової сталі та стільниковий випрямляч (гомогенізатор) потоку диму (довжина комірок значно більша за їх діаметр), котрий задає ламінарний, без турбулентностей, однорідний потік у верхній робочій горизонтальній секції камери, де розміщують датчики для тестування.

Передня стінка може зніматись для обслуговування внутрішнього об’єму та елементів камери. Верхня кришка з оглядовим вікном служить для швидкого доступу до датчиків для тестування і візуального контролю стану в камері.

5.4 Обладнання камери

Камера обладнана певним набором датчиків та сенсорів, котрі реєструють параметри середовища в камері в режимі реального часу, синхронно з тестуванням досліджуваних зразків:

- вимірювач оптичної густини (або коефіцієнта пропускання) диму, реалізований на основі лазерного світловипромінюючого діода, що працює в імпульсному режимі, та фотодіода. Спектральний діапазон чутливості кремнієвого фотодіода – 400-1100 нм, а як випромінювач на час наладки встановлено світловипромінюючий лазерний діод з видимою довжиною хвилі λ=650 нм. Довжина оптичного шляху променя в димовому середовищі становить 1696 мм;
- анемометр для вимірювання швидкості потоку газів в камері (використано анемометр Benetech GM8903, 0.1..30 м/с, 0..45°C);
- гігрометр (використано термогігрометр Benetech GM1361, 0..100%, комбінований з термопарою -10..50°C);
- додаткові сенсори температури, вологості, сумісні з платформою Arduino;
- тут може розміщуватись також і датчик на основі іонізаційної камери, який традиційно застосовують для порівняння чутливості, і будь-які комерційні серійні сигналізатори.

Внутрішні та зовнішні вентилятори і нагрівач живляться від мережі змінної напруги 220 В і керуються як в ручному, так і в автоматичному (програмно) режимах з допомогою семісторних діммерів.

Для виведення назовні сигнальних провідників та живлення вентиляторів передбачено кілька отворів в задній стінці камери.

Тестування має проводитись при таких умовах (пункт 38.4.1 [34]):

- температура T=23±3°C,
- відносна вологість RH=50±20%,
- атмосферний тиск P=760±30 мм Рт ст.

UL 217 нормує швидкість потоку в робочій частині камери на рівні 0.16±0.01 м/с, а ДСТУ EN54-7 – 0.2±0.04 м/с. Також є тест при підвищених швидкостях потоку в робочій частині камери: 0.76±0.01 м/с або 1.0±0.04 м/с, відповідно.

Вимірювання в димовій камері має фіксувати:

- Коефіцієнт пропускання світла,
- Час від початку тестування, синхронно з вимірами коефіцієнта пропускання світла,
- Дані з іонізаційної (MIC) камери.

ДСТУ EN 54-7:2004 містить Додаток С «Прилади для вимірювання концентрації диму» з означеннями вимірюваних оптичних параметрів диму. Всі вимірювання чутливості детекторів диму повинні супроводжуватись вимірюваннями оптичної щільності диму в режимі реального часу. Оптична щільність диму:

$$M=10/d \lg(I_0/I_{sm}), \quad (3)$$

де: d – довжина шляху променя, I_0 та I_{sm} – інтесивність випромінювання на фотоприймачі за відсутності диму та в димовому середовищі, відповідно. Звідси випливає, що оптична щільність диму M зростає від нуля разом з концентрацією диму і має розмірність дБ/м.

Мінімальний поріг спрацювання сигналізатора $M_{min} = 0.4$ dB/м.
Умова закінчення випробування – досягнення $M_{max} = 2$ dB/м.
Співвідношення $M_{max} : M_{min}$ не повинно перевищувати 1.6

Стандарт UL 217 дозволяє оперувати одним з кількох взаємопов’язаних параметром щільності диму:

а) obscuration (затемнення; потемніння) променя світла на одиницю довжини

$$O = (1-(I_{sm}/I_0)/d) \times 100 = (1-T_{sm}) \times 100 \quad [\%], \quad (4)$$

де: d – довжина шляху променя, I_0 та I_{sm} – інтесивність випромінювання на фотоприймачі за відсутності диму та в димовому середовищі.

b) obscuration (затемнення; потемнення) променя світла для довільної відстані

$$O_t = (1-I_{sm}/I_0) \times 100 \quad [\%], \tag{5}$$

де: I_0 та I_{sm} – інтесивність випромінювання на фотоприймачі за відсутності диму та в димовому середовищі.

c) коефіцієнт пропускання світла для будь-якої довжини оптичного шляху:

$$T_t = (I_{sm}/I_0) \times 100 \quad [\%], \tag{6}$$

де: I_0 та I_{sm} – інтесивність випромінювання на фотоприймачі за відсутності диму та в димовому середовищі.

e) для будь-якої довільної відстані оптична густина диму

$$OD_t = \lg(I_0/I_{sm}) = \lg(1/T_{sm}), \tag{7}$$

де: I_0 та I_{sm} – інтесивність випромінювання на фотоприймачі за відсутності диму та в димовому середовищі.

f) для будь-якої відстані оптична густина диму на одиницю довжини

$$OD = 1/d \ \lg(I_0/I_{sm}), \tag{8}$$

де: d – довжина шляху променя, I_0 та I_{sm} – інтесивність випромінювання на фотоприймачі за відсутності диму та в димовому середовищі.

Згідно зі стандартом UL 217, спрацювання димового сигналізатора має відбуватись при ослабленні пропускання світла димом:

для сірого диму:

не раніше за $O = 1.6$ %/м = 0.0072 OD/м,

не вище за $O = 12.5$ %/м = 0.0581 OD/м,

для чорного диму:

не раніше за O = 1.6 %/м = 0.0072 OD/м,

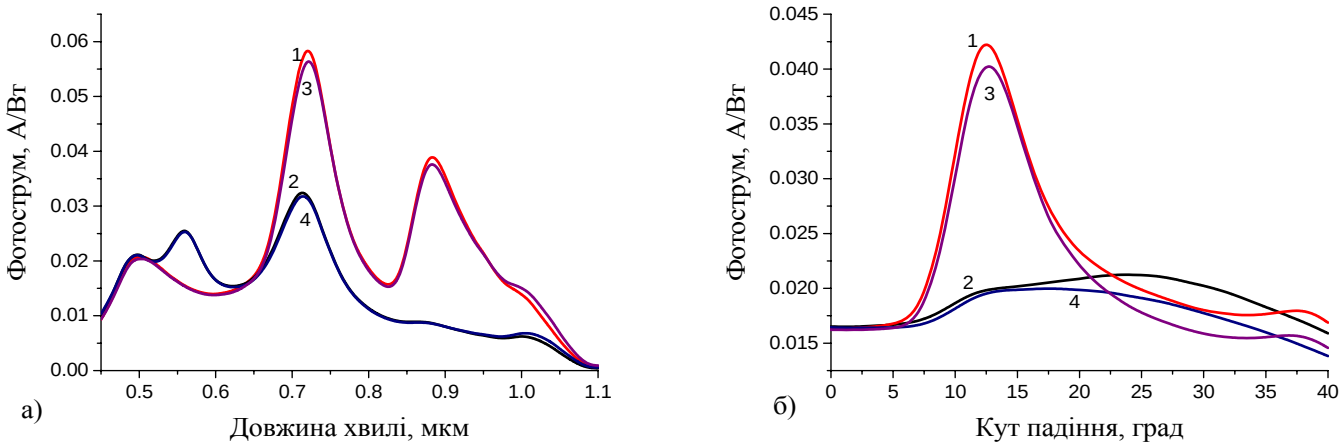
не вище за O = 36.71 %/м = 0.198 OD/м,

Максимальний прийнятний рівень для спрацювання детектора становить 0.088 OD/m

6. Проведення тестових випробувань сенсора диму на основі ППФД

6.1 Вплив вологості на фотострум ППФД

Для оцінки впливу вологості на сенсори диму на основі ППФД, зразок на основі ДҐ з періодом 800 нм був розміщений в закритому герметичному об’ємі скляного прозорого циліндра, через який освітлювався модульованим монохроматизованим світлом по схемі, приведеній в [12]. Фотострум вимірювався з допомогою розробленої і приведеної в параграфі 4.2 електронної схеми. Температура навколишнього середовища була 20^{o}C, відносна вологість 30%. Виміряні спектри та кутові залежності фотоструму представлені на Рисунку 34. ПППР у фотострумі спостерігається в даному випадку в *p*-поляризації, в області довжин хвиль 720 та 900 нм, для +1 та -1 порядку дифракції, відповідно. Після цього в об’єм, де знаходився, сенсор введено воду. Після 10 хвилин витримки, коли встановилась 100% вологість, були виміряні спектральні (при куті падіння світла 6 кутових градусів) та кутові (на довжині хвилі 650 нм) залежності фотоструму при максимально можливій вологості 100% (до випадіння роси). Видно, що резонанс зсунувся зовсім незначно, в довгохвилеву область спектра, і в сторону більших кутів, відповідно на <0.5 нм та <0.2 кутових градуса, що пов’язано з більшим показником заломлення вологого повітря в порівнянні із сухим повітрям.

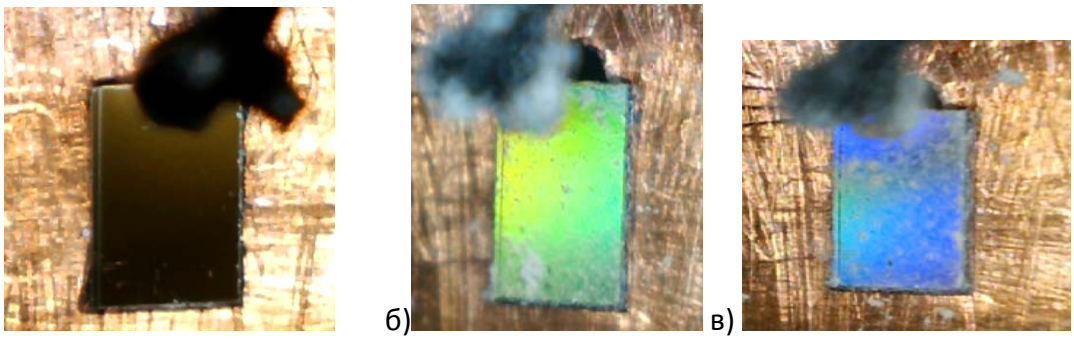


а) б)

Рисунок 34 – Спектральні (при куті падіння світла 6 кутових градусів) (а) та кутові (на довжині хвилі 650 нм) (б) залежності фотоструму ППФД на основі ДҐ з періодом 800 нм при 30% (1,2) та 100% (3,4) вологості повітря, в *p*- (1,3) та *s*- (2,4) поляризаціях світла

6.2 Вплив пилу на фотострум ППФД

Для оцінки впливу пилу на сенсори диму на основі ППФД, зразок на основі ДҐ з періодом 800 нм був розміщений в закритому герметичному об'ємі камери об'ємом 0.1 м^3, де згідно рекомендацій [34], було розпилено 60 г цементної суміші, що підтримувалась у розпиленому стані упродовж 15 і 30 хвилин з допомогою вентиляторів. Фото поверхні зразка до випробувань, після 15 та 30 хвилин витримки в таких умовах представлені на Рисунку 35. Видно, що пил суттєво покриває площу зразка, і при довшій експозиції його стає більше.



а) б) в)

Рисунок 35 - Фото поверхні зразка ППФД з періодом 800 нм до тестів з пилом (а), після перебування в камері з пилом упродовж 15 хв (б) та 30 хв (в).

На Рисунку 36 представлені спектральні (при куті падіння світла 6 кутових градусів) та кутові (на довжині хвилі 650 нм) залежності фотоструму. Видно що ні спектральне, ні кутове положення резонансу фотоструму НЕ ЗМІНИЛОСЬ. Змінилась тільки амплітуда, що є наслідком затінення частини зразка пилом. Таким чином, ми робимо висновок, що гіпотеза, яка лежала в основі проєкту, підтвердилась. Частинки пилу занадто великі, щоб наблизитись до поверхні зразка (до того ж, рельєфного) на відстань порядку довжини хвилі і суттєво впливати на збудження і поширення ППХ.

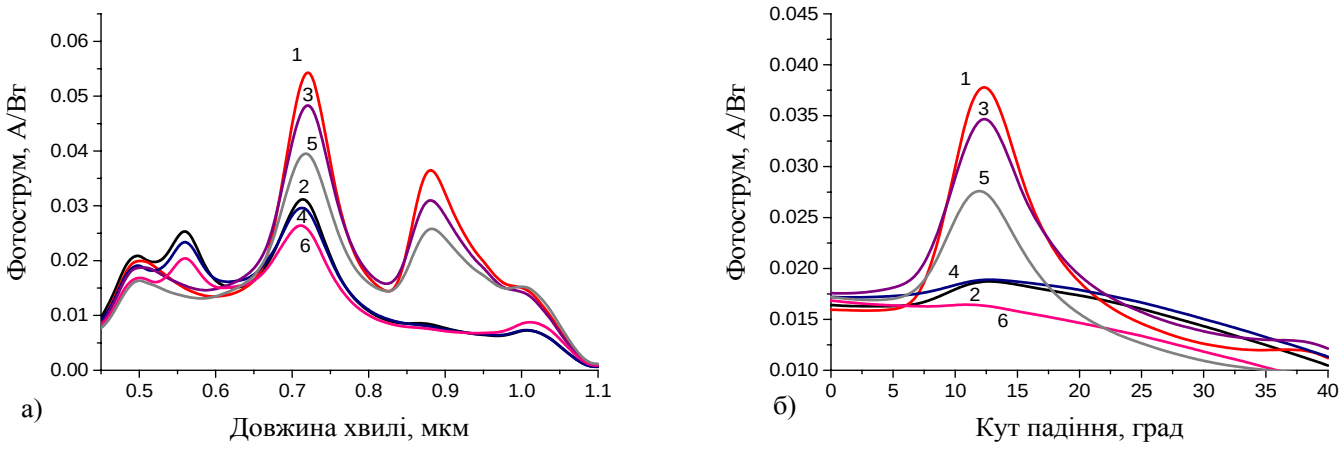


Рисунок 36 – Спектральні (при куті падіння світла 6 кутових градусів) (а) та кутові (на довжині хвилі 650 нм) (б) залежності фотоструму ППФД на основі ДҐ з періодом 800 нм з чистою поверхнею (1,2), після 15 (3,4) та 30 (5,6) хвилин перебування в камері з пилом в *p*- (1,3,5) та *s*- (2,4,6) поляризації світла

6.3 Проведення тестових випробувань з використанням різного типу джерел диму

Тестові випробування сенсорів на основі ППФД з ДҐ 1200 нм та 800 нм відкритого типу або вмонтовані в камери, що зображені на Рисунках 26, 27, проводились на розробленому стенді для випробувань, зображеному на Рисунках 32, 33. В ході тестів підтримувались і контролювались такі параметри:

- температура T=20°C;

- відносна вологість RH=40%;
- швидкість потоку диму 0.2 м/с;
- реєструвалась оптична густина диму по оптичному датчику згідно формули (8).

Згідно стандарту UL217 спрацювання датчика диму має відбутись на протязі 2 хвилин при перевищені оптичної густини диму O = 1.6%/м. Для нашого стенду при умові, що дим від деревини, тканини та цигарок є сірий, це відповідає зменшенню пропускання T зі 100% до величини меншої $T_м = 10^{-(0.016 \cdot 1.669)} = 94.036\%$. Тому наступні тести відбувались в такій послідовності. В пічку завантажувалась навіска матеріалу для генерації диму, встановлювались сенсори на стенд, який герметично закривався, вимірювались температура, вологість, встановлювалась швидкість потоку через швидкість обертання вентилятора. Далі вмикалась пічка, починав генеруватись дим і після досягнення коефіцієнта пропускання світла в камері 94%, сенсори витримувались на протязі 2 хвилин. Далі все вимикалось, дим з димової камери інтенсивно (примусово, відповідним вентилятором) витягувався у витяжку, зразки виймались і переносили в установку для вимірювання спектральних і кутових характеристик фотоструму, представлених на Рисунках 37-42.

6.3.1 ППФД на основі ґратки з періодом 1200 нм

Рисунки 37-39 показують зміщення спектрально-кутового положення резонансу фотоструму внаслідок осідання частинок диму на поверхню ППФД з ДҐ з періодом 1200 нм. Для даної ДҐ найбільш інтенсивно відбувається збудження ПППР для +1 порядку дифракції, що для даного кута падіння світла 15° знаходиться в околі 900 нм.

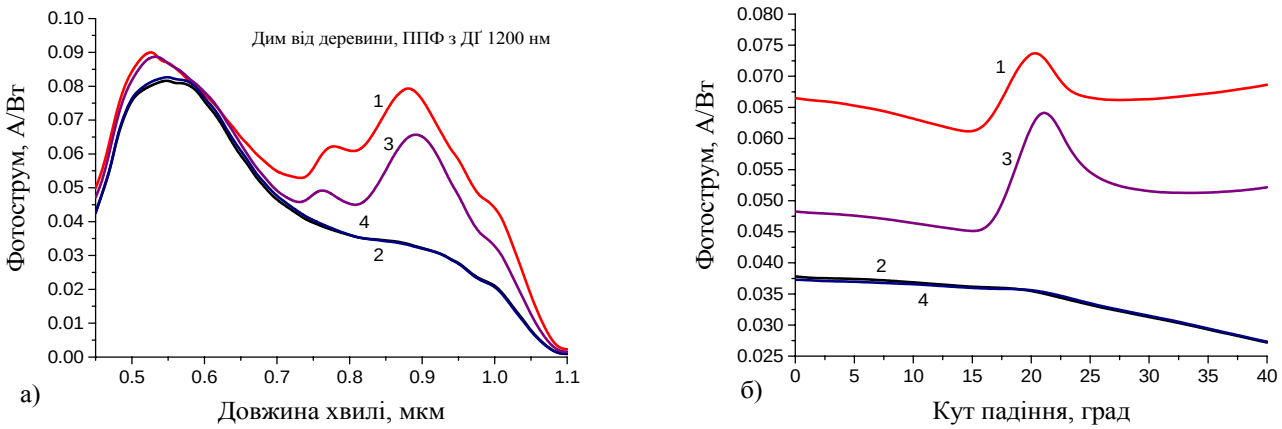


Рисунок 37 – Спектральні (при куті падіння світла 15 кутових градусів) (а) та кутові (на довжині хвилі 800 нм) (б) залежності фотоструму ППФД на основі ДҐ з періодом 1200 нм з чистою поверхнею (1,2), та після перебуванні в камері з димом від деревини (3,4) в р- (1,3) та s- (2,4) поляризації світла

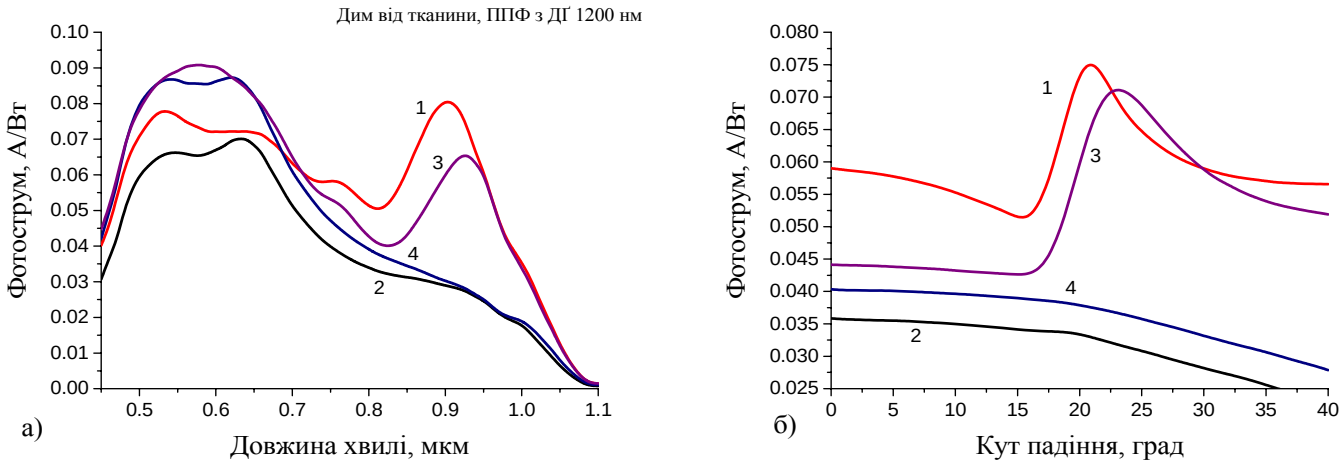


Рисунок 38 – Спектральні (при куті падіння світла 15 кутових градусів) (а) та кутові (на довжині хвилі 800 нм) (б) залежності фотоструму ППФД на основі ДҐ з періодом 1200 нм з чистою поверхнею (1,2), та після перебуванні в камері з димом від тканини (3,4) в р- (1,3) та s- (2,4) поляризації світла

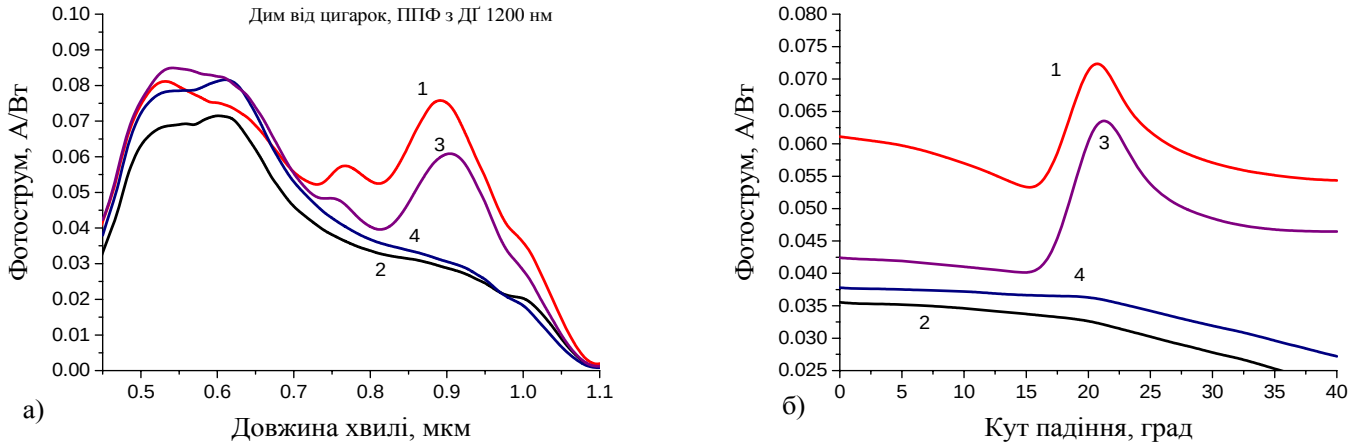


Рисунок 39 – Спектральні (при куті падіння світла 15 кутових градусів) (а) та кутові (на довжині хвилі 800 нм) (б) залежності фотоструму ППФД на основі ДҐ з періодом 1200 нм з чистою поверхнею (1,2), та після перебуванні в камері з димом від цигарок (3,4) в p- (1,3) та s- (2,4) поляризації світла

6.3.2 ППФД на основі ґратки з періодом 800 нм

Рисунки 39-42 показують зміщення спектрально-кутового положення резонансу фотоструму внаслідок осідання частинок диму на поверхню ППФД з ДҐ 800 нм. Для цієї ДҐ найбільш інтенсивно відбувається збудження ППР для двох порядків дифракції +1го та -1го, що для даного кута падіння світла 6° знаходиться в околі 750 та 900 нм. Значення зсуву резонансу наведені в Таблиці 5.

Таблиця 5 – Величина зсуву резонансу фотоструму ППФД під дією диму

Джерело диму	ППФД на основі ДҐ 1200 нм		ППФД на основі ДҐ 800 нм	
	Зсув довжини хвилі, нм	Зсув кута, град	Зсув довжини хвилі, нм	Зсув кута, град
Деревина	11	0.7	9	1.2
Тканина	24	2.3	27	5.1
Цигарки	13.5	0.7	25	3.5

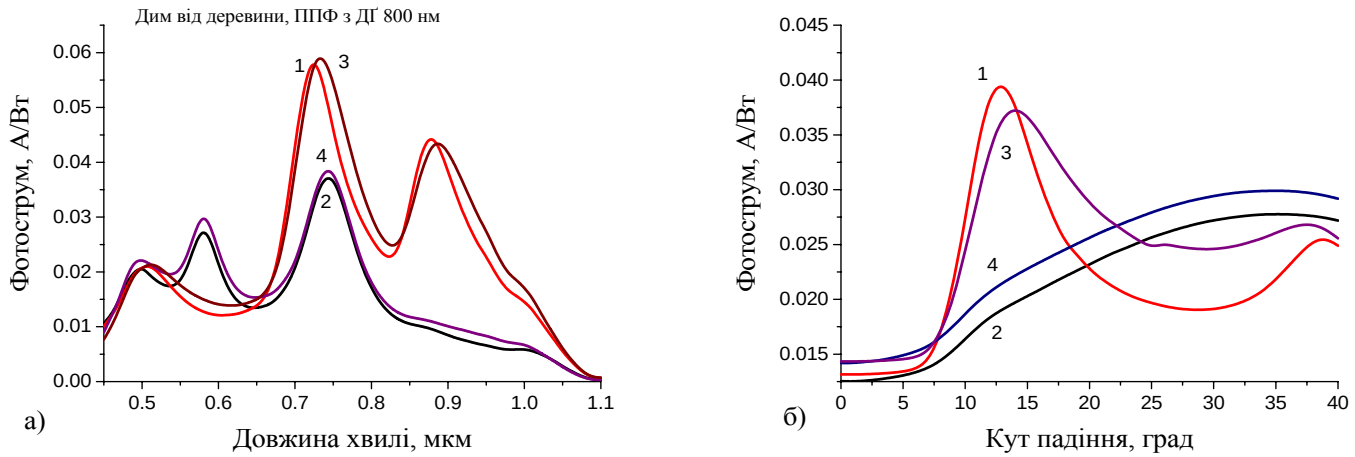


Рисунок 40 – Спектральні (при куті падіння світла 6 кутових градусів) (а) та кутові (на довжині хвилі 650 нм) (б) залежності фотоструму ППФД на основі ДҐ з періодом 800 нм з чистою поверхнею (1,2), та після перебуванні в камері з димом від деревини (3,4) в *p*- (1,3) та *s*- (2,4) поляризації світла

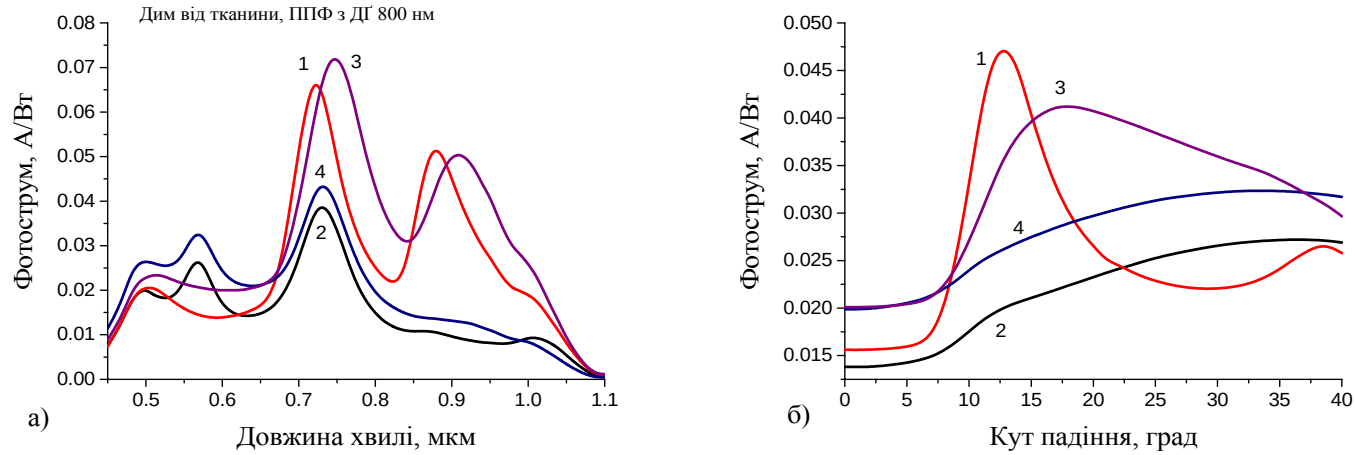


Рисунок 41 – Спектральні (при куті падіння світла 6 кутових градусів) (а) та кутові (на довжині хвилі 650 нм) (б) залежності фотоструму ППФД на основі ДҐ з періодом 800 нм з чистою поверхнею (1,2), та після перебуванні в камері з димом від тканини (3,4) в *p*- (1,3) та *s*- (2,4) поляризації світла

Дим від різних джерел призводить до різного ступеня зміщення, що очевидно пов`язано із його складом. Серед протестованих джерел найвище зміщення отримано для диму від тканини, найменше - від деревини. Підсумовуючи спостереження для ППФД з ДҐ 1200 та 800 нм, можна сказати, що дим від усіх

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 ППФД. Найбільшу чутливість до диму виявили ППФД на основі ДҐ з періодом 800 нм.

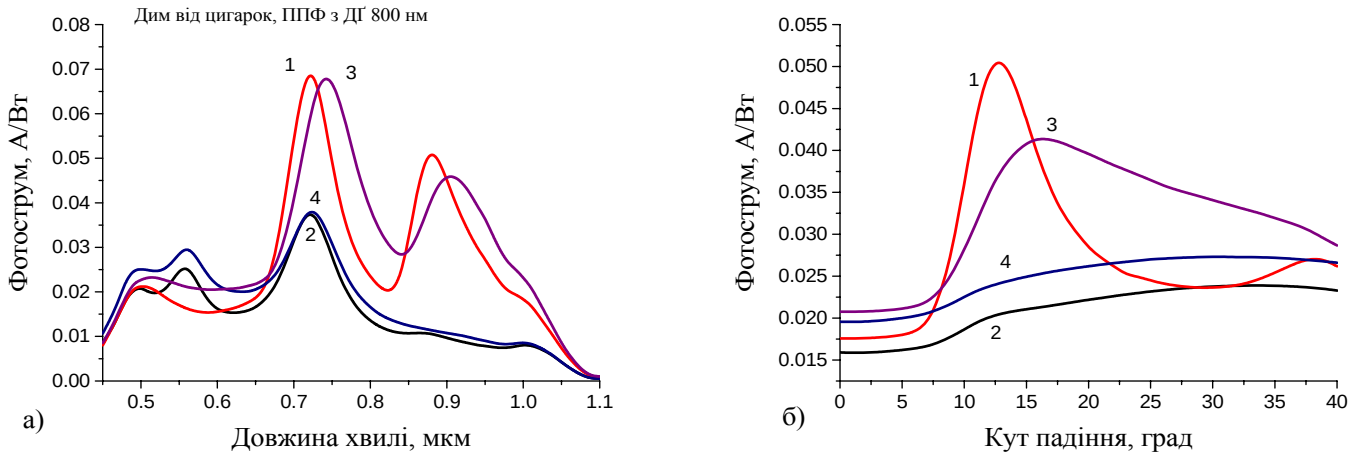


Рисунок 42 – Спектральні (при куті падіння світла 6 кутових градусів) (а) та кутові (на довжині хвилі 650 нм) (б) залежності фотоструму ППФД на основі ДҐ з періодом 800 нм з чистою поверхнею (1,2), та після перебуванні в камері з димом від цигарок (3,4) в *p*- (1,3) та *s*- (2,4) поляризації світла

Висновки

Проведено чисельне моделювання резонансних характеристик ППФД для випадку контакту з середовищем з малим (n~1) показником заломлення. Було отримано, що для збудження ПППР на довжині хвилі максимального резонансу для золотої плівки, що визначається спектральним положенням максимуму відношення дійсної частини діелектричної проникності до її уявної частини і складає ~800 нм, при куті падіння світла 20° період дифракційної ґратки має бути ~1200 нм, а глибина її модуляції 75 нм. Для отримання резонансу при кутах

падіння світла близьких до нормального, період має бути ~800 нм. Товщина золотої плівки має бути в середньому 45 нм.

Виготовлено ППФД на основі Si з використанням технології інтерференційної фотолітографії з хорошими оптоелектричними та електрофізичними характеристиками. Досліджено їх поверхню методами скануючої електронної та атомно-силової мікроскопії та отримано морфологічні параметри виготовлених дифракційних ґраток, що підтвердили отримання їх запланованих характеристик: період 1.2 мкм та 0.8 мкм. Глибина модуляції при цьому склала 100-130 нм. Виміряні спектрально-кутові залежності фотоструму у видимому та ближньому ІЧ діапазонах в околі плазмон-поляритонного резонансу. Резонанс фотоструму може бути налаштований на спектрально-кутовий діапазон від 0.6 до 1.1 мкм та від 0 до 30°. Досягнуто величину поляризаційної чутливості I_p/I_s від 3 до 5, абсолютне значення фоточутливості сягає 0.1 А/Вт, спектральна та кутова півширина резонансу від 100 до 200 нм та від 5 до 10°, відповідно. Проведена всебічна характеризація електрофізичних властивостей ППФД. Методами ВАХ та ВФХ характеристик визначені висота бар'єру φ_b=0.4 ÷ 0.5 еВ, параметр неідеальності n від 2 до 3.

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

Розроблено і виготовлено стенд для випробувань чутливості та часу реакції сенсорів диму різного типу, в тім числі і на основі ППФД. Проведено випробування на стенді з використанням різних джерел диму: деревини, тканини та цигарок і отримано, що 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 резонансу фотоструму в сторону більших довжин хвиль і більших кутів, що становить експериментально-

доведену фізичну основу для побудови датчиків диму на основі розроблених ППФД. Ступінь цього зміщення різна для різних типів диму.

Проведено тестування в умовах підвищеної вологості (100%). Показано, що максимально можлива вологість (до випадіння 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 ППФД.

Рекомендації щодо використання розробленого ППФД сенсора у відповідних датчиках диму

Розроблені і виготовлені сенсори диму на основі ППФД показали хорошу чутливість до диму від різних джерел, який суттєво змінює спектрально-кутове положення поверхневого плазмон-поляритонного резонансу. Натомість, наявність пилу навіть на поверхні описаного сенсора не змінює спектральне чи кутове положення, а підвищена вологість змінює його мінімально (ймовірно, за рахунок зміни дисперсності колоїдних частинок диму), в кілька десятків разів менше, ніж ефект від диму.

Але, як і будь який фотодетектор, абсолютна величина його фотоструму буде залежати і від ефектів затінення від пилу. Тому, при конструюванні датчиків диму на основі ППФД треба орієнтуватись на виміри відносних величин фотоструму.

Наприклад, можна організувати виміри фотоструму ППФД при освітленні з двох напрямків під різними кутами падіння світла на поверхню ППФД так, щоб на відповідній однаковій довжині хвилі, вони попадали на правий і лівий схили резонансу кутової залежності фотоструму. Тоді відношення цих фотострумів не буде залежати від затінення, бо воно однаково впливатиме на ці два канали.

Натомість зсув резонансу внаслідок наявності диму змінить співвідношення фотострумів, що викликатиме сигнал тривоги.

Можна розробити систему, що використовуватиме два джерела світла – з трохи різними довжинами хвилі, що освітлюють ППФД під однаковим кутом так, щоб вони попадали на правий і лівий схили резонансу спектральної залежності фотоструму. Наприклад, два світлодіода з випромінюванням 950 нм та 850 нм, для ґратки з періодом 1200 нм під кутом до падіння світла 15 градусів. Відповідне зміщення резонансу також буде змінювати співвідношення фотострумів.

ППФД показав слабку залежність до вологи у повітрі, але випадіння роси на поверхню суттєво вплине на положення резонансу. В цьому разі необхідно підтримувати температуру ППФД вищою від температури оточення всього на кілька градусів, що досить легко зробити, пропускаючи постійний струм крізь ППФД, а виміри фотоструму проводити на змінному струмі, модулюючи світловий промінь. Цей підхід можна застосувати і для очищення поверхні ППФД від летких компонентів, що осіли під час експлуатації датчика.

Перелік наукових праць, виданих за темою дослідження під час виконання проєкту.

Патенти

1. Патент 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.
2. Заявка на отримання патенту України на винахід (№ a202107072 від 10.12.2021) МПК (2019.01) G01N21/55. Спосіб виготовлення плазмон-поляритонного фотодетектора на основі *n-p* переходу в кремнії / **Мамикін С.В., Штикало О.В., Минько В.І.,** Душейко М.Г., **Кондратенко О.С., Мамонтова І.Б.**, Романюк В.Р.

Статті

3. Gnilitskyi, **S.V. Mamykin**, C. Lanara, I. Hevko, M. Dusheyko, S. Bellucci, E. Stratakis, Laser Nanostructuring for Diffraction Grating Based Surface Plasmon-Resonance Sensors // *Nanomaterials*.- 2021. - V. 11. - p.591. https://doi.org/10.3390/nano11030591 Q1, IF=5.076
4. **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

Матеріали конференцій

5. Штикало О.В., Семікіна Т.В., Мамикін 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.
6. Штикало О.В., Семікіна Т.В., Мамикін 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.

Перелік джерел посилання

1. Husted B. P. Optical smoke units and smoke potential of different products // DIFT report. – 2004. – Т. 1.
2. Thuillard M. The development of algorithms for a smoke detector with neuro-fuzzy logic // Fuzzy sets and systems. – 1996. – Т. 77, № 2. – С. 117-124.
3. Mukherjee A., Nag A., Sadhukhan P., Ghosh R. K., Mandal S., Satyarth S., Das R., Hamim J., Mukherjee A. Development of a Smoke Detector // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2019. – Т. 9, № 6. – С. 140-144.
4. Fleming J. M. Photoelectric and Ionization Detectors–A Review of The Literature Re–Visited // Retrieved December. – 2004. – Т. 31. – С. 2010.
5. Smoke Detector Sensitivity testing: Siemens and Canadian Fire Alarm AssociationArchived. http://www.cfaa.ca/Files/flash/EDUC/FIRE%20ALARM%20ARTICLES%20AND%20RESEARCH/SMOKE_DETECTOR_SENSITIVITY.pdf //.
6. Kruell W., Schultze T., Tobera R., Willms I. Analysis of dust properties to solve the complex problem of non-fire sensitivity testing of optical smoke detectors // Procedia Engineering. – 2013. – Т. 62. – С. 859-867.
7. Горн В. Ю., Потетюнин С. В. ПОЖАРНЫЙ ДЫМОВОЙ ИЗВЕЩАТЕЛЬ // патент Российской Федерации № 2417450, опуб. 27.04.2011 г.
8. Fonollosa J., Solórzano A., Marco S. Chemical sensor systems and associated algorithms for fire detection: A review // Sensors. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 553.
9. Gottuk D. T., Peatross M. J., Roby R. J., Beyler C. L. Advanced fire detection using multi-signature alarm algorithms // Fire Safety Journal. – 2002. – Т. 37, № 4. – С. 381-394.
10. Г.В.Дорожинський, В.П.Маслов, Н.В.Качур, Р.Л.Філончук. Багатоканальний детектор задимленості // Патент України на корисну модель, Бюл.№. – 2014. – Т. 14, № u201400277.

11. Korovin A. V., Dmitruk N. L., Mamykin S. V., Myn'ko V. I., Sosnova M. V. Enhanced Dielectric Environment Sensitivity of Surface Plasmon-Polariton in the Surface-Barrier Heterostructures Based on Corrugated Thin Metal Films with Quasi-Anticorrelated Interfaces // Nanoscale Research Letters. – 2017. – Т. 12, № 1.
12. Dan'ko V., Dmitruk M., Indutnyi I., Mamykin S., Myn'ko V., Shepeliavyi P., Lukaniuk M., Lytvyn P. Au Gratings Fabricated by Interference Lithography for Experimental Study of Localized and Propagating Surface Plasmons // Nanoscale Research Letters. – 2017. – Т. 12, № 1.
13. Gnilitskyi I., Mamykin S. V., Lanara C., Hevko I., Dusheyko M., Bellucci S., Stratakis E. Laser nanostructuring for diffraction grating based surface plasmon-resonance sensors // Nanomaterials. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 591.
14. Dmitruk N. L., Mayeva O. I., Mamykin S. V., Yastrubchak O. B., Klopfleisch M. Using spectroellipsometry to examine multilayer gratings for sensors and photodetectors. – Т. 2 –, 2000. – С. 389-392.
15. Dan'ко V. A., Indutnyi I. Z., Myn'ко V. I., Mamykin S. V., Ye. Shepeliavyi P., Lukaniuk M. V., Lytvyn P. M. Control of plasmons excitation by p- and s-polarized light in gold nanowire gratings by azimuthal angle variation // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 353-360.
16. Gnilitskyi I., Mamykin S., Dusheyko M., Borodinova T., Maksimchuk N., Orazi L. Diffraction gratings prepared by HR-LIPSS for new surface plasmon-polariton photodetectors and Sensors 10.1364/fio.2016.jw4a.88 –OSA - The Optical Society, 2016.
17. Физика полупроводниковых приборов. / Зи С., 1984.
18. Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках. / Дмитрук Н. Л., Литовченко В. Г., Стрижевский В. Л.: Наукова думка, 1989.
19. Dmitruk N. L., Korovin A. V., Mamykin S. V., Sosnova M. V., Venger E. F. Comparison between the efficiencies of surface plasmon polariton excitation by the methods of relief - Phase diffraction grating and attenuated total reflection prism // Ukrainian Journal of Physics. – 2009. – Т. 54, № 6. – С. 559-569.

20. Chandezon J., Dupuis M., Cornet G., Maystre D. Multicoated gratings: a differential formalism applicable in the entire optical region // JOSA. – 1982. – Т. 72, № 7. – С. 839-846.
21. Mamykin S., Gnilitskyi I., Dusheyko M., DeVol T., Bliznyuk V. Femtosecond laser nano-structuring for surface plasmon resonance-based detection of uranium // Applied Surface Science. – 2021. – С. 151831.
22. Штикало О. В., Семікіна Т. В., Мамикін 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. – 2021. – С. 31-32 . ISBN 978-966-02-9603-9.
23. Мамикін С.В., Штикало О.В., Минько В.І., Душейко М.Г., Кондратенко О.С., Мамонтова І.Б., Романюк В.Р. Спосіб виготовлення плазмон-поляритонного фотодетектора на основі n-p переходу в кремнії // Заявка на отримання патенту України на винахід (№ a202107072 від 10.12.2021) МПК (2019.01) G01N21/55.
24. Штикало О. В., Семікіна Т. В., Мамикін 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. – 2021.
25. С. В. Мамикін О. В. Ш., В. І.Минько, О.С.Кондратенко, І.Б.Мамонтова, В.Р.Романюк. . Спосіб реєстрації резонансу в плазмон-поляритонних фотодетекторах // Патент на корисну модель №148155 від 14.07.2021, Бюл. №28. Україна, МПК (2019.01) G01N21/55. https://sis.ukrpatent.org. Ідентифікатор електронного примірника 0221120721. – 2021.
26. Булат П. В., Волобуев И. А. Оптический датчик дыма //. – 2018.
27. Барышников Н. В., Бокшанский В. Б., Вязовых М. В., Животовский И. В., Карасик В. Е., Сахаров А. А., Мухина Е. Е. Оптический датчик дыма //. – 2017.
28. Васильева Е. Д., Рубашкин Ю. А., Щеглов С. А., Назаров Е. В., Фадеев А. Ю. Оптический датчик дыма //. – 2010.

29. Machado F., Malpica N., Borromeo S. Parametric CAD modeling for open source scientific hardware: Comparing OpenSCAD and FreeCAD Python scripts // Plos one. – 2019. – Т. 14, № 12. – С. e0225795.
30. Asparuhova K., Shehova D., Lyubomirov S. Using Proteus to support engineering student learning: microcontroller-driven sensors case study // 2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics-ET –IEEE, 2018. – С. 1-4.
31. Cao H., Ma Y., Li N. Design and Simulation of Single-Chip Microcontroller System Based on Proteus // Journal of Liaoning Institute of Technology. – 2007. – Т. 27. – С. 238-241.
32. Чекман И. С., Сыровая А. О., Андреева С. В., Макаров В. А. Аэрозоли–дисперсные системы // Book Аэрозоли–дисперсные системы / Editor, 2013.
33. https://www.ul.com/about/history. //.
34. UL217. - Single and Multiple Station Smoke Alarms. // Underwriters Laboratories. Inc., Northbrook, IL, 60062.
35. ДСТУ_EN54-7-2004. «Системи пожежної сигналізації» // Держспоживстандарт України. Київ. http://specteh.org.ua/images/stories/normativnye_dokumenty/26_dstu_en_547-13-2004_sistemi_pozhezhno_signalzac.pdf.
36. Litton C. D. Laboratory evaluation of smoke detectors for use in underground mines // Fire safety journal. – 2009. – Т. 44, № 3. – С. 387-393.
37. Cleary T. G. A Study on the Performance of Current Smoke Alarms to the New Fire and Nuisance Tests Prescribed in ANSI/UL 217 8th Ed // https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1947. – 2016.

Додаток 1
Спосіб реєстрації резонансу в плазмон-поляритонних фотодетекторах

Реферат

Спосіб реєстрації резонансу в плазмон-поляритонних фотодетекторах (ППФД) належить до методів реєстрації плазмон-поляритонного резонансу в оптоелектронних пристроях, побудованих на основі використання ефекту збудження поверхневої плазмон-поляритонної хвилі. Спосіб полягає у вимірюванні спектральної або кутової залежності фотоструму в околі плазмон-поляритонного резонансу та його нормуванні (діленні) на інтенсивність освітлення ППФД з допомогою мікроконтроллера, що містить аналогово-цифровий перетворювач або іншого аналогового чи цифрового пристрою з опорним каналом, який для вимірювання інтенсивності освітлення ППФД використовує світло, відбите від поверхні ППФД, а не світло (або його частину) безпосередньо від освітлювача. При цьому опорний сигнал освітлення ППФД подається на опорний канал аналогово-цифровий перетворювача мікроконтроллера або іншого аналогового чи цифрового пристрою для обробки сигналу. Результат ділення сигналу фотоструму на опорний сигнал збільшується як внаслідок збільшення фотоструму в умовах плазмон-поляритонного резонансу, так і внаслідок зменшення опорного сигналу інтенсивності відбитого світла від поверхні ППФД в умовах плазмон-поляритонного резонансу. Результат такого методу вимірювання резонансу пропорційний квадрату інтенсивності величини резонансу при вимірюванні в стандартних умовах, коли опорна інтенсивність світла отримується безпосередньо від освітлювача ППФД. Це значно підсилює інтенсивність сигналу в резонансі при зменшенні його півширини, що є важливим при використанні таких ППФД як основи для побудови сенсорів різноманітного призначення.

Формула корисної моделі

1. Спосіб реєстрації резонансу в плазмон-поляритонних фотодетекторах (ППФД), що полягає у вимірюванні спектральної або кутової залежності фотоструму в околі плазмон-поляритонного резонансу та його нормуванні (діленні) на інтенсивність освітлення ППФД з допомогою мікроконтролера, що містить аналогово-цифровий перетворювач, або іншого аналогового чи цифрового пристрою з опорним каналом, **який відрізняється тим,** що для вимірювання інтенсивності освітлення ППФД використовується світло, відбите від поверхні ППФД.

2. Спосіб реєстрації резонансу в ППФД за п. 1, **який відрізняється тим,** що сигнал фотоструму з опорного фотодетектора, що реєструє відбите від ППФД світло, подається на опорний канал аналогово-цифрового перетворювача мікроконтролера або іншого аналогового чи цифрового пристрою для обробки сигналу.

3. Спосіб реєстрації резонансу в ППФД за п. 1, **який відрізняється тим,** що аналогово-цифровий перетворювач здійснює процес ділення сигналу фотоструму від ППФД на сигнал фотоструму опорного фотодетектора і видає цифровий код для обробки в мікроконтролері.

Опис

МПК (2006) G01N21/55

Спосіб реєстрації резонансу в плазмон-поляритонних фотодетекторах

Корисна модель належить до методів реєстрації поверхневого плазмон-поляритонного резонансу (ППРП) в оптоелектронних пристроях, побудованих на основі явища збудження поверхневої плазмон-поляритонної хвилі (ППРХ). Запропонований спосіб детектуваня резонансу може знайти застосування при побудові сенсорів на основі плазмон-поляритонних фотодетекторів (ППФД) для промисловості, медицини, охорони навколишнього середовища.

Найближчим аналогом корисної моделі є спосіб детектування резонансу в поляризаційно-чутливих ППФД на основі бар'єра Шотткі (патент UA № 103379, G01N21/55), який складається з поверхнево-бар'єрної гетеростуктури, а саме напівпровідникової підкладки, на яку нанесено шар металу, що має періодично-профільовану межу поділу метал/повітря у вигляді дифракційної ґратки, який відрізняється тим, що напівпровідникова підкладка є плоскою, а для формування періодично-профільованого рельєфу на межі поділу метал/повітря використовується багатошарова структура на основі шару металу та нанодротів халькогенідного напівпровідника, яка має антикорельований рельєф, коли профілі інтерфейсів метал/напівпровідник та метал/повітря, зсунуті на половину періода, тому її товщина є періодичною функцією планарної координати з періодом, що дорівнює періоду дифракційної ґратки. За допомогою ППФД у видимому спектральному діапазоні (0,5-0,8 мкм) досягається підвищення чутливості детектування параметрів оточення при збереженні простоти конструкції, невеликих габаритах та малих матеріальних і енергетичних затратах, котрий, крім того, об'єднує в одному елементі як збудження ППРП, так і реєстрацію вихідного сигналу.

При цьому ППФД вимірює фотострум, який нормується на величину інтенсивності падаючого світла, виміряну незалежним каліброваним

фотодетектором. Це стандартна схема вимірювання фоточутливості будь-яких фотодетекторів.

До переваг такої схеми можна віднести простоту і надійність. До недоліків можна віднести спосіб організації вимірювань, коли перед тим, як виміряти сигнал з ППФД, на те саме місце і в той самий канал треба помістити калібрований фотодетектор. Тобто, виміри рознесені в часі, за який інтенсивність випромінювання від джерела може змінитись. Отже, буде внесена похибка у виміри, що накладає, зокрема, особливі вимоги на стабільність джерела живлення освітлювача. Це стосувалось випадку одноканальної схеми вимірювань.

У випадку двоканальної схеми, де виміри будуть одночасними, потрібна технічна організація другого каналу, з діленням пучка від освітлювача, що ускладнює і здорожує схему вимірів.

Таким чином, виникає потреба в спрощенні способу реєстрації сигнала з ППФД, одночасному вимірюванні сигналу від ППФД та каліброваного фотодетектора для вимірювання інтенсивності освітлення, що падає на ППФД. При цьому не бажано ускладнювати схему організацією додаткового каналу з діленням пучка світла.

Поставлена задача вирішується наступним чином. Спосіб полягає у вимірі спектральної або кутової залежності фотоструму в околі плазмон-поляритонного резонансу та його нормуванні (діленні) на інтенсивність освітлення плазмон-поляритонних фотодетекторів з допомогою мікроконтролера, що містить аналогово-цифровий перетворювач, або іншого аналогового чи цифрового пристрою з опорним каналом, який для вимірювання інтенсивності освітлення ППФД використовує світло, відбите від поверхні ППФД, а не світло (або його частину) безпосередньо від освітлювача. При цьому опорний сигнал освітлення ППФД подається на опорний канал аналогово-цифрового перетворювача мікроконтролера або іншого аналогового чи цифрового пристрою для обробки сигналу. Аналогово-цифровий перетворювач здійснює процес ділення сигналу фотоструму від ППФД на сигнал фотоструму опорного фотодетектора і видає цифровий код для обробки в мікроконтролері. Результат ділення інтенсивності

сигналу фотоструму на опорний сигнал збільшується як внаслідок збільшення фотоструму в умовах збудження плазмон-поляритонного резонансу, так і внаслідок зменшення опорного сигналу інтенсивності відбитого світла від поверхні ППФД в умовах плазмон-поляритонного резонансу. Результат такого методу вимірювання резонансу пропорційний квадрату інтенсивності величини резонансу при вимірюванні в стандартних умовах, коли опорна інтенсивність світла отримується безпосередньо від освітлювача ППФД. Це значно підсилює інтенсивність сигналу в резонансі при зменшенні його півширини, що є важливим при використанні таких ППФД як основи для побудови сенсорів різноманітного призначення.

Фіг. 1 – демонструє схематичне зображення схеми реєстрації плазмон-поляритонного резонансу, в якому застосовується джерело лазерного випромінювання (1), яке спрямоване (2) на поверхню плазмон-поляритонної структури (3), яка є плазмон-поляритонним фотодетектором (4), і звичайний фотодетектор (5), який приймає відбите випромінювання від плазмон-поляритонного фотодетектора.

Фіг. 2 – спектральні залежності фотоструму (сигналу) від поглинутого випромінювання опорного фотодетектора (1), плазмон-поляритонного фотодетектора в *p*- (2) та *s*-поляризаціях (у відсутності резонансу) (3) .

Фіг. 3 – спектральні залежності фотоструму (сигналу) від плазмон-поляритонного фотодетектора в *p*-поляризації (1) (вихідний сигнал), (2) після ділення на сигнал від опорного фотодетектора (фіг.2, крива 1) та крива (3), що є результатом масштабування (множення на 1.8) кривої (1) для зручності порівняння збільшення інтенсивності резонансу та зменшення його півширини. Інтенсивність зросла в 1.8 разів, а півширина зменшилась зі 120 нм до 90 нм (в 1.33 рази).

Фіг. 4 – приклад електричної принципової схеми реєструючого пристрою, яка включає в себе звичайний фотодетектор D1, плазмон-поляритонний фотодетектор D2, резистори зворотнього зв’язку R1 і R2 з операційними підсилювачами і мікропроцесор ATMEGA8 з вбудованим АЦП.

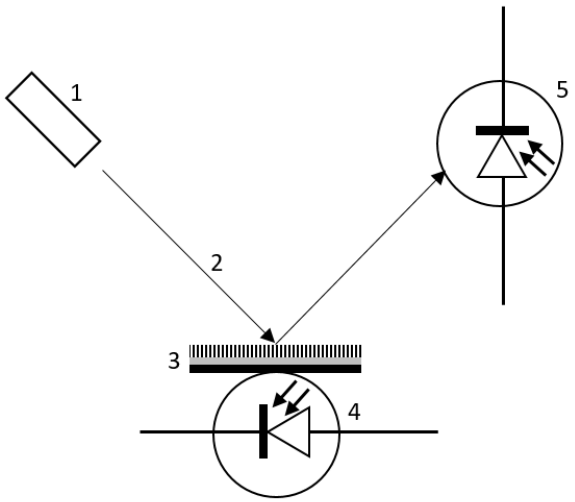
У корисній моделі застосовано плазмон-поляритонний фотодетектор Фіг.1. (4), у якому збудження плазмон-поляритонного резонансу залежить від характеристик бар’єрної фоточутливої структури (3), від кута падіння лазерного випромінювання і від його довжини хвилі. Останні два параметри регулюються для забезпечення правильної роботи пристрою детектування. Фотодетектори (4-5) підключені до мікропроцесора, в якому здійснюється оцифровування і ділення отриманих інтенсивностей сигналів з фотодекторів, за рахунок чого зникає залежність від стабільності рівня освітлення ППФД. Значне зростання детектуючої здатності відбувається при плазмон-поляритонному резонансі структури (3), при якому зменшується відбивання від поверхні ППФД і збільшується проникнення і поглинання випромінювання в ній, збільшуючи фотострум ППФД. В результаті, сигнал з опорного каналу значно зменшується за рахунок зменшення інтенсивності падаючого випромінювання на фотодетекторі (5), сигнал з фотодетектора (4) значно збільшується, а за рахунок обчислювальних перетворень в мікропроцесорі, в якому відбувається ділення вхідного сигналу фотодетектора (4) на опорний сигнал фотодетектора (5), реєструча здатність зростає в рази, що і характеризує високу чутливість способу детектування за допомогою реєстрації плазмон-поляритонного резонансу на плазмон-поляритонному фотодетекторі.

Позитивний ефект запропонованої корисної моделі полягає у збільшенні інтенсивності і звуженні резонансної кривої за рахунок комбінації двох фізичних сигналів від ППФД в умовах ПППР: фотоструму та інтенсивності відбитого від поверхні світла.

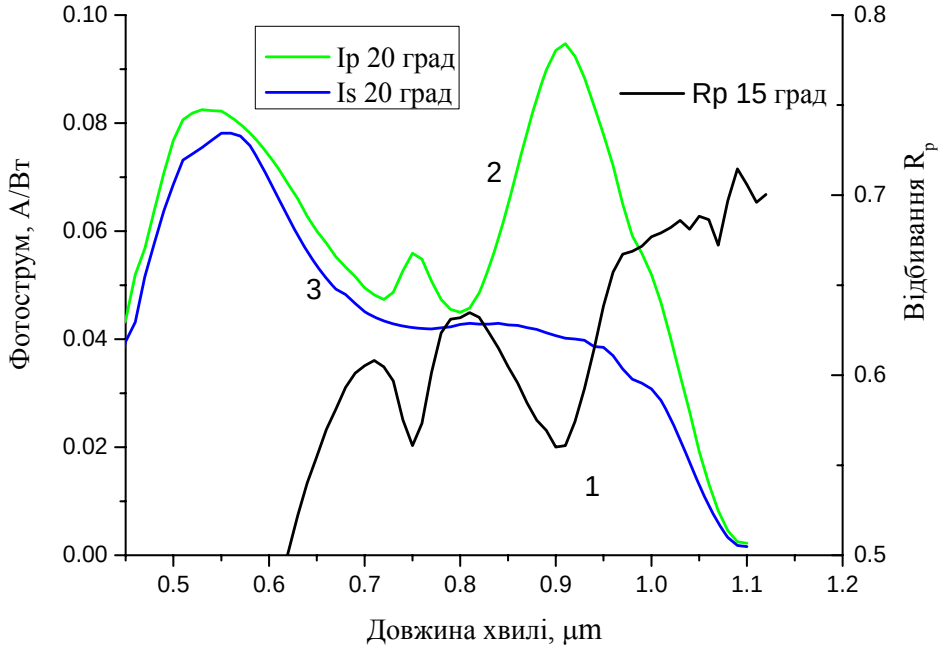
Джерела інформації:

1. Пат. 103379 Україна, МПК (2006) G01N21/55. Поляризаційно-чутливий плазмон-поляритонний фотодетектор на основі бар'єра Шотткі / М.Л. Дмитрук, С.В. Мамикін, М.В. Соснова, О.В. Коровін, В.І. Минько, З. І. Казанцева; Заявл. 01.11.2011; Опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19.

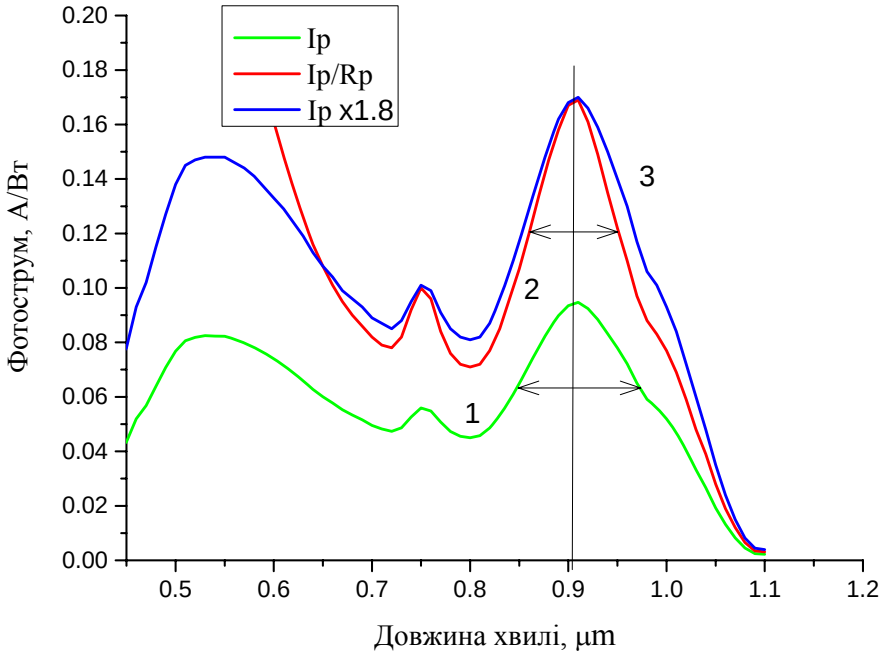
Рисунки до корисної моделі



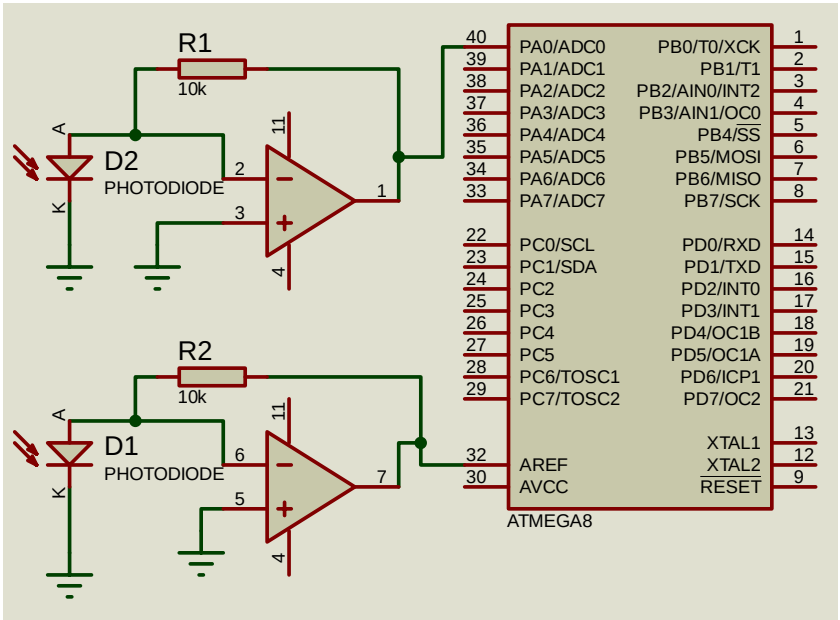
Фіг. 1



Фіг. 2


Ip
Ip/Rp
Ip x1.8
Фотострум, А/Вт
Довжина хвилі, µm
0.20
0.18
0.16
0.14
0.12
0.10
0.08
0.06
0.04
0.02
0.00
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1
2
3

Фіг. 3


R1
10k
D2
PHOTODIODE
R2
10k
D1
PHOTODIODE
ATMEGA8
PA0/ADC0
PA1/ADC1
PA2/ADC2
PA3/ADC3
PA4/ADC4
PA5/ADC5
PA6/ADC6
PA7/ADC7
PC0/SCL
PC1/SDA
PC2
PC3
PC4
PC5
PC6/TOSC1
PC7/TOSC2
AREF
AVCC
PB0/T0/XCK
PB1/T1
PB2/AIN0/INT2
PB3/AIN1/OC0
PB4/SS
PB5/MOSI
PB6/MISO
PB7/SCK
PD0/RXD
PD1/TXD
PD2/INT0
PD3/INT1
PD4/OC1B
PD5/OC1A
PD6/ICP1
PD7/OC2
XTAL1
XTAL2
RESET

Фіг. 4