

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіоелектроніки
Факультет радіоелектроніки і телекомунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра мікро- та наноелектроніки
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Вплив розмірних ефектів на оптичні параметри наносенсорів

Виконав: студент(ка) ІІм курсу, групи РТЗ-419М

Спеціальності

152 - Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Якість, стандартизація та сертифікація

Луценко О. М.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Рева В. І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Фомічева В. І.

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Радіоелектроніки та телекомунікації
 Кафедра Мікро та наноелектроніки
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) «Якість, стандартизація та сертифікація»
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
мікро- та наноелектроніки
В. В. Погосов
 « » 2020 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Луценка Олександра Миколайовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Вплив розмірних ефектів на оптичні параметри наносенсорів

керівник проекту (роботи) Рева Віталій Ігорович, доцент, канд. фіз.-мат. наук
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «13» листопада 2020 року №332

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 07 грудня 2020 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) сферичні композитні наночастинки та їх параметри

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) будова та застосування оптичних сенсорів на поверхневому плазмонному резонансі; розрахунки розмірної залежності спектральної чутливості сенсорів; техніко-економічне обґрунтування; охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-2	Рева В. І., доцент каф. МіНЕ		
3	Севастьянов Р.В., доцент каф. ПТБД		
4	Якімцов Ю. В., доцент каф. ОПіНС		
Нормо-контроль	Коротун А.В., доцент, канд. фіз.-мат.наук		

7. Дата видачі завдання « 30 » вересня 2020 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Збір і аналіз інформації про сенсори на поверхневому плазмонному резонансі	30.09. – 11.10.	виконано
2	Систематизація літературних даних	12.10. – 18.10	виконано
3	Складання і затвердження наукового завдання	19.10. – 20.10.	виконано
4	Формування та уточнення наукового завдання	21.10. – 22.10.	виконано
5	Одержання розмірних залежностей спектральної чутливості	23.10. – 31.10.	виконано
6	Складання процедури розрахунку	01.11. – 08.11.	виконано
7	Одержання чисельних результатів та їх аналіз	09.11. – 12.11.	виконано
8	Аналіз економічної ефективності проекту	13.11. – 17.11.	виконано
9	Розробка заходів по охороні праці	18.11. – 21.11.	виконано
10	Оформлення графічної частини	22.11. – 24.11.	виконано
11	Оформлення ПЗ	25.11. – 30.11.	виконано

Студент(ка)

(підпис)

О.М. Луценко
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

В.І. Рева
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

ПЗ: 97 с., 12 рис., 23 табл., 40 джерел.

Мета роботи: дослідження розмірної залежності спектральної чутливості сенсорних чутливих елементів різної морфології.

Об'єкт та предмет дослідження: об'єктом дослідження виступають двошарові сферичні наночастинки, які є чутливими елементами сенсорів на поверхневому плазмонному резонансі; предметом дослідження є технічні характеристики наночастинок як чутливих елементів оптичних сенсорів.

Методи дослідження: розрахунково-аналітичний.

Результати: результатом дослідження є аналітичні вирази для спектральної чутливості сенсорних чутливих елементів у вигляді композитних наночастинок.

Рекомендації щодо впровадження: робота носить фундаментальний характер, проте деякі її результати можуть бути використані при створенні оптичних сенсорів для застосування у хімії, біології та медицині.

Практична цінність: досліджено вплив розміру і складу двошарових наночастинок на технічні характеристики сенсорів на поверхневому плазмонному резонансі.

СЕНСОР, ПОВЕРХНЕВИЙ ПЛАЗМОННИЙ РЕЗОНАНС,
СПЕКТРАЛЬНА ЧУТЛИВІСТЬ, ЧАСТОТА ПОВЕРХНЕВОГО
ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ, ДВОШАРОВІ НАНОЧАСТИНКИ,
ЕФЕКТИВНА ШВИДКІСТЬ РЕЛАКСАЦІЇ

ЗМІСТ

Вступ	7
1 Будова, принцип дії та області застосування сенсорів на поверхневому плазмонному резонансі	9
1.1 Методи детектування наночастинок із використанням ефекту поверхневого плазмонного резонансу	9
1.2 Будова та характеристики наносенсорів на ППР	11
1.3 Оцінка похибки визначення ширини резонансного піку	21
1.4 Підходи до оцінки похибки вимірювань малих концентрацій наночастинок	25
1.5 Приклади застосування сенсорів на ППР	33
2 Дослідження розмірних залежностей оптичних характеристик наночастинок-чутливих елементів сенсорів поверхневому плазмонному резонансі	38
2.1 Загальна теорія	38
2.2 Біметалева сфера	39
2.3 Монометалева сфера	44
2.4 Метал-оксидна сфера	45
2.5 Сферична металева наноболонка	46
2.6 Результати розрахунків та їх обговорення	51
3 Охорона праці та безпека в період надзвичайних ситуацій	56
3.1 Аналіз потенційних небезпек	56
3.2 Заходи щодо забезпечення техніки безпеки	57
3.3 Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці	59
3.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях	68
3.4.1 Заходи з пожежної безпеки	68
3.4.2 Засоби індивідуального захисту	71
4 Техніко-економічні розрахунки	74

4.1	Стейкхолдери	74
4.2	Визначення трудомісткості та тривалості роботи	78
4.3	Підрахування кількості витрат на реалізацію дипломного проекту	83
4.3.1	Обладнання для виконання науково-дослідницької роботи	83
4.3.2	Розрахунок вартості матеріалів	85
4.3.3	Розрахунок заробітної плати	85
4.3.4	Відрахування на єдиний соціальний внесок	86
4.3.5	Накладні витрати	86
4.3.6	Витрати на електроенергію	87
4.4	Розрахунок економічної ефективності науково-дослідницької роботи	88
	Висновки	93
	Перелік посилань	95

ВСТУП

В теперішній час сенсорика є науково-технічним напрямком, який набув бурхливого розвитку [1]. Одним із найбільш важливих [використовуваних] типів сенсорів є оптичні сенсори, і, особливо, сенсори на поверхневому плазмонному резонансі [2, 3]. Такі сенсори широко використовуються в хімії, біології, медицині та екології для якісного та кількісного визначення хімічних і біологічних речовин, проведення індивідуального аналізу в домашніх умовах, зниження ризику помилки при постановці діагнозу, визначення якісних та кількісних змін середовища. Широке використання оптичних сенсорів на ППР зумовлене їх можливостями здійснювати детектування над малої кількості речовини та адаптування до аналізу великої номенклатури різноманітних біологічних та хімічних об'єктів [4].

Відомо, що плазмони є колективними коливаннями густини заряду вільного електронного газу [5]. На відміну від об'ємних плазмонів (коливань електронів провідності всередині іонної ґратки кристалу), поверхневі плазмони являють собою поверхневі електромагнітні хвилі, що поширюються в напрямку, паралельному межі поділу «метал – діелектрик», і сильно локалізовані поблизу межі поділу середовищ. В результаті такі еванесцентні хвилі є вельми чутливими до будь-яких змін граничних умов, зокрема, до адсорбції молекул на поверхні чутливого елемента сенсора. Саме ця властивість поверхневих плазмонів і дозволяє використовувати їх для детектування надмалих концентрацій хімічних сполук та біологічних об'єктів.

Поверхневий плазмон є поперечною хвилею, тому вектор напруженості його електричного поля перпендикулярний межі поділу «метал – діелектрик» і напрямку його поширення. Напруженість електричного поля досягає максимуму на межі поділу середовищ, а потім експоненційно загасає як у металі, так і в діелектрику [6]. Величина загасання при цьому залежить від

довжини хвилі випромінювання і діелектричної проникності матеріалів. Зазвичай для межі поділу «метал – діелектрик» глибина загасання складає десятки нанометрів, в результаті у сенсорах на ППР відбувається детектування молекул, що знаходяться лише у приповерхневому шарі. Це дозволяє реалізовувати високу чутливість і селективність, а також суттєво зменшити паразитний фоновий сигнал.

Важливим питанням технології сенсорів на основі ППР є вибір чутливого елемента. Сучасні технології дозволяють використовувати в якості таких елементів металеві наночастинки. З метою оптимального (за розмірами, матеріалом та морфологією) вибору наночастинок використовують таку характеристику як спектральна добротність (figure of merit – FOM) [3]. Внаслідок того, що простіше виявити зсув ППР для вузьких ліній, резонансний зсув відносно ширини лінії є більш вагомою мірою якості її чутливості. Тому спектральну добротність визначають як безрозмірне відношення між чутливістю до показника заломлення середовища (діелектричної проникності) та резонансною шириною лінії. Ця характеристика металевої наночастинки як чутливого елемента сенсора на ППР може досить складно залежати як від частоти падаючої електромагнітної хвилі, так і від розмірів самої наночастинки.

Тому метою роботи є дослідження розмірно-частотної залежності спектральної добротності металевих наночастинок різного складу і морфології з метою оптимального вибору чутливого елемента для сенсора на поверхневому плазмонном резонансі.

1 БУДОВА, ПРИНЦИП ДІЇ ТА ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРІВ НА ПОВЕРХНЕВОМУ ПЛАЗМОННОМУ РЕЗОНАНСІ

1.1 Методи детектування наночастинок із використанням ефекту поверхневого плазмонного резонансу

Вимірювальні системи, що ґрунтуються на ефекті поверхневого плазмонного резонансу, мають добру чутливість і межу виявлення. При цьому розрізняють такі методи детектування з використанням ефекту поверхневого плазмонного резонансу (ППР):

- детектор, побудований за схемою ППР Кретчманна [7, 8];
- сенсор, заснований на поглинанні спектральної лінії при локальному поверхневого плазмонного резонансу (ЛППР) на частинках менших за довжину хвилі.

Обидва методи показують високу чутливість і на даний момент є конкурентною і перспективною технологією з виявлення об'єктів в нанодіапазоні.

Метод для визначення малих концентрацій речовин, заснований на ЛППР [9], чутливий до коефіцієнту заломлення навколишнього середовища. В теперішній час даний метод знаходить своє застосування в області біодетектування.

У табл. 1.1 наведено характеристики двох вищеописаних методів в порівнянні з сенсорами на основі мікрорезонаторів. На базі вказаних технологій можлива побудова перспективних портативних датчиків і вимірювальних систем.

Таблиця 1.1 – Порівняння перспективних сенсорів

	Схема детектування		
	Механічний резонатор (п'єзобалансний метод)	ППР [10]	ОДМР
механізм перетворення	- Зсув частоти механічних коливань - Зсув фази	- Зсув довжини хвилі - Зсув фази - Зміна інтенсивності	- Зсув резонансної частоти - Деградація добротності - Розщеплення моди
чутливість	Чутливість зростає обернено пропорційно масі сенсора	Чутливість зростає обернено пропорційно об'єму сенсора (локальній поверхні плазмонного резонансу)	Чутливість зростає обернено пропорційно об'єму моди
Особливості	- Невисока вартість - Здатність до роботи в рідких і в'язких середовищах	- Висока добротність - Здатність детектувати поодинокі наночастинки	- Гігантська добротність - Здатність детектувати поодинокі наночастинки - Можливість реалізації на планарних схемах

1.2 Будова та характеристики наносенсорів на ППР

Вперше ідея використання поверхневих плазмонів для визначення невідомих концентрацій органічних і неорганічних речовин була запропонована ще в кінці 70-х – початку 80-х років ХХ століття [11-13]. До того моменту вже близько 10 років було відомо [14], що в системі з тонкої металевої плівки, розташованої між двома діелектриками (з різними показниками заломлення – діелектрик із великим показником заломлення у вигляді призми) можна збудити поверхневу плазмонну хвилю, яка буде локалізована переважно на межі металевої плівки і менш щільного діелектрика. Така схема збудження плазмонного резонансу називається схемою Кретчманна (рис. 1.1). Перші плазмонні сенсори мали саме таку конфігурацію. Так, в роботі [11] на основі схеми Кретчманна було запропоновано сенсор, в якому до тонкої срібної плівки з одного боку приєднувалася скляна призма, а з іншого боку на плівку наносився шар арахідата кадмію. На призму падає пучок лазера під кутом до нормалі (відповідає куту всередині призми), відбивається від плівки і потрапляє на детектор. У кутовому спектрі відбивання присутній мінімум, що відповідає збудженню поверхневого плазмонного резонансу, положення якого змінюється при зміні товщини шару арахідата кадмію.

Через кілька років в роботі [13] було запропоновано використовувати плазмонні сенсори для аналізу концентрацій газів і біологічних молекул. Для визначень концентрації газу автори запропонували покривати металеву плівку шаром органічної речовини, яка абсорбує молекули газу і при цьому змінює свій показник заломлення. При цьому автори вперше запропонували реєструвати зміну коефіцієнта відбиття при фіксованому куті, під яким лазер освітлює сенсор, що має спростити експериментальну установку або пристрій. Крім того, в цій же статті була запропонована схема вимірювання концентрації певного білка в розчині. Для цього спочатку металева плівка покривалася антитілами, специфічними до даного білка, а потім на сенсор

наносився розчин з певною концентрацією аналізованих молекул. Залежно від концентрації швидкість зміни коефіцієнта відбиття при фіксованому куті виявлялася різною. Такий самий спосіб можна використовувати і для вимірювань констант зв'язку в різних парах тіло-антитіло, використовуючи заздалегідь відомі концентрації розчинів білків і вимірюючи часову динаміку сигналу з плазмонного сенсора.

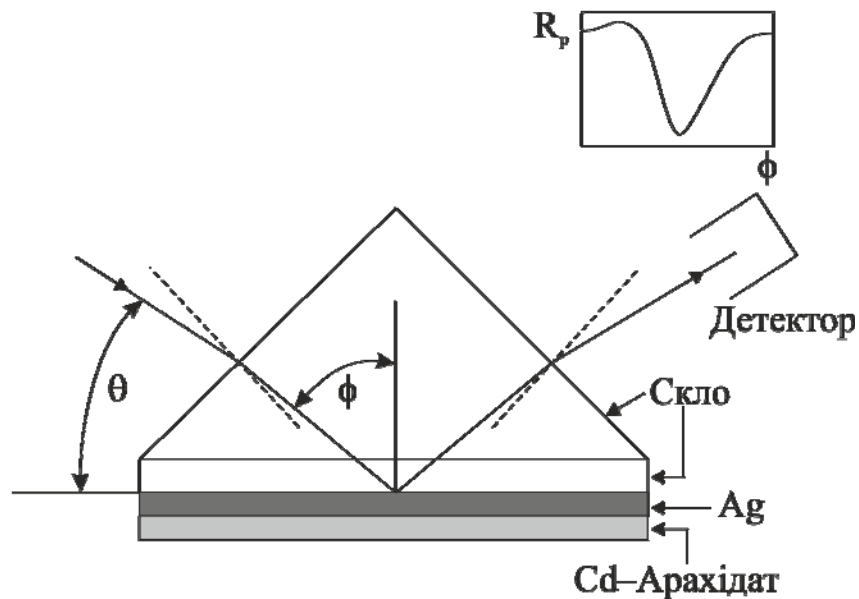
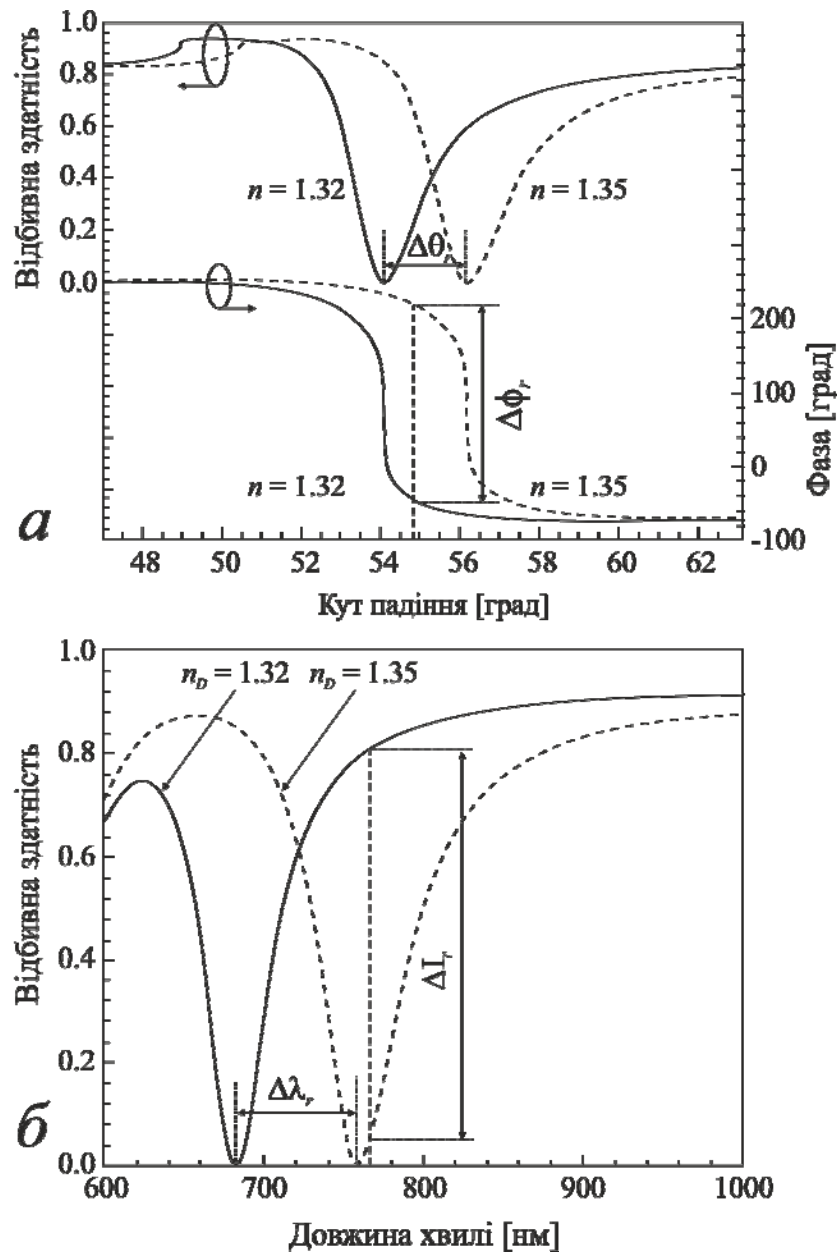


Рисунок 1.1 – Геометрія сенсора на поверхневих плазмонах [11]

Крім вже згадуваних вище методів контролю зміни положення плазмонного резонансу за величиною кута, на якому він виникає, і за інтенсивністю відбитого сигналу при фіксованому куті, також широко використовуються й інші методи – за довжиною хвилі, на якій виникає плазмонний резонанс, і за зсувом фази відбитого сигналу. Всі ці методи вимірювань наведені на рис. 1.2. Як було показано в роботі [15] у випадку плазмонного сенсора, заснованого на схемі Кретчманна або на дифракційній ґратці, всі ці методи вимірювання мають однакові обмеження на максимальну роздільну здатність сенсора. Тому питання про використання тієї чи іншої схеми вирішується, виходячи з міркувань простоти експериментальної схеми, наявності необхідного обладнання, компактності кінцевого пристрою тощо.



a – за зсувом кута виникнення резонансу і зміною фази відбитого сигналу;
б – за зсувом довжини хвилі виникнення резонансу і за зміною інтенсивності відбитого сигналу

Рисунок 1.2 – Методи вимірювання зсуву плазмонного резонансу. Суцільною лінією показані залежності при показнику заломлення аналіту $n = 1,32$, пунктирною – при $n = 1,35$ [16]

озглянемо питання про те, якими величинами характеризують якість плазмонних сенсорів. Основною характеристикою, яка почала застосовуватися ще до сенсорів у конфігурації Кретчманна, є чутливість.

Залежно від методу вимірювань вводять спектральну, кутову, фазову чутливість та чутливість за інтенсивністю сигналу. Вони визначаються такими формулами:

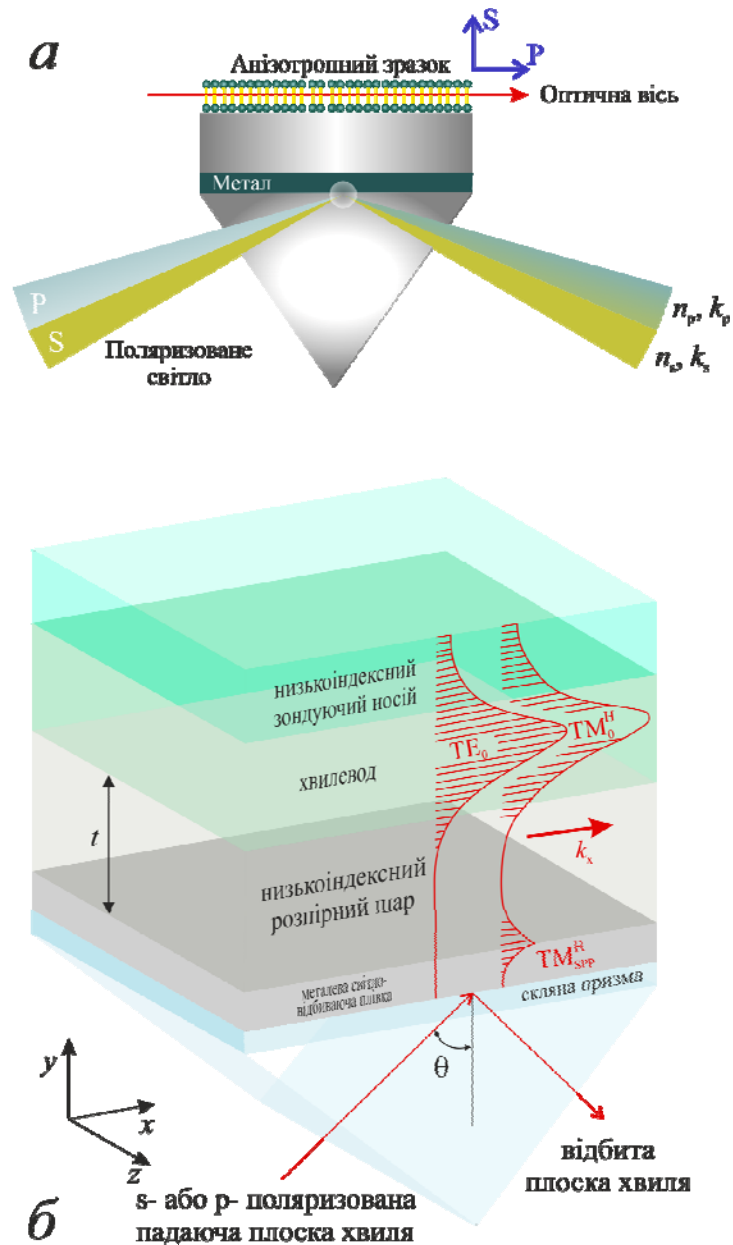
$$S_{\lambda} = \frac{\Delta\lambda_r}{\Delta n}, S_{\theta} = \frac{\Delta\theta_r}{\Delta n}, S_{\phi} = \frac{\Delta\phi_r}{\Delta n}, S_I = \frac{\Delta I_r}{\Delta n}, \quad (1.1)$$

де $\Delta\lambda_r$, $\Delta\theta_r$, $\Delta\phi_r$ і ΔI_r - зміна довжини хвилі резонансу, кута резонансу, фази відбитого сигналу (сигналу, що пройшов) і інтенсивності відбитого сигналу (сигналу, що пройшов), відповідно, при зміні показника заломлення аналіта на Δn . Одиниці вимірювання n в цьому контексті позначаються як RIU (від англ. Refractive index unit), таким чином спектральна чутливість, наприклад, вимірюється в нм/RIU. Проте, порівнювати сенсори різної конфігурації за одними тільки величинами S_{λ} або S_{θ} не можна, оскільки реально мінімальна величина зміни показника заломлення n , яку можна зафіксувати на даній установці, залежить від ширини резонансу, а також від експериментального обладнання та використовуваних методів математичної обробки сигналів. Щоб мати можливість порівнювати сенсори різних конфігурацій, що досліджуються на різному устаткуванні, використовують показник якості $FOM_{\lambda} = S_{\lambda}/\delta\lambda$, де $\delta\lambda$ – повна ширина на напіввисоті резонансу. Ця величина виявляється обернено пропорційною мінімальній зміні показника заломлення, який можливо детектувати на даному сенсорі. За аналогією можна ввести показник якості при вимірюваннях за кутом ($FOM_{\theta} = S_{\theta}/\delta\theta$) і фазою сигналу з сенсора ($FOM_{\phi} = S_{\phi}/\delta\phi$). При проведенні вимірювань зі зміною інтенсивності сигналу додаткових величин вводити не треба – чутливості S_I для різних сенсорів можна порівнювати безпосередньо

Основною перевагою поверхневих плазмонів в схемі Кретчманна є їх висока чутливість до локальних змін показника заломлення середовища поблизу металевої плівки. Це досягається за рахунок високої локалізації поля

плазмону – близько 100 нм у видимій області довжин хвиль, що за порядком величини збігається з розміром багатьох біомолекул. Завдяки цьому навіть невелика кількість біомолекул на поверхні металу викликає істотний зсув резонансу. Проте, оскільки добротність поверхневого плазмона досить мала, зафіксувати такий зсув на тлі великої ширини резонансу виявляється досить складно для малих концентрацій досліджуваної речовини. Тому останнім часом ведеться активний пошук альтернативних конфігурацій сенсорів, в яких відношення чутливості виникаючого в них резонансу до його ширини виявилось б кращім, ніж в класичній схемі Кретчманна.

Одним із підходів, який дозволяє отримати дуже вузьку лінію в спектрі відбиття, є гібридизація поверхневої плазмонної хвилі з високодобротною хвилеводною модою. Так в роботі [17] запропоновано розмістити хвилевід безпосередньо на поверхні металевої плівки (див. рис. 1.3, *a*), а в роботах [18, 19] автори запропонували більш складну конфігурацію, в якій хвилевід з оптично щільного діелектрика відділений від металевої плівки шаром діелектрика з меншим показником заломлення (див. рис. 1.3, *б*). За рахунок такої конфігурації сенсора, можна точно налаштувати інтенсивність взаємодії плазмонів і хвилевдної моди і регулювати ширину резонансу Фано, який виникає в спектрі. До недоліків таких конфігурацій сенсорів можна віднести невелике перекриття поля чутливої моди з шаром аналіту на поверхні сенсора. Через це, незважаючи на звуження лінії резонансу, його чутливість суттєво знижується.



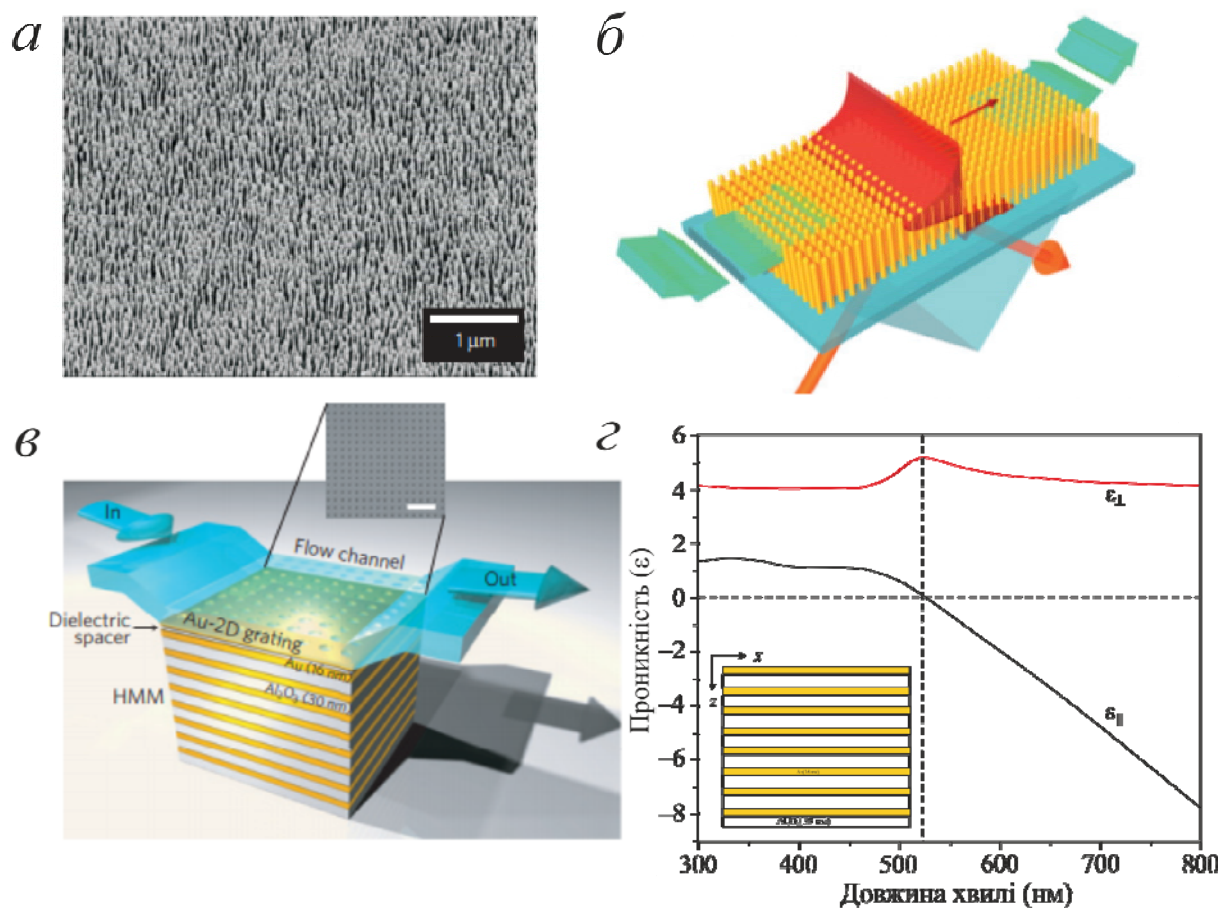
a – хвилевід лежить безпосередньо на поверхні металевої плівки [17]

б – хвилевід відділений від металевої плівки шаром діелектрика з меншим показником заломлення [19]

Рисунок 1.3 – Дві схеми сенсора, в яких поверхнева плазмонна хвиля гібридується з хвилеводною модою

Як виявилося, оптимальних значень чутливості і роздільної здатності сенсора можна домогтися при використанні так званих гіперболічних метаматеріалів. Два сенсора на ГММ з робіт [20] і [21] зображено на малюнках 1.4 (а, б) і (в, г), відповідно. Цікавою знахідкою авторів роботи [20] є те, що вони змогли

помістити розчин з аналітом безпосередньо всередину метаматеріалу. Це виявилось можливим завдяки використанню гіперболічного метаматеріалу (ГММ) у вигляді «лісу» з золотих стовпчиків – рідина з досліджуваними біомолекулами може вільно протікати крізь такий метаматеріал. Також підвищенню чутливості в такій схемі сприяє те, що у



a – зображення сенсора у вигляді «лісу» з золотих стовпчиків в електронному мікроскопі

б – геометрія сенсора і вид чутливої моди

в – геометрія сенсора що складається з планарних шарів золота та оксиду алюмінію, що чергуються

г – розраховані значення компонент діелектричної проникності в залежності від довжини хвилі світла у вакуумі

Рисунок 1.4 – Дві схеми сенсора з використанням гіперболічних метаматеріалів [20], [21]

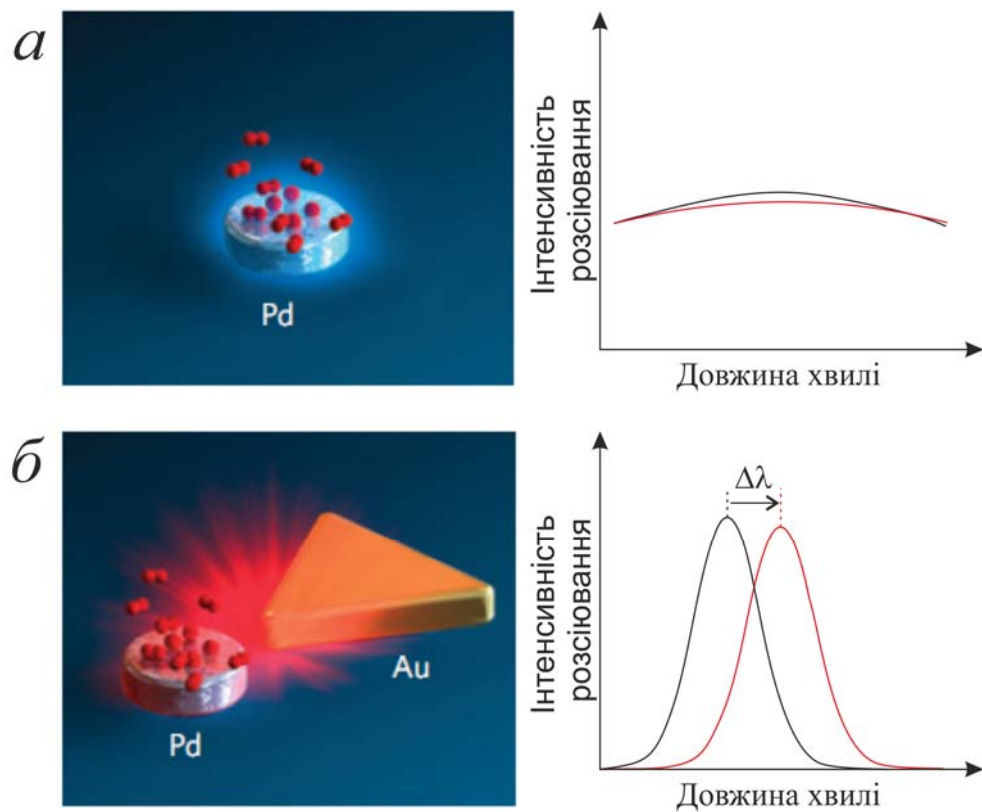
ГММ такого типу є власні моди, поле яких зосереджено всередині метаматеріалу. Таким чином досягається висока ступінь перекриття аналіту і чутливої моди. На жаль, велика чутливість сенсора (близько 32000 нм/RIU) частково нівелюється низькою добротністю чутливої моди і, як наслідок, широким резонансом в спектрі відбиття. Показник якості такого сенсора виявляється близьким до 330 RIU⁻¹.

Сенсор, зображений на рис. 1.4, в з, також має в своєму складі гіперболічний матеріал, що складається з планарних шарів золота та оксиду алюмінію, що чергуються. Зверху цей метаматеріал покритий шаром золота з періодичною ґраткою отворів – за рахунок цього плазмонні хвилі в метаматеріалів збуджуються без використання призми і навіть при нормальному падінні світла. Така конфігурація дозволяє робити пристрої надзвичайно компактними. Незважаючи на те, що в цьому сенсорі аналіт розташовується над метаматеріалом, а не всередині нього, використання ГММ забезпечує високу чутливість – до 30000 нм/RIU. Ширина плазмонного резонансу при цьому виявляється майже в 2 рази нижчою, ніж в роботі [20], завдяки чому FOM сенсора виявляється надзвичайно високим – близько 590 RIU⁻¹.

Існують також сенсори, в яких можливе збудження відразу декількох чутливих мод. Оскільки різні моди збуджуються на різних довжинах хвиль, вони мають різні глибини проникнення поля в аналіт. Цю особливість можна використовувати для оцінки товщини шару налиплих біомолекул або для компенсації флуктуацій показника заломлення розчину, як це було показано в серії робіт [22-24].

Крім сенсорів, в яких чутливими до зміни оточення є моди які поширюються (поверхневі плазмони або моди фотонних кристалів, ГММ та інших структур), існують також сенсори, в яких цю роль відіграють локалізовані резонанси на плазмонних наночастинках. Так в роботі [25] в якості сенсора використовується масив золотих наностержней всередині

мікрофлюїдних каналів, за якими крізь чутливий елемент прокачуються необхідні буферні і функціоналізуючі розчини, і розчини з аналітом. В роботі [26] продемонстровано сенсор водню на наночастинках. В основі сенсора лежить ефект абсорбції паладієм водню з утворенням гідриду паладію. При цьому діелектричні властивості паладію змінюються, що можна зафіксувати, наприклад, в зміні перетину розсіювання паладієвих наночастинок. Проте, цей ефект є дуже слабким і, щоб посилити його, автори запропонували розміщувати поруч з паладієвою наночастиною трикутну золоту (див. рис. 1.5). В результаті вдалося досягти детектування водню вже при його парціальному тиску в 8 торр.



a – паладієва частинка, що поглинає водень і відповідна слабка зміна спектрального відгуку;

б – трикутна золота і паладієва наночастинки та їх спектральний відгук, який істотно збільшується

Рисунок 1.5 – Паладієва і золота наночастинки [26]

В роботі [27] автори використовують кіральні наночастинки зі сплаву срібла і титану, за рахунок чого досягають високих значень чутливості ($1091 \text{ нм}/\text{RIU}$) і показника якості (2800 RIU^{-1}). Ідея авторів полягає в наступному. Чутливість локалізованих резонансів на наночастицях обернено пропорційна дисперсії діелектричної проникності матеріалу, з якого вони зроблені:

$$S_{\lambda} \propto \left(\frac{d\epsilon_r}{d\lambda} \Big|_{\lambda^*} \right)^{-1} \quad (1.2)$$

де ϵ_r - діелектрична проникність на резонансній довжині хвилі, λ - довжина хвилі, λ^* - резонансна довжина хвилі.

Використання сплавів зі срібла і титану дозволяє керувати дисперсією діелектричної проникності частинок і тим самим збільшувати чутливість. Використання ж кіральних частинок (закручених у вигляді спіралі) дозволяє в якості вимірюваного параметра використовувати циркулярний дихроїзм, при цьому відслідковується зміщення точки, в якій він дорівнює нулю.

Проте, найчастіше для практичного застосування простота виготовлення і використання сенсора виявляються більш важливими за рекордні показники чутливості. Так, ідея використовувати ефект екстраординарного проходження крізь металеву плівку з ґратками отворів, була вперше запропонована в роботі [28] в 2003 році. У 2010 році була продемонстрована можливість використання такого сенсора для виявлення вірусу Ебола [29]. А в 2014 році ця ж схема використовувалася в роботі [30] при дослідженні ракових клітин і екзосом, які вони викидають. Незважаючи на те, що використаний плазмонний сенсор мав посередні характеристики ($S_{\lambda} \approx 400 \text{ нм}/\text{RIU}$, $\text{FOM} = 21 \text{ RIU}^{-1}$), автори стверджують, що за межею виявлення він значно перевершив метод імуноферментного аналізу, який на даний момент є стандартом в цій галузі. При цьому концентрації аналіту

отримані за допомогою плазмонного сенсора і методом імуноферментного аналізу добре корелюють ($R^2 > 98\%$).

Все це говорить про те, що плазмонні сенсори вже зараз є відмінним інструментом при проведенні біологічних досліджень, а також медичних аналізів. Збільшення ж меж виявлення сенсорів має відкрити нові можливості для досліджень там, де на даний момент ще не існує методів з достатньою чутливістю.

1.3 Оцінка похибки визначення ширини резонансного піку

Похибка визначення ширини резонансного піку включає в себе ряд складових таких, як нестабільність лазера що перебудовується, похибка осцилографа, спотворення від теплової нелінійності оптичного діелектричного мікрорезонатора (ОДМР) і похибка, пов'язана з опорним інтерферометром.

Спочатку оцінимо похибку опорного кільцевого інтерферометра, сигнал з якого використовувався для визначення ширини лінії резонансу. Ширина області вільної дисперсії такого інтерферометра Δf визначалася виразом [31]:

$$\Delta f = \frac{c}{L_{\text{int}} n} \quad (1.3)$$

де c – швидкість світла у вакуумі, L_{int} – довжина плечей інтерферометра, n – показник заломлення середовища.

Знаючи значення довжини плечей інтерферометра L_{int} і похибку вимірювання його геометрії ΔL_{int} , можна оцінити похибку визначення

області вільної дисперсії Δ_{FSR} . Для цього було використано формулу (1.3) і метод диференціювання для непрямих вимірювань [32].

Флуктуації показника заломлення Δn розраховувалися з урахуванням зміни кліматичних умов в лабораторії в рамках допуску для нормальних кліматичних умов. Показник заломлення повітря залежить від довжини хвилі випромінювання, температури, вологості, тиску навколишнього повітря, а також концентрації CO_2 . Таким чином, можна визначити діапазон зміни індексу заломлення N_{atm} за уточненою емпіричною формулою Едлена [33]:

$$\begin{aligned} (N_{atm}(\lambda, T, p, f) - 1) \cdot 10^8 = & \left[8343,05 + \frac{2406294}{(130 - k^2)} + \frac{15999}{38,9 - k^2} \right] \times \\ & \times \frac{p}{96095,43} \cdot \frac{1 + p(0,601 - 0,00972T) \cdot 10^{-8}}{1 + 0,0036610T} - \\ & - f(3,7345 - 0,0401k^2 \cdot 10^{-10}) \end{aligned} \quad (1.4)$$

де $k = 1/\lambda$ – хвильове число в вакуумі, p – тиск повітря, T – температура навколишнього повітря, f – парціальний тиск водяної пари.

Вихідні дані для розрахунку границь зміни показника заломлення повітря наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Параметри для розрахунку флуктуацій показника заломлення

Параметр	Значення
λ , мкм	0,67
T , °C	25 ± 10
p , мм рт. ст.	715 ± 85
f , Па	2422 ± 2081 *

* Значення розраховані для відносної вологості 80% при $T = 35^{\circ}\text{C}$ і 20% при $T = 15^{\circ}\text{C}$ за [34].

З огляду на максимальну різницю відхилень кліматичних умов в діапазоні, зазначеному в таблиці 1.2, показник заломлення повітря прийме значення $n_{atm}(\min) = 1,000212$, $n_{atm}(\max) = 1,000290$, різниця значень склала $\Delta n = 0,00004$.

У таблиці 1.3 зазначені фактичні значення для розрахунку області вільної дисперсії Δf .

Таблиця 1.3 – Параметри для розрахунку області вільної дисперсії

	вимірне значення	абсолютна похибка
Периметр плечей інтерферометра, м	1,000	$\pm 0,002$
Показник заломлення повітря n_{atm}	1,0002	$\pm 0,00004$

Тепер розрахуємо похибку, пов'язану з визначенням області вільної дисперсії інтерферометра. Якщо функціональна залежність нелінійна і має вигляд $A = f(a_1, \dots, a_n)$, а похибки аргументів функції не корельовано, то середньоквадратичне відхилення (СКВ) $S(A)$ матиме вигляд:

$$S(A) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial a_i} \right)^2 S^2(a_i)}, \quad (1.5)$$

де $\partial f / \partial a_i$ - коефіцієнт впливу, $S^2(a_i)$ - середньоквадратичне відхилення аргументу функції A .

Обчислимо значення коефіцієнтів впливу для області вільної дисперсії:

$$\frac{\partial f}{\partial L_{\text{int}}} = -\frac{c}{L_{\text{int}}^2 n}, \quad \frac{\partial f}{\partial n} = -\frac{c}{L_{\text{int}} n^2}$$

В результаті похибка визначення області вільної дисперсії AFSr опорного кільцевого інтерферометра дорівнює:

$$\Delta_{FSR} = \pm 1,9 \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial n}\right)^2 \left(\frac{\Delta n}{k_n}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L_{\text{int}}}\right)^2 \left(\frac{\Delta L_{\text{int}}}{k_{L_{\text{int}}}}\right)^2}, \quad (1.6)$$

де Δn – абсолютна похибка показника заломлення, ΔL_{int} – абсолютна похибка вимірювань периметра кільцевого інтерферометра, $k_n = k_{L_{\text{int}}} = 1,73$ – квантилі для рівномірного розподілу випадкової величини.

В результаті отримуємо похибку визначення області вільної дисперсії $\Delta_{FSR} = \pm 0,65$ МГц з довірчою ймовірністю $P = 0,95$.

Наступним етапом розрахуємо сумарну абсолютну похибку визначення ширини резонансного піку. Для цього підсумуємо похибки, пов'язані з опорним інтерферометром і лазером:

$$\Delta_{\Sigma} = \pm 1,96 \sqrt{\left(\frac{\Delta_{FSR}}{1,9}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{A+F}}{1,73}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{swp}}{1,9}\right)^2}, \quad (1.7)$$

де $\Delta_{A+F} = \pm 0,25$ МГц – шуми лазера, $\Delta_{swp} = \pm 0,2$ МГц – абсолютна похибка, що викликається нестабільністю діапазону сканування лазера.

При підсумовуванні складових похибки враховувалися кореляційні зв'язки між складовими похибки, що відносяться до різних вузлів вимірювальної системи і виникають на різних етапах обробки. Корельовані

складові підсумовувалися алгебраїчно, таким чином виділяючи «групу». Далі сумарні по групам і такі, що залишилися без груп, можна вважати некорельованими, і ці складові підсумовуються за законом додавання квадратів СКВ [35]. В цьому випадку в якості корельованих складових обрані шуми лазера Δ_{A+F} .

Похибка осцилографа ($\Delta_{osc} = 1,0 \cdot 10^{-9}$ с) і спотворення резонансного піку через теплові нелінійності нехтовно малі і відповідають критерію [36]:

$$\sum_{i=1}^l \Delta_{c_i, \max} \leq 0,17 \Delta_{Ml \max} \quad (1.8)$$

де $\Delta_{c_i, \max}$ – найбільше значення i -ої додаткової складової похибки, $\Delta_{Ml \max}$ – найбільше значення похибки вимірювальної системи в робочих умовах. Внаслідок малості ці елементи не були включені в формулу (1.6).

У підсумку, сумарна похибка визначення ширини резонансного піку, яку розраховано за формулою (1.7), становить $\Delta_{\Sigma} = \pm 0,75$ МГц с довірчою ймовірністю $P = 0,95$.

На даному етапі похибку виражено в мегагерцах, що підкреслює вплив зовнішніх величин безпосередньо на визначення ширини резонансної кривої, надалі похибка приводиться до вихідного параметру вимірювальної системи – швидкості уширення моди.

1.4 Підходи до оцінки похибки вимірювань малих концентрацій наночастинок

Важливим етапом розробки засобів вимірювань є встановлення номенклатури метрологічних характеристик. На даний момент для цієї мети

використовується ГОСТ 8.009-84 [36], який містить правила і способи вибору комплексів нормованих метрологічних характеристик.

Перелік характеристик, відібраних для вимірювального каналу, який може бути використаний для даної вимірювальної системи:

$f(x)$ – функція перетворення, яка показує відношення масової концентрації наночастинок до швидкості уширення резонансної моди;

$\Psi(\xi)$ – функція впливу, викликана зміною температури;

τ – час насичення (характеристика насичення адсорбційного сенсора).

Похибка вимірювальної системи включає в себе як систематичні, так і випадкові складові похибки.

До випадкових складових можна віднести:

- внесок частотних і амплітудних флуктуацій джерела лазерного накачування;

- відхилення вологості навколишнього середовища;

- нестабільність потоку аналіту (пульсації тиску);

- температурна нестабільність (за час вимірювань);

- похибка осцилографа;

- флуктуації проміжку в елементі зв'язку (акустичні і механічні вібрації);

- похибка від нерівномірності розподілу наночастинок на поверхні мікрорезонатора;

- розкид за розмірами досліджуваних частинок.

Систематична складова (в даному випадку розглядається як випадкова величина на великій кількості ОДМР, виготовлених за однією технологією) включає:

- похибка градуювання (похибка атестованої суміші);

- похибка алгоритму обробки;

- зміна діапазону сканування лазера за частотою;

- відхилення об'єму моди (залежить від геометрії мікрорезонатора);

- якість підготовки поверхні ОДМР (вплив на адсорбцію);
- внесок відмінностей параметра добротності первинного вимірювального перетворювача.

Перелік величин, що впливають на чутливість Ψ вимірювальної системи, представлений в таблиці 1.4, стрілками вказана реакція різних параметрів на збільшення значення величини що впливає.

Таблиця 1.4 Вплив різних параметрів на чутливість вимірювальної системи

Величина що впливає	Типові значення	Зміна параметра	Особливості
Об'єм моди V_m , 10^{-5} мм ³	0,01 – 0,50	$S \uparrow$, $\Psi \downarrow$	Збільшення площі взаємодії S веде до зменшення чутливості Ψ
Добротність Q	10^6 – 10^9	$\Psi \uparrow$	Сильно зменшується межа виявлення
Зміна температури ΔT , °C	0,1 – 2,0	ν_0	Зміщується резонансний пік
Постійна адсорбції k_a	-	$\Psi \uparrow$	k_a залежить від типу покриття (методу активації поверхні). Збільшує чутливість до малих

			концентрацій
Флуктуації показника заломлення середовища n	1,0 – 1,4	ν_0	Змінює «глибину» поля що випадає, зміщує резонансний пік.

Перелік величин, що впливають на добротність ОДМР Q , представлений в таблиці 1.5, стрілками вказана реакція Q на збільшення значення впливає величини.

Таблиця 1.5 Вплив різних параметрів на добротність ОДМР

Величина що впливає	Типові значення	Зміна добротності	Особливості
Діаметр ОДМР d , мм	0,2 – 1,0	$Q \uparrow$	
Шорсткість R_a поверхні ОДМР, нм	менша 10	$Q \downarrow$	
Величина проміжку між елементом зв'язку і ОДМР h_c , мкм	0,04 – 0,50	$Q \uparrow$	Характеризує вплив вібрацій на ширину резонансного

			піку
Відносна вологість $P, \%$	20 – 80	$Q \downarrow$	При вимірюванні на повітрі створює плівку
Об'єм моди $V_m, 10^{-5} \text{ мм}^3$	0,01 – 0,50	$Q \downarrow$	Збільшується площа взаємодії з дефектами на поверхні

Порівняльні результати, що включають в себе складові похибки, які досліджувалися, наведені в таблиці 1.6. Таблиця містить значення похибки, які обчислено з використанням ширину резонансного піку, а також значення, наведені до «вихідного» параметру, тобто до швидкості розширення моди. Похибки швидкості уширення моди розраховувалися для моменту часу $t = 20 \text{ с}$ від початку вимірювань.

Таблиця 1.6 Порівняння складових похибки вимірювань

Фактори, що впливають на похибку	Позначення	Похибка ширини піку	Похибка швидкості уширення
Об'єм моди	Δ_{V_m}	-	$\pm 3 \text{ МГц/с}^*$
Амплітудні і частотні шуми лазера	Δ_{A+F}	$\pm 0,25 \text{ МГц}$	$\pm 0,015 \text{ МГц/с}$

Діапазон сканування лазера	Δ_{swp}	$\pm 0,20$ МГц	$\pm 0,01$ МГц/с
Вібрація (коливання) елемента зв'язку	Δ_{h_c}	± 50 МГц	$\pm 2,8$ МГц/с **
Опорний інтерферометр	Δ_{FSR}	$\pm 0,65$ МГц	$\pm 0,03$ МГц/с ***

* Середнє експериментальне значення, отримане на ОДМР з шириною паска меншою за 80 мкм.

**Значення, отримане при врахуванні плавної зміни величини проміжку в часі, порівнянного з часом вимірювань. Локальні викиди піддаються фільтрації.

***Параметр розрахований для граничних значень кліматичних умов вимірювань. Для мінімізації даної складової похибки необхідно проводити градування вимірювального каналу при заздалегідь визначених значеннях температури і вологості повітря.

Чисельне значення похибки швидкості уширення моди розраховувалося виходячи з умов, наведених у таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 Характерні значення параметрів при вимірюванні концентрації наночастинок

Характеристика	Позначення	Значення
Ширина резонансного піку	$\Delta\nu$	4 МГц
Потужність лазера	W	~ 5 мВт
Середня довжина хвилі	λ	670 нм
Частота сканування	F_{scan}	25 Гц (прохід за 0,04 с)
Тепловий дрейф	ν_{temp}	не перевищує 1 ГГц

Внаслідок того, що для вимірювань концентрації наночастинок за допомогою даного методу необхідно брати похідну на початковій ділянці розширення моди, ширину піку $\Delta\nu$ для точкової оцінки похибки необхідно брати з розрахунку значень, близьких до значень початкової добротності ОДМР, коли адсорбційні центри на поверхні ОДМР ще не заповнені. Тут варто зазначити, що похибка вимірювань в величинах масової концентрації розраховується з градуювальних графіків для кожного конкретного типу середовища, наночастинок і умов вимірювань.

Можна порівняти розкид отриманих експериментальних результатів з теоретичною сумарною похибкою. Сумарна теоретична похибка швидкості уширення резонансного піку після внесення поправки на об'єм моди склала $\pm 0,035$ МГц/с. Так, якщо перевести похибку в одиниці концентрації наночастинок срібла в рідині, то вона складе $\pm 0,1$ ppm.

Практичні результати роботи вимірювальної системи показують кращу точність. При використанні атестованої суміші з колоїдним розчином частинок Ag розмірами (10 ± 1) нм розкид значень концентрацій в експериментах склав $\pm 0,05$ ppm на всьому досліджуваному діапазоні концентрацій. Даний розкид показань системи виявився меншим за теоретичний внаслідок відсутності вібрацій і перепадів температури при вимірах. Проте, при використанні частинок діаметром (100 ± 5) нм розкид сильно зростає.

В цілому, похибка вимірювальної системи знаходиться на рівні робочих засобів вимірювань параметрів дисперсних систем [37]. СКВ результатів вимірювань за описаною методикою не перевищує 40% і може досягати 15% після внесення ряду поправок. Похибка методу, виражена в одиницях концентрації (мг/л або ppm), буде залежати від нахилу градуювальної кривої і, в деяких випадках, цей метод можна використовувати лише як індикаторний. Незважаючи на це, можливо отримати відгук від ОДМР при перевищенні порога гранично допустимих

концентрацій. Якщо окремо розглядати криву уширення резонансного піку, то адсорбція буде спостерігатися якісно, і буде помітним осадження окремих великих частинок.

Для подальшого підвищення точності вимірювальної системи необхідно передбачити ряд підготовчих процедур і обов'язкових вимог при проведенні вимірювань:

- удосконалювати технологію виготовлення мікрорезонаторів (покращувати повторюваність геометрії);

- використовувати мікрорезонатори з добротністю не меншою за $Q = 10^6$;

- проводити контроль об'єму моди і діаметра мікрорезонатора перед вимірами, використовувати мікрорезонатори з малим індексом моди і шириною паска мікрорезонатора галереї що шепоче меншою за 50 мкм;

- використовувати індивідуальну тару для зберігання мікрорезонаторів. Оберігати поверхню мікрорезонатора від випадкових дотиків, забруднень і пилу. Пакувати ОДМР в герметичну тару безпосередньо після його виготовлення;

- при використанні насоса для закачування аналіту в кювету необхідно використовувати в конструкції вимірювальної системи жорстко закріплені елементи оптичного зв'язку такі, як призма;

- забезпечувати однакову підготовку (активацію) поверхні мікрорезонатора;

- використовувати термостабілізовану вимірювальну комірку з контролем температури всередині кювети;

- застосовувати в вимірювальній системі кілька мікрорезонаторів одночасно. Використовувати референтний мікрорезонатор для віднімання температурного дрейфу, і застосовувати усереднення при вимірах;

- використовувати лазер, що перебудовується, з меншими амплітудними і частотними шумами. Працювати в діапазоні сканування

далекій від області перескоку моди лазера, де спектральна якість випромінювання лазера змінюється несуттєво.

1.5 Приклади застосування сенсорів на ППР

Як наочний приклад ефективності застосування ППР сенсорів [38, 39] для виявлення збудників хвороб розглянемо ППР імуносенсор для аналізу захворювання корів на лейкоз.

Відомо, що ретровіруси є збудниками набутого імунодефіциту у людей. Один з їх підвидів є також збудником вірусного лейкозу великої рогатої худоби. Це захворювання може передаватися від корів людині через вживання молока. Зараз в світі йде пошук ефективних методів боротьби з ретровірусними інфекціями. Але, на жаль, ефективного лікування поки не існує. Основним методом боротьби з інфекційним лейкозом є постійна діагностика та своєчасне виявлення хворих тварин і їх ізоляція від стада. Для цього потрібні ефективні засоби діагностики. Загальноприйнятим зараз методом виявлення цього захворювання є імуноферментний аналіз проб крові, взятої з шийної вени тварин. Метод потребує для аналізу до 6 годин часу, є досить складним, вимагає професійної підготовки виконавців, потребує спеціального обладнання і спеціальних реагентів. Вартість одного аналізу становить понад 5 доларів США. Все це не дає можливості вести постійний моніторинг стану тварин, тоді як ефективне оздоровлення стада в разі виявлення в ньому хворих корів вимагає обстеження кожної тварини щонайменше через кожні 10 діб. З такими методами це здійснити важко, внаслідок високої вартості аналізів і проблеми частого взяття проб крові.

Можливість застосування ППР сенсора для визначення того, чи присутні ретровіруси лейкозу в молоці корів, була показана в Інституті біохімії НАН України. Коли в молоці присутня помітна кількість ретровірусів, резонансний мінімум на кривій ППР зсувався приблизно на 1° .

З огляду на потребу масового використання імуносенсору лейкозу корів в тисячах різних місць (на молочних фермах, в пунктах прийому молока тощо), треба було створити відносно дешевий портативний ППР сенсор, призначений спеціально для виявлення цього захворювання. Такий сенсор повинен забезпечувати:

- прямий аналіз, без використання додаткових реагентів;
- швидкість виконання;
- аналіз без взяття крові, по краплині молока;
- дешевий аналіз, вартістю менше 1 долара США;
- невеликі габарити і масу (до 1 кг і менше);
- бути зручним для використання в польових умовах і придатним для звичайного транспортування;
- виконувати всю необхідну обробку даних вимірів усередині приладу і видавати результати аналізів на свій індикатор;
- бути таким, що не потребує висококваліфікованого обслуговуючого персоналу;
- мати досить високу продуктивність – близько 50 аналізів за годину;
- мати не дуже високу вартість, доступну для фермерів і малих підприємств.

На першому етапі потрібен був недорогий сенсор-індикатор, який лише виявляє присутність в молоці значної кількості ретровірусів лейкозу, можливо, визначаючи 1-3 ступеня зараженості. У ньому кутова роздільна здатність може бути близькою до $0,5^\circ$.

На рис. 1.6 показано конструкцію оптоелектронної частини розробленого ППР імуносенсора, орієнтованого на виявлення захворювання корів на лейкоз. Напівпровідниковий лазер 1, дві поляризаційні стопи 2,

встановлені зустрічно, і діафрагма 3 разом утворюють вузол формування паралельного пучка світла з необхідною поляризацією (освітлювальний вузол). Оптичний вузол для аналізу проби складається з оптичної ретропризми 4, з'ємного рецепторного чіпа 5, дзеркальної грані 6 і оправы 7. Фотоприймальний вузол складається з фотоприймача 8 і збираючої лінзи 9.

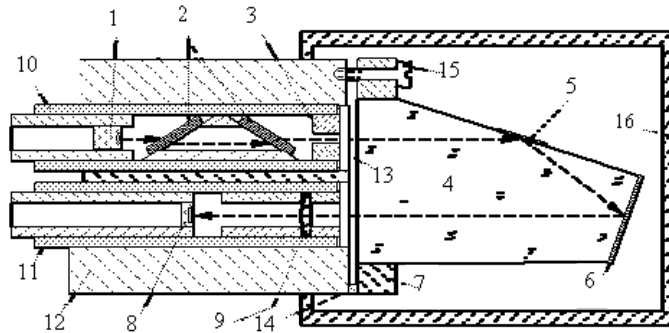


Рисунок 1.6 – Конструкція оптоелектронної частини ППР імуносенсора для виявлення захворювання корів на лейкоз

Освітлювальний і фотоприймальний вузли змонтовані всередині рухомих поворотних циліндрів 10 і 11. Вони розміщуються в паралельних циліндричних каналах, утворених в металевому корпусі 12, який об'єднує їх в окремий конструктивний блок. Останній відділений від ретропризми 4 з оправою 7 повітряним проміжком 13 шириною 2-3 мм. Пружна перемичка 14 і мікрометричний гвинт 15 дозволяють регулювати кут падіння світла на ретропризму в межах приблизно $\pm 2,5^\circ$ (при виготовленні). Для захисту від забруднень, механічних пошкоджень і впливу зовнішнього світла при зберіганні, перевезенні та під час вимірювань вузол аналізу проби закривають непрозорою кришкою 16.

У цьому ППР імуносенсорі застосовується напівпровідниковий лазер KLM-650/3 з кутом розбіжності світлового пучка меншим за $0,04^\circ$, потужністю : 3 мВт, з довжиною хвилі $\lambda = 650\text{нм}$ і монохроматичністю $\Delta\lambda = 0,5\text{нм}$.

При регулюванні кута падіння світла на ретропризму світлові пучки, які входять і виходять з неї, залишаються паралельними. Завдяки

паралельності оптичних осей фотоприймального і освітлювального вузлів вони завжди потрапляють на фотоприймач.

В процесі роботи грань ретропризми, на яку встановлюють рецепторний чіп, розміщується горизонтально. Перед вимірюванням на рецепторні чіпи (поза ППР сенсора) наносять краплю контрольованого молока і витримують протягом заданого часу, необхідного для хімічного приєднання ретровірусів лейкозу до специфічних до них антитіл, нанесених на рецепторний чіп. Час витримування становить від 2 до 20 хв. в залежності від активності нанесеного на чіп ліганду і від температури. "Доспілий" рецепторний чіп ставлять на робоче місце в ППР сенсорі, змочений імерсійною рідиною, і проводять вимірювання. На це потрібно 10-30 с. Потім в ППР імуносенсорі розміщують наступний "дозрілий" рецепторний чіп і проводять його дослідження. Таким чином виникає можливість виконати до 100 аналізів за годину.

В цьому імуносенсорі повна крива ППР не знімається. Проводиться лише триразове вимірювання інтенсивності відбитого світла при фіксованому куті падіння. Принцип вимірювання пояснюється на рис. 1.8, де показано дві криві ППР. Крива 1 виходить при нанесенні на рецепторний чіп "чистого" (тобто без вірусів) молока. При куті падіння θ_0 , на якому працює прилад, інтенсивність відбитого світла I_0 , що приходиться на фотодетектор 3, є мінімальною. Якщо ж досліджуване молоко містить певну кількість вірусів, то крива ППР зміщується, наприклад, як показано штриховою лінією (крива 2). Мінімум кривої тепер знаходиться при куті θ_1 . Тому при незмінному куті падіння θ_0 інтенсивність відбитого світла I_0 стає вже значно більшою. І чим більше ретровірусів знаходиться в досліджуваному молоці, тим сильнішим буде сигнал від фотодетектора. Таким чином, вимірюючи цей сигнал, можна робити висновки щодо наявності та концентрації в молоці ретровірусів лейкозу.

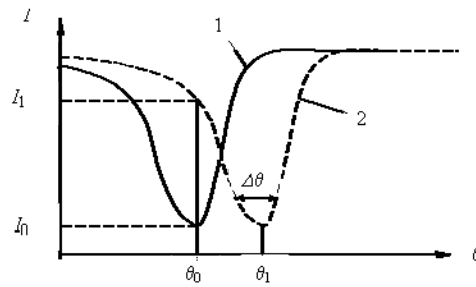


Рисунок 1.7 – Пояснення принципу дії сенсора: 1 – крива ППР для "чистої" проби; 2 – крива ППР в разі наявності в молоці ретровірусів лейкозу

Зробивши вимірювання "еталонних" розчинів з відомими концентраціями аналіту, можна проградувати прилад, тобто знайти залежність між концентрацією вірусів лейкозу і величиною сигналу від фотодетектора. Ця залежність зберігається в пам'яті процесора, і з його допомогою на індикатор портативного приладу видаються результати аналізу.

Позитивними рисами описаного ППР імуносенсора є його невеликі габарити і можливість його налаштування на виявлення в рідині і інших вірусів або на інші аналізи, – шляхом використання інших специфічних рецепторних чипів з іншими специфічними антитілами і регулювання кута падіння світла на ретропризму.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗМІРНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОЧАСТИНОК-ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ СЕНСОРІВ ПОВЕРХНЕВОМУ ПЛАЗМОННОМУ РЕЗОНАНСІ

2.1 Загальна теорія

Як вже було вказано, спектральну добротність визначають як відношення спектральної чутливості до показника заломлення середовища до ефективної швидкості релаксації [3]

$$\text{FOM} = \frac{S}{\gamma_{\text{eff}}}, \quad (2.1)$$

В частотних одиницях чутливість до показника заломлення визначається співвідношенням

$$S_{\omega} = \frac{\partial \omega_{sp}}{\partial \bar{n}}, \quad (2.2)$$

де ω_{sp} – частота поверхневого плазмонного резонансу, а ефективна швидкість релаксації визначається як

$$\gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\text{bulk}} + \gamma_{\text{rad}} + \gamma_s, \quad (2.3)$$

де γ_{bulk} – швидкість об'ємної релаксації; γ_{rad} – швидкість радіаційної релаксації; γ_s – швидкість поверхневої релаксації.

Надалі для діелектричної функції матеріалу чутливого елемента сенсора будемо використовувати класичну модель Друде

$$\Gamma(\omega) = \Gamma^\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_{\text{eff}})}, \quad (2.4)$$

де ω_p – частота об'ємних плазмонів; Γ^∞ – внесок іонного остову в діелектричну функцію металу.

Замість похідної за показником заломлення у (2.2) іноді зручніше користуватися похідною за діелектричною проникністю оточуючого середовища. З урахуванням того, що $\tau_m = \bar{n}^2$, матимемо

$$S_\omega = \frac{\partial \omega_{sp}}{\partial \bar{n}} = 2\sqrt{\tau_m} \frac{\partial \omega_{sp}}{\partial \tau_m}. \quad (2.5)$$

Частота поверхневого плазмонного резонансу визначається з умови рівності нулю знаменника виразу для поляризованості металеві наночастинки, яку використовують в якості чутливого елементу сенсора.

Співвідношення (2.1) – (2.5) мають загальний характер. Конкретизувати ці вирази можливо при виборі морфології плазмонної наночастинки, що і буде зроблено надалі.

2.2 Біметалева сфера

Виразу для FOM чутливого елементу сенсора ППР у вигляді двошарової біметалевої кулі зручно надати наступного вигляду

$$\text{FOM} = 2\sqrt{\tau_m} \left\langle \tau_{@}^{\text{eff}} \right\rangle_R \frac{\partial \omega_{@}^{sp}}{\partial \tau_m}, \quad (2.6)$$

де $\left\langle \tau_{@}^{\text{eff}} \right\rangle_R$ – ефективний середній час релаксації, що визначається як [40]

$$\frac{1}{\langle \tau_{@}^{\text{eff}} \rangle_R} = \frac{1}{\langle \tau_{@}^{\text{bulk}} \rangle_R} + \frac{1}{\langle \tau_{@}^{\text{rad}} \rangle_R} + \frac{1}{\langle \tau_{@}^{\text{surf}} \rangle_R}. \quad (2.7)$$

У формулі (2.7) середній час об'ємної релаксації

$$\langle \tau_{@}^{\text{bulk}} \rangle_R = \left(2 - \sqrt{1 - \frac{R_c^2}{R^2}} \right) \tau_s^{\text{bulk}} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{R_c^2}{R^2}} \right) \tau_c^{\text{bulk}}, \quad (2.8)$$

середній час поверхневої релаксації

$$\langle \tau_{@}^{\text{surf}} \rangle_R = \mathcal{A} \frac{R}{v_{F,s}}, \quad (2.9)$$

де

$$\mathcal{A} = \left[1 + \left(\frac{v_{F,s}}{v_{F,c}} - 1 \right) \left(\frac{R_c}{R} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{R_c^2}{R^2} \right) \ln \frac{R - R_c}{R + R_c} \right) \right]^{-1}. \quad (2.10)$$

Час радіаційного загасання розраховується наступним чином:

– при виконанні умов $l_c^{\text{bulk}} > 2R_c$, $l_s^{\text{bulk}} > 2(R - R_c)$

$$\begin{aligned} \langle \tau_{@}^{\text{rad}} \rangle_R = \frac{9 \sqrt{T_m}}{2 V_0} \frac{R}{v_{F,s}} \frac{c^3}{\omega_{p,s}^3} & \left\{ \frac{R^3}{R^3 - R_c^3} \left[1 - \frac{R_c}{R} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{R_c^2}{R^2} \right) \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \ln \frac{R - R_c}{R + R_c} \right] + \frac{v_{F,s}}{v_{F,c}} \frac{\omega_{p,s}^3}{\omega_{p,c}^3} \frac{R^3}{R_c^3} \left[\frac{R_c}{R} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{R_c^2}{R^2} \right) \ln \frac{R - R_c}{R + R_c} \right] \right\}; \end{aligned} \quad (2.11)$$

– при виконанні умов $l_c^{\text{bulk}} \leq 2R_c$, $l_s^{\text{bulk}} \leq 2(R - R_c)$

$$\langle \tau_{@}^{\text{rad}} \rangle_R = \frac{9}{2} \frac{\sqrt{\tau_m} c^3}{V_0 \omega_{p,s}^3} \left\{ \frac{R^3}{R^3 - R_c^3} \left(2 - \sqrt{1 - \frac{R_c^2}{R^2}} \right) \tau_s^{\text{bulk}} + \frac{\omega_{p,s}^3 R^3}{\omega_{p,c}^3 R_c^3} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{R_c^2}{R^2}} \right) \tau_c^{\text{bulk}} \right\}, \quad (2.12)$$

У формулах (2.8) – (2.12): R – радіус біметалевої наночастинки; R_c – радіус ядра біметалевої наночастинки; $\tau_{c(s)}^{\text{bulk}}$ – час об'ємної релаксації в ядрі (оболонці); $l_{c(s)}^{\text{bulk}}$ – час середня довжина вільного пробігу електронів в ядрі (оболонці); $v_{F,c}$ – швидкість Фермі електронів у металі ядра (оболонки); $\omega_{p,c(s)}$ – частота об'ємних плазмонів у ядрі (оболонці); c – швидкість світла; $V_0 = 4\pi R^3 / 3$ – об'єм наночастинки.

Вираз для безрозмірної поляризованості біметалевої сфери має вигляд:

$$\alpha_{@} = \frac{(\tau_c - \tau_m)(2\tau_s + \tau_c) - (2\tau_s + \tau_m)(\tau_s - \tau_c)\beta_c}{(\tau_s + 2\tau_m)(2\tau_s + \tau_c) - 2(\tau_s - \tau_m)(\tau_s - \tau_c)\beta_c}, \quad (2.13)$$

де $\beta_c = (R_c / R)^3$.

Згідно з теорією Друде для комплексних діелектричних функцій ядра та оболонки можна записати

$$\tau_{c(s)}(\omega) = \tau_{c(s)}^{\infty} - \frac{\omega_{p,c(s)}^2 (\tau_{@}^{\text{eff}})^2}{1 + \omega^2 (\tau_{@}^{\text{eff}})^2} + i \frac{\omega_{p,c(s)}^2 \tau_{@}^{\text{eff}}}{\omega (1 + \omega^2 (\tau_{@}^{\text{eff}})^2)}. \quad (2.14)$$

Рівняння для визначення частот ППР отримаємо з умови рівності нулю знаменника виразу (2.13):

$$Z(\omega_{@}^{sp}, \tau_m) = a_6 (\omega_{@}^{sp})^6 + a_4 (\omega_{@}^{sp})^4 + a_2 (\omega_{@}^{sp})^2 + a_0 = 0, \quad (2.15)$$

де

$$a_0 = -\omega_{p,c}^2 (\tau_{@}^{\text{eff}})^2 [2(1-\beta_c)\omega_{p,s}^2 + (1+2\beta_c)\omega_{p,c}^2]; \quad (2.16)$$

$$a_2 = 2(1-\beta_c) \left[\tau_m \tau_c^\infty + \tau_s^\infty{}^2 + \omega_{p,s}^4 (\tau_{@}^{\text{eff}})^4 - \tau_m \omega_{p,c}^2 (\tau_{@}^{\text{eff}})^2 \right] + \\ + 2(2+\beta_c) \left[\tau_s^\infty - \omega_{p,c}^2 (\tau_{@}^{\text{eff}})^2 \right] \tau_m; \quad (2.17)$$

$$a_4 = 2\tau_m (\tau_{@}^{\text{eff}})^2 [(1-\beta_c)\tau_c^\infty + (2+\beta_c)\tau_s^\infty] - \\ - (\tau_{@}^{\text{eff}})^4 [(1+2\beta_c)(\tau_s^\infty \omega_{p,c}^2 + \tau_c^\infty \omega_{p,s}^2) + 4(1-\beta_c)\tau_s^\infty \omega_{p,s}^2]; \quad (2.18)$$

$$a_6 = \tau_s^\infty (\tau_{@}^{\text{eff}})^4 [2(1-\beta_c)\omega_{p,s}^2 + (1+2\beta_c)\omega_{p,c}^2]. \quad (2.19)$$

Похідна від частоти ППР за діелектричною проникністю середовища з виразу (2.6) обчислюється через похідні від неявно заданої функції $Z(\omega_{@}^{sp}(\tau_m), \tau_m)$:

$$\frac{\partial \omega_{@}^{sp}}{\partial \tau_m} = -\frac{\partial Z / \partial \tau_m}{\partial Z / \partial \omega_{@}^{sp}}, \quad (2.20)$$

де

$$\frac{\partial Z}{\partial \omega_{@}^{sp}} = 2\omega_{@}^{sp} (3a_6 (\omega_{@}^{sp})^4 + 2a_4 (\omega_{@}^{sp})^2 + a_2); \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \tau_m} = \frac{\partial a_6}{\partial \tau_m} (\omega_{@}^{sp})^6 + \frac{\partial a_4}{\partial \tau_m} (\omega_{@}^{sp})^4 + \frac{\partial a_2}{\partial \tau_m} (\omega_{@}^{sp})^2 + \frac{\partial a_0}{\partial \tau_m}. \quad (2.22)$$

У формулі (2.22)

$$\frac{\partial a_0}{\partial \Gamma_m} = -2\omega_{p,c}^2 \tau_{@}^{\text{eff}} \frac{\partial \tau_{@}^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m} \left[2(1-\beta_c) \omega_{p,s}^2 + (1+2\beta_c) \omega_{p,c}^2 \right]; \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_2}{\partial \Gamma_m} = & 2(1-\beta_c) \left[\Gamma_c^\infty + 4\omega_{p,s}^4 (\tau_{@}^{\text{eff}})^3 \frac{\partial \tau_{@}^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m} - 2\Gamma_m \omega_{p,c}^2 \tau_{@}^{\text{eff}} \frac{\partial \tau_{@}^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m} - \omega_{p,c}^2 (\tau_{@}^{\text{eff}})^2 \right] + \\ & + 2(2+\beta_c) \left[\Gamma_s^\infty - \omega_{p,c}^2 (\tau_{@}^{\text{eff}})^2 \right] + 4(2+\beta_c) \Gamma_m \omega_{p,c}^2 \tau_{@}^{\text{eff}} \frac{\partial \tau_{@}^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m}; \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_4}{\partial \Gamma_m} = & \left[2(\tau_{@}^{\text{eff}})^2 + 4\Gamma_m \tau_{@}^{\text{eff}} \frac{\partial \tau_{@}^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m} \right] \left[(1-\beta_c) \Gamma_c^\infty + (2+\beta_c) \Gamma_s^\infty \right] - \\ & - 4(\tau_{@}^{\text{eff}})^3 \frac{\partial \tau_{@}^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m} \left[(1+2\beta_c) (\Gamma_s^\infty \omega_{p,c}^2 + \Gamma_c^\infty \omega_{p,s}^2) + 4(1-\beta_c) \Gamma_s^\infty \omega_{p,s}^2 \right]; \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial a_6}{\partial \Gamma_m} = 4\Gamma_s^\infty (\tau_{@}^{\text{eff}})^3 \frac{\partial \tau_{@}^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m} \left[2(1-\beta_c) \omega_{p,s}^2 + (1+2\beta_c) \omega_{p,c}^2 \right], \quad (2.27)$$

де, згідно з [40]

$$\frac{\partial \tau_{@}^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m} = \frac{\partial \langle \tau_{@}^{\text{rad}} \rangle}{\partial \Gamma_m} = \begin{cases} \left[\frac{9}{4V_0 \sqrt{\Gamma_m}} \frac{R}{v_{F,c}} \left(\frac{c}{\omega_{bp,c}} \right)^3 \left[\frac{1-\beta_c^{1/3} - \frac{1}{2}(1-\beta_c^{2/3}) \ln \frac{1-\beta_c^{1/3}}{1+\beta_c^{1/3}}}{1-\beta_c} + \frac{v_{F,s}}{v_{F,c}} \left(\frac{\omega_{bp,s}}{\omega_{bp,c}} \right)^3 \right. \right. \\ \left. \left. \frac{\beta_c^{1/3} + \frac{1}{2}(1-\beta_c^{2/3}) \ln \frac{1-\beta_c^{1/3}}{1+\beta_c^{1/3}}}{\beta_c} \right] \right], \text{ при } l_c^{\text{bulk}} > 2R_c, l_s^{\text{bulk}} > 2(R-R_c); \\ \left[\frac{9}{4V_0 \sqrt{\Gamma_m}} \left(\frac{c}{\omega_{bp,c}} \right)^3 \left[\frac{(2-\sqrt{1-\beta_c^{2/3}}) \tau_s^{\text{bulk}}}{1-\beta_c} + \left(\frac{\omega_{bp,s}}{\omega_{bp,c}} \right)^3 \frac{(1-\sqrt{1-\beta_c^{2/3}}) \tau_c^{\text{bulk}}}{1-\beta_c} \right] \right], \\ \text{при } l_c^{\text{bulk}} \leq 2R_c, l_s^{\text{bulk}} \leq 2(R-R_c). \end{cases} \quad (2.28)$$

Отже, підставляючи послідовно співвідношення (2.7) – (2.9), (2.11), (2.13), (2.18) – (2.28) у формулу (2.6), можна розрахувати розмірну залежність спектральної добротності чутливого елемента сенсора на ППР у вигляді біметалевої наносфери.

2.3 Монометалева сфера

За аналогією з (2.6) запишемо вираз для FOM чутливого елемента сенсора ППР у вигляді монометалевої наносфери

$$\text{FOM} = 2\sqrt{\Gamma_m} \tau^{\text{eff}} \frac{\partial \omega_{sp}}{\partial \Gamma_m}, \quad (2.29)$$

де ефективний час релаксації

$$\frac{1}{\tau^{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau^{\text{bulk}}} + \frac{1}{\tau^{\text{surf}}} + \frac{1}{\tau^{\text{rad}}}, \quad (2.30)$$

τ^{bulk} для конкретного металу є константою, а τ^{surf} і τ^{rad} знайдемо з граничного переходу $R_c \rightarrow R$ у формулах (2.9), (2.11) і (2.13). Здійснюючи цей граничний перехід, отримаємо (при $\omega \approx \omega_{bp}$)

$$\frac{1}{\tau^{\text{surf}}} = \frac{3}{4} \frac{v_F}{R}, \quad \frac{1}{\tau^{\text{rad}}} = \frac{2}{3} \frac{V_0}{\sqrt{\Gamma_m}} \left(\frac{\omega_{bp}}{c} \right)^3 \frac{v_F}{R}. \quad (2.31)$$

Враховуючи, що частота ППР для монометалевої сфери дорівнює

$$\omega_{sp} = \sqrt{\frac{\omega_{bp}^2}{\Gamma^\infty + 2\Gamma_m} - \frac{1}{(\tau^{\text{eff}})^2}}, \quad (2.32)$$

отримаємо її похідну за Γ_m :

$$\frac{\partial \omega_{sp}}{\partial \Gamma_m} = - \frac{\frac{\omega_{bp}^2}{(\Gamma^\infty + 2\Gamma_m)^2} + \frac{1}{\tau^{\text{eff}}} \frac{\partial}{\partial \Gamma_m} \left(\frac{1}{\tau^{\text{eff}}} \right)}{\sqrt{\frac{\omega_{bp}^2}{\Gamma^\infty + 2\Gamma_m} - \frac{1}{(\tau^{\text{eff}})^2}}}. \quad (2.33)$$

Тут

$$\frac{\partial}{\partial \Gamma_m} \left(\frac{1}{\tau^{\text{eff}}} \right) = \frac{\partial}{\partial \Gamma_m} \left(\frac{1}{\tau^{\text{rad}}} \right) = - \frac{1}{3} \frac{V_0}{\Gamma_m^{3/2}} \left(\frac{\omega_{bp}}{c} \right)^3 \frac{v_F}{R}. \quad (2.34)$$

Отже, підставляючи (2.30) – (2.34) у (2.29), можна дослідити розмірну залежність спектральної добротності чутливого елемента у вигляді монометалевої наносфери.

2.4 Метал-оксидна сфера

Для випадку, коли в якості чутливого елемента використовують метал-оксидну сферичну наночастинку, вирази (2.29) – (2.31) і (2.34) зберігають свій вигляд, а для частоти ППР та її похідної за діелектричною проникністю оточуючого середовища матимемо вирази

$$\omega_{sp} = \sqrt{\frac{\omega_{bp}^2}{\tau^\infty + \tau_{ox} \frac{2(1-\beta_c)\tau_{ox} - (2+\beta_c)\tau_m}{(1+2\beta_c)\tau_{ox} - (1-\beta_c)\tau_m}} - \frac{1}{(\tau^{eff})^2}}, \quad (2.35)$$

де τ_{ox} – діелектрична проникність шару оксиду, а β_c має такий самий сенс, як і для біметаєвої наночастинки

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega_{sp}}{\partial \tau_m} = & \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{\omega_{bp}^2}{\tau^\infty + \tau_{ox} \frac{2(1-\beta_c)\tau_{ox} - (2+\beta_c)\tau_m}{(1+2\beta_c)\tau_{ox} - (1-\beta_c)\tau_m}} - \frac{1}{(\tau^{eff})^2}} \right]^{\frac{1}{2}} \times \\ & \times \left\{ -2 \frac{\partial}{\partial \tau_m} \left(\frac{1}{\tau^{eff}} \right) + 9\beta_c \frac{\tau_{ox}^2}{[(1+2\beta_c)\tau_{ox} - (1-\beta_c)\tau_m]^2} \right\} \times \\ & \times \left. \frac{\omega_{bp}^2}{\left[\tau^\infty + \tau_{ox} \frac{2(1-\beta_c)\tau_{ox} - (2+\beta_c)\tau_m}{(1+2\beta_c)\tau_{ox} - (1-\beta_c)\tau_m} \right]^2} \right\}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Отже, підставляючи (2.35), (2.36), (2.30), (2.31) і (2.34) у (2.29), отримаємо розмірну залежність спектральної добротності чутливого елемента сенсора на ППР у вигляді метал-оксидної сферичної наночастинки.

2.5 Сферична металева нанооболонка

Співвідношення для FOM чутливого елемента сенсора ППР у вигляді сферичної металевої нанооболонки запишемо у вигляді

$$\text{FOM} = \frac{2\sqrt{\tau_m}}{\gamma^{\text{eff}}} \frac{\partial \omega_{sp}}{\partial \tau_m}, \quad (2.37)$$

де γ^{eff} задається виразом (2.3), в якому

$$\gamma^{\text{bulk}} = \frac{1}{\left(2\sqrt{1-\beta_c^{2/3}}\right)\tau^{\text{bulk}}}, \quad (2.38)$$

$$\gamma^{\text{surf}} = \left(\left\langle \frac{1}{v_F} \right\rangle \right)^{-1}, \quad (2.39)$$

l – довжина вільного пробігу електрона до зіткнення з поверхнею оболонки, а γ^{rad} розраховується залежно від виконання однієї з нерівностей

$$l^{\text{bulk}} > 2t, \quad (2.40)$$

або

$$l^{\text{bulk}} \leq 2t. \quad (2.41)$$

Тут l^{bulk} – довжина вільного пробігу електрона у 3D-металі

Середнє значення в (2.39) обчислюється за умови, що електрони з металевої оболонки не потрапляють у діелектричне ядро внаслідок існування практично нескінченного потенціального бар'єра на межі ядра та оболонки:

$$\left\langle \frac{1}{v_F} \right\rangle = \int_0^{\theta^*} \frac{2R \sin \theta}{v_F} \cos \theta d\theta + \int_{\theta^*}^{\frac{\pi}{2}} \frac{L}{v_F} \cos \theta d\theta, \quad (2.42)$$

де

$$\cos \theta^* = \frac{R_c}{R} = \beta_c, \quad (2.43)$$

а

$$L = R \sin \theta - \sqrt{R_c^2 - R^2 \cos^2 \theta}. \quad (2.44)$$

Розраховуючи інтеграли в (2.42) з урахуванням (2.43) і (2.44), отримаємо

$$\gamma^{\text{surf}} = \frac{v_F}{R} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \beta_c^{1/3} - \frac{1}{2} \beta_c^{2/3} + \frac{1}{4} (1 - \beta_c^{2/3}) \ln \frac{1 - \beta_c^{1/3}}{1 + \beta_c^{1/3}} \right\}^{-1}. \quad (2.45)$$

При виконанні умови (2.40), маємо

$$\gamma^{\text{rad}} = \left\{ \frac{9}{2} c^3 \sqrt{T_m} \left[\int_0^{\theta^*} \frac{2R \sin \theta}{v_F} \cos \theta d\theta + \int_{\theta^*}^{\frac{\pi}{2}} \frac{L}{v_F} \cos \theta d\theta \right] \right\}^{-1}, \quad (2.46)$$

де

$$\mathcal{B} = \frac{1}{\omega_p^3 V (1 - \beta_c)}. \quad (2.47)$$

Обчислюючи інтеграли в (2.46), отримаємо

$$\gamma^{\text{rad}} = \frac{2}{9} \left(\frac{\omega_p}{c} \right)^3 \frac{V(1-\beta_c) v_F}{\sqrt{T_m} R} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \beta_c^{1/3} - \frac{1}{2} \beta_c^{2/3} + \frac{1}{4} (1 - \beta_c^{2/3}) \ln \frac{1 - \beta_c^{1/3}}{1 + \beta_c^{1/3}} \right\}^{-1}. \quad (2.48)$$

При виконанні нерівності (2.41) матимемо

$$\gamma^{\text{rad}} = \left\{ \frac{9}{2} c^3 \sqrt{T_m} \left[\int_0^{\theta^*} \mathcal{B} \tau^{\text{bulk}} \frac{2R \sin \theta}{v_F} \cos \theta d\theta + \int_{\theta^*}^{\frac{\pi}{2}} 2\mathcal{B} \tau^{\text{bulk}} \frac{L}{v_F} \cos \theta d\theta \right] \right\}^{-1}, \quad (2.49)$$

або, обчислюючи інтеграли

$$\gamma^{\text{rad}} = \frac{2}{9} \left(\frac{\omega_p}{c} \right)^3 \frac{V(1-\beta_c)}{\sqrt{T_m}} \frac{1}{\tau^{\text{bulk}}} \left(2 - \sqrt{1 - \beta_c^{2/3}} \right)^{-1}. \quad (2.50)$$

Умова поверхневого плазмонного резонансу для металеві оболонки, за аналогією з (2.14), має вигляд

$$\text{Re}Z = 0, \quad (2.51)$$

де

$$Z = (T(\omega) + 2T_m)(2T(\omega) + T_c) - 2(T(\omega) - T_m)(T(\omega) - T_c), \quad (2.52)$$

а $T_c = \text{const}$ – діелектрична проникність матеріалу ядра.

З урахуванням виразу для діелектричної функції (2.4) з (2.51) можна отримати наступне рівняння для визначення частот ППР

$$\text{Re}Z(\omega_{@}^{\text{sp}}, T_m) = a_6 (\omega_{@}^{\text{sp}})^6 + a_4 (\omega_{@}^{\text{sp}})^4 + a_2 (\omega_{@}^{\text{sp}})^2 + a_0 = 0, \quad (2.53)$$

де

$$a_0 = -\omega_p^4 \gamma^{\text{eff} 2}; \quad (2.54)$$

$$a_2 = -\gamma^{\text{eff} 4} \left[\Gamma^{\infty 2} + \Gamma_c \Gamma_m + \Gamma^{\infty} \left(\frac{1 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_c + \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_m \right) \right] + \omega_p^4 - \\ - \omega_p^2 \gamma^{\text{eff} 2} \left(2\Gamma^{\infty} + \frac{1 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_c + \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_m \right); \quad (2.55)$$

$$a_4 = 2\gamma^{\text{eff}} \left[\Gamma^{\infty 2} + \Gamma_c \Gamma_m + \Gamma^{\infty} \left(\frac{1 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_c + \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_m \right) \right] - \omega_p^2 \left(2\Gamma^{\infty} + \frac{1 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_c + \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_m \right); \quad (2.56)$$

$$a_6 = \Gamma^{\infty 2} + \Gamma_c \Gamma_m + \Gamma^{\infty} \left(\frac{1 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_c + \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_m \right). \quad (2.57)$$

Похідну від частоти ППР обчислимо за аналогією з виразом (2.20):

$$\frac{\partial \omega_{@}^{sp}}{\partial \Gamma_m} = - \frac{\partial(\text{Re}Z) / \partial \Gamma_m}{\partial(\text{Re}Z) / \partial \omega_{@}^{sp}}, \quad (2.58)$$

де

$$\frac{\partial(\text{Re}Z)}{\partial \omega_{@}^{sp}} = 2\omega_{@}^{sp} \left(3a_6 (\omega_{@}^{sp})^4 + 2a_4 (\omega_{@}^{sp})^2 + a_2 \right); \quad (2.59)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \Gamma_m} = \frac{\partial a_6}{\partial \Gamma_m} (\omega_{@}^{sp})^6 + \frac{\partial a_4}{\partial \Gamma_m} (\omega_{@}^{sp})^4 + \frac{\partial a_2}{\partial \Gamma_m} (\omega_{@}^{sp})^2 + \frac{\partial a_0}{\partial \Gamma_m}. \quad (2.60)$$

У виразі (2.60)

$$\frac{\partial a_0}{\partial \Gamma_m} = -2\omega_p^4 \gamma^{\text{eff}} \frac{\partial \gamma^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m}; \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_2}{\partial \Gamma_m} = & \gamma^{\text{eff} 4} \left(\Gamma_c + \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma^\infty \right) + 4\gamma^{\text{eff} 3} \frac{\partial \gamma^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m} \left[\Gamma^{\infty 2} + \Gamma_c \Gamma_m + \Gamma^\infty \left(\frac{1 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_c + \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_m \right) \right] \\ & - \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \omega_p^2 \gamma^{\text{eff} 2} - \omega_p^2 \gamma^{\text{eff}} \frac{\partial \gamma^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m} \left(2\Gamma^\infty + \frac{1 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_c + \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_m \right); \end{aligned} \quad (2.62)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_4}{\partial \Gamma_m} = & -\frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \omega_p^2 + 4\gamma^{\text{eff}} \frac{\partial \gamma^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m} \left[\Gamma^{\infty 2} + \Gamma_c \Gamma_m + \Gamma^\infty \left(\frac{1 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_c + \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma_m \right) \right] + \\ & + 2\gamma^{\text{eff} 2} \left(\Gamma_c + \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma^\infty \right); \end{aligned} \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial a_6}{\partial \Gamma_m} = \Gamma_c + \frac{2 + \beta_c}{1 - \beta_c} \Gamma^\infty, \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \gamma^{\text{eff}}}{\partial \Gamma_m} = & \frac{\partial \gamma^{\text{rad}}}{\partial \Gamma_m} = -\frac{1}{9} \left(\frac{\omega_p}{c} \right)^3 \frac{V(1 - \beta_c)}{\sqrt{\Gamma_m}} \times \\ & \times \begin{cases} \frac{v_F}{R} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \beta_c^{1/3} - \frac{1}{2} \beta_c^{2/3} + \frac{1}{4} (1 - \beta_c^{2/3}) \ln \frac{1 - \beta_c^{1/3}}{1 + \beta_c^{1/3}} \right\}^{-1}, & 1^{\text{bulk}} > 2t; \\ \frac{1}{\tau^{\text{bulk}}} \left(2 - \sqrt{1 - \beta_c^{2/3}} \right)^{-1}, & 1^{\text{bulk}} \leq 2t. \end{cases} \end{aligned} \quad (2.65)$$

Отже, підставляючи послідовно співвідношення (2.38), (2.45), (2.48), (2.50), (2.54) – (2.65) у формулу (2.37) можна розрахувати розмірну залежність спектральної добротності чутливого елементу сенсора на ППР у вигляді металевої нанооболонки.

2.6 Результати розрахунків та їх обговорення

Розрахунки спектральної чутливості проводилися для двох типів чутливих елементів сенсорів: оболонкової частинки (діелектричне ядро –

металева оболонка) та біметалевої наночастинки. Параметри матеріалів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри металів [40]

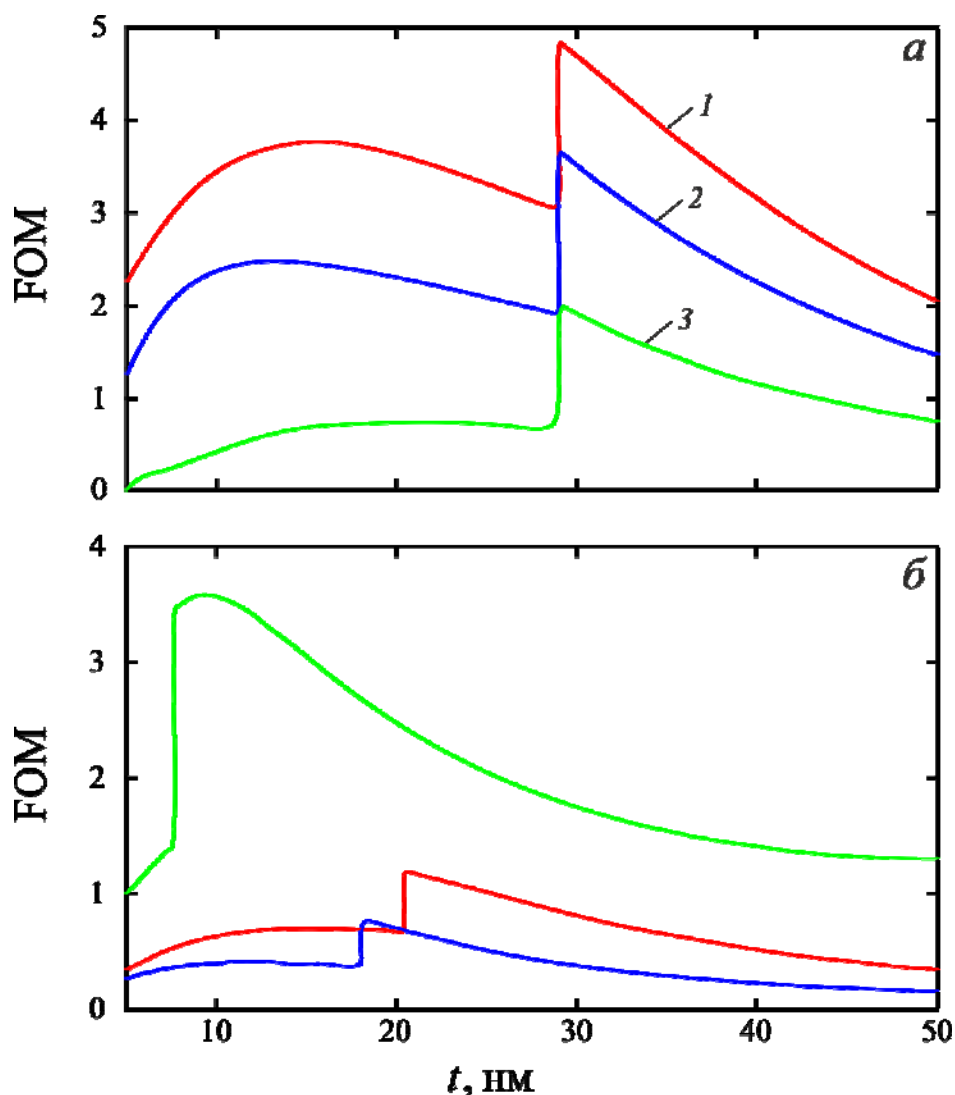
Параметр	Метал		
	Cu	Au	Ag
r_s / a_0	2,11	3,01	3,02
m^* / m_e	1,49	0,99	0,96
τ^∞	12,03	9,84	3,7
$\tau_{\text{bulk}}, \text{ фс}$	27	29	40

Таблиця 2.2 – Параметри ядра (τ_c) і матриці (τ_m)

Ядро	Матриця
SiO ₂	тефлон
2,25	2,3

На рис. 2.1, *a* наведено розмірні залежності спектральної чутливості для частинок SiO₂@Ag. Відмітимо, що спектральна чутливість збільшується зі зменшенням радіуса діелектричного ядра. Це пов'язано зі збільшенням вмісту металу у метал-діелектричній наночастинці. Крім того, для таких композитних частинок за товщини оболонки $t \approx 30$ нм (для усіх розглянутих значень радіуса ядра) має місце стрибок чутливості, який пояснюється різким збільшенням частоти поверхневих плазмонів при малій зміні діелектричної проникності оточуючого середовища. З практичної точки зору це дозволить сенсорному пристрою детектувати надмалі концентрації речовини при осіданні малої кількості її молекул на поверхню чутливого елементу.

Розмірні залежності спектральної чутливості у випадку оболонок із різних металів зображено на рис. 2.1, б. Ці результати свідчать про те, що у випадку оболонок $\text{SiO}_2@Au$, $\text{SiO}_2@Cu$ і $\text{SiO}_2@Al$ чутливість різко збільшується за значень товщини оболонки, менших, ніж для частинок $\text{SiO}_2@Ag$. Внаслідок того, що з технологічної точки зору простіше виготовляти двошарові частинки з «товстою» оболонкою, частинки $\text{SiO}_2@Ag$ матимуть беззаперечну перевагу перед іншими розглянутими композитними частинками.



а – $\text{SiO}_2@Ag$: 1 - $R_c = 10$ нм, 2 - $R_c = 20$ нм, 3 - $R_c = 30$ нм;

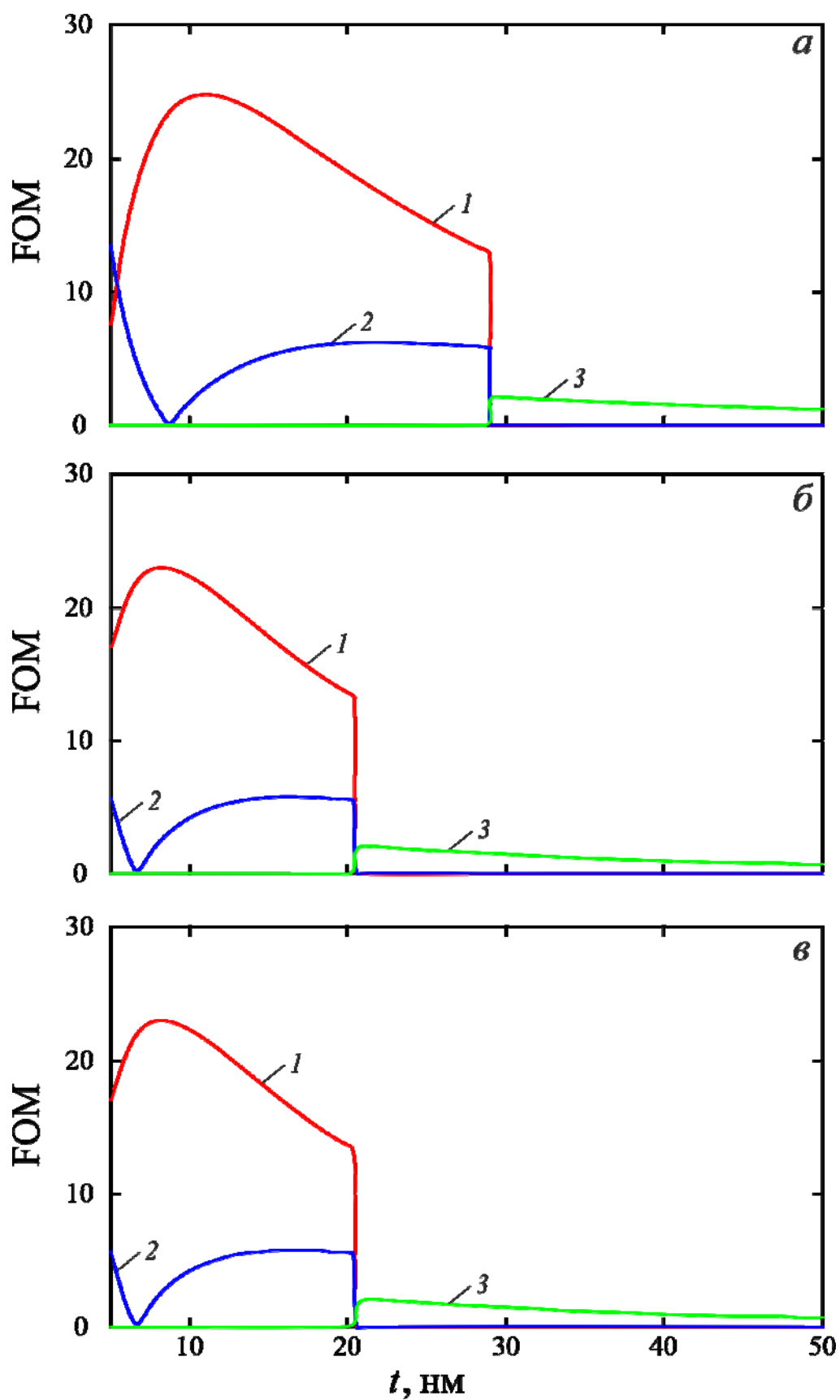
б – 1 - $\text{SiO}_2@Au$, 2 - $\text{SiO}_2@Cu$, 3 - $\text{SiO}_2@Al$

Рисунок 2.1 – Розмірні залежності спектральної чутливості оболонкових наночастинок

Результати розрахунків розмірної залежності спектральної чутливості біметалевих наночастинок різного складу наведено на рис. 2.2. Стрибок чутливості, як видно з рис. 2.2, *a* і 2.2, *в* має місце при $t \approx 30$ нм, аналогічно до випадку оболонкової частинки $\text{SiO}_2@Ag$. Проте, для біметалевих наночастинок, залежно від розміру ядра має місце як різке спадання (для всіх частинок з $R_c \approx 10$ і 20 нм у випадку $Ag@Au$), або різке зростання спектральної чутливості для всіх частинок з $R_c \approx 30$ нм (у випадку $Ag@Cu$). Вказаний факт для цих частинок також пояснюється суттєвою зміною частоти поверхневого плазмонного резонансу при незначній зміні діелектричної проникності оточуючого середовища.

При інверсії металів ядра й оболонки (рис. 2.2, *a* і 2.2, *б*) стрибок спектральної чутливості має місце при товщині оболонки $t \approx 20$ нм. Відмітимо, що в іншому графіки для частинок $Ag@Au$ і $Au@Ag$ якісно подібні і близькі кількісно.

Крім того, зауважимо, що максимальне значення чутливості досягається для частинок із $R_c \approx t \approx 10$ нм, виготовлення яких з точки зору сучасних технологій вкрай важке, тому цей випадок не має ніякого практичного значення.



a – Ag@Au; *б* – Au@Ag; *в* – Ag@Cu

Рисунок 2.2 – Розмірні залежності спектральної чутливості біметалевих наночастинок

3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В ПЕРІОД НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

3.1. Аналіз потенційних небезпек

Магістерська робота на тему "Вплив розмірних ефектів на оптичні параметри наносенсорів" носить науково-дослідний характер. Робоче місце – це невелика лабораторія, оснащена комп'ютерами і різного роду електричним обладнанням та вимірювальною технікою.

До комплексу загальних несприятливих факторів, обумовлених характером виробничого процесу та умовами праці можна віднести:

а) ураження електричним струмом внаслідок несправності електричного обладнання та порушення правил електробезпеки, відсутність чи несправність заземлюючого контуру, що може привести до електричних травм;

б) електромагнітні випромінювання від комп'ютера, включають в себе різні види випромінювання від дисплея (рентгенівське, ультрафіолетове, інфрачервоне), які можуть призвести до захворювання очей, шкіри, зниження імунітету. Слід зазначити, що в сучасних моніторах на основі світлодіодів екранів рентгенівське випромінювання відсутнє;

в) підвищене навантаження на опорно-руховий апарат, внаслідок довгого сидіння за робочим місцем (як результат - захворювання кістково-м'язового опорно-рухового апарату);

г) механічні травми через неправильну установку меблів, неправильного обладнання та оснащення робочих місць;

д) незадовільні параметри мікроклімату (знижена або підвищена вологість повітря, висока або низька температура повітря і т.д.), що може призвести до порушення стану здоров'я, погіршення самопочуття;

е) недостатнє освітлення робочих приміщень через неправильне розрахунку кількості і потужності освітлювальних пристроїв або їх несправності;

ж) перенапруження зорових і слухових органів, а також емоційні навантаження перенапруження); (Як результат – розумовий і фізичний)

з) можливість загоряння електроприладів через порушення правил пожежної безпеки, що призводить до пошкодження обладнання та до опіків робітників;

і) неправильна поведінка персоналу в умовах надзвичайних ситуаціях, через непоінформованість персоналу, або його неправильних дій.

Так як тема дипломного проекту " Вплив розмірних ефектів на оптичні параметри наносенсорів" носить дослідницький характер і передбачає проведення робіт в лабораторії, обладнаній персональними комп'ютерами з візуальними дисплейними терміналами, тому далі розглянемо заходи щодо забезпечення безпеки, виробничої санітарії, гігієни праці і пожежної безпеки для лабораторії з персональними комп'ютерами.

3.2. Заходи щодо забезпечення техніки безпеки

Для гарантування електробезпеки потрібно застосовувати нарізно або в поєднанні один з одним наступні технічні засоби: безпечна конструкція електроустановок, захисне заземлення, електричний поділ мереж, ізоляція струмоведучих частин, попереджувальна сигналізація.

Ізоляція струмоведучих частин (робоча, додаткова, посилена, подвійна) мусить дотримуватися ДСТУ 7237:2011 ССБТ «Електробезпека. Загальні вимоги безпеки і номенклатура видів безпеки».

Елементи для виконання захисного заземлення металевих неструмоведучих частин, які можуть бути під напругою (при відсутності ізоляції, недодержування режиму роботи і т.п.) повинні відповідати ДСТУ

7237:2011 ССБТ «Електробезпека. Загальні вимоги безпеки і номенклатура видів безпеки».

Захисне заземлення (занулення) здійснюється за нормами ПУЕ (Правила улаштування електроустановок). Опір заземлювального пристрою, з приєднаними нейтраліями генератора або трансформатора або виходи джерела однофазного струму, в будь-який час року має бути не більше 2, 4 і 8 Ом відповідно при лінійних напругах 660, 380 і 220В джерела трифазного струму або 380, 220 і 127В джерела однофазного струму.

Для заземлення електроустановок застосовують штучні і природні заземлювачі. Якщо при застосуванні природних заземлювачів опір заземлюючих пристроїв або напруга дотику має допустиме значення, а також забезпечуються нормовані значення напруги на заземлювальному пристрої і допустимі щільності струмів в природних заземлювачах, виконання штучних заземлювачів в електроустановках до 1кВ не являються обов'язковими. Застосування природних заземлювачів як елементів заземлюючих пристроїв не мусить спричиняти їх пошкодження при протіканні по ним струмів короткого замикання або порушення роботи приладів, з якими вони пов'язані.

Електричні мережі мають захищатися від струмів короткого замикання, що забезпечує можливий найкоротший період відключення і вимоги селективності. Захист повинен забезпечувати відключення пошкодженої ділянки при КЗ в кінці захисної лінії.

Вид ізоляції обладнання лабораторії вибирається робочим (тобто електрична ізоляція струмоведучих частин електроустановки, що забезпечує її нормальну роботу і захист від ураження електричним струмом) відповідно до ДСТУ 7237:2011 ССБТ «Електробезпека. Загальні вимоги безпеки і номенклатура видів безпеки».

Клас електротехнічних виробів за способом захисту людини від ураження електричним струмом відповідно до цього ж ГОСТом відбирається І - вироби, що мають принаймні робочу ізоляцію і елемент для заземлення. У

разі якщо виріб класу I має провід для приєднання до джерела живлення, цей провід повинен мати заземлювальну жилу і вилку з заземлюючим контактом.

Для гарантування безпеки робіт в діючих електроустановках і попередження травмонебезпечних становищ, виконуються наступні організаційні роботи відповідно до ДСТУ 7237:2011.

«Електробезпека. Загальні вимоги і номенклатура видів захисту »:

- призначення осіб, відповідальних за організацію і проведення робіт;
- оформлення роботи нарядом або усним розпорядженням;
- допуск до роботи;
- нагляд під час роботи.

Задля виключення механічних травм, відповідно до гост 12.2.124-2013 «Обладнання виробниче. Загальні вимоги безпеки до робочих місць », робоче місце, його обладнання та оснащення, що застосовуються відповідно до виду діяльності, повинні гарантувати безпеку, охорону здоров'я і працездатність працівників.

Рівень електромагнітних випромінювань не повинен порушувати вимог ГОСТ 12.1.045-84 "Електростатичні поля. Допустимі рівні на робочих місцях і вимоги до проведення контролю": допустимі рівні напруженості електростатичних полів встановлюються залежно від часу перебування персоналу на робочих місцях. Гранично допустимий рівень напруженості електростатичних полів встановлюється рівним 60 кВ / м протягом 1 години. При напруженості електростатичних полів менш 20 кВ / м час перебування в електростатичних полях не регламентується.

3.3. Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

Згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» встановлено санітарно-гігієнічні вимоги до

параметрів виробничого середовища приміщень з комп'ютерною технікою (КТ).

У виробничих приміщеннях на робочих місцях з комп'ютерною технікою повинні забезпечуватися оптимальні значення параметрів мікроклімату: температури, відносної вологості та швидкості руху повітря відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» і ГОСТ 12.1.019-79* "ССБТ. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони ».

Для мінімізації негативного впливу специфічної роботи і збереження працездатності, протягом усього робочого дня слід передбачити: забезпечення правильної «робочої пози» при «сидячому» режимі роботи, регламентовані перерви, простір і умови для мінімальної розминки і відпочинку. (СНиП 2.2.2.542-96, а також додаток 15 «Час регламентованих перерв в залежності від тривалості робочої зміни»).

Конструкція робочого столу повинна забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного обладнання з урахуванням його кількості і конструктивних особливостей (розмір ВДТ і ПЕОМ, клавіатури, пюпітра та ін.), Характеру виконуваної роботи. При цьому допускається використання робочих столів різних конструкцій, що відповідають сучасним вимогам ергономіки.

Конструкція робочого стільця (крісла) повинна забезпечувати підтримку раціональної робочої пози під час роботи на ВДТ і ПЕОМ, дозволяти змінювати позу з метою зниження статичного напруження м'язів шийно-плечової області і спини для попередження розвитку втоми.

Робочий стілець (крісло) повинен бути підйомно-поворотним і регульованим по висоті і кутам нахилу сидіння і спинки, а також відстані спинки від переднього краю сидіння, при цьому регулювання кожного параметра повинна бути незалежною, легко здійснюваною плюс надійну фіксацію.

Екран відеомонітора повинен знаходитися від очей користувача на оптимальній відстані 600 – 700 мм, але не ближче 500 мм з урахуванням розмірів алфавітно-цифрових знаків і символів.

Конструкція ВДТ повинна забезпечувати можливість фронтального спостереження екрана шляхом повороту корпусу в горизонтальній площині навколо вертикальної осі в межах $\pm 30^\circ$ і у вертикальній площині навколо горизонтальної осі в межах $\pm 30^\circ$ з фіксацією в заданому положенні. Дизайн ВДТ повинен передбачати фарбування корпусу в спокійні м'які тони з дифузним розсіюванням світла. Корпус ВДТ і ПЕОМ, клавіатура та інші блоки і пристрої ПЕОМ повинні мати матову поверхню одного кольору з коефіцієнтом відображення 0,4 ... 0,6 і не мати блискучих деталей, здатних створювати відблиски. На лицьовій стороні корпусу ВДТ не рекомендується розташовувати органи управління, маркування, будь-які допоміжні написи і позначення. При необхідності розташування органів управління на лицьовій панелі вони повинні закриватися кришкою або бути втоплені в корпусі.

Рівень очей при вертикально розташованому екрані ВДТ повинен приходиться на центр або 2/3 висоти екрана. Лінія погляду повинна бути перпендикулярна центру екрана і оптимальне її відхилення від перпендикуляра, що проходить через центр екрану у вертикальній площині, не повинно перевищувати ± 5 градусів, допустимий ± 10 градусів.

Для забезпечення оптимальної працездатності і збереження здоров'я професійних користувачів, протягом робочої зміни повинні встановлюватися регламентовані перерви. Під час регламентованих перерв з метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, усунення впливу гіподинамії і гіпокінезії, запобігання розвитку позіотонічної втоми доцільно виконувати комплекси вправ.

Для робіт, які виконуються з великим навантаженням, рекомендований 10-15 хвилинну перерву після кожної години роботи, а при інтенсивній і монотонній роботі 10-15 хвилин через кожні 2 години. Кількість мікропауз (тривалістю до 1 хвилини) регулюється індивідуально.

Проведення фізичних вправ з дозованим навантаженням протягом робочого дня рекомендується індивідуально, залежно від відчуття втоми. Гімнастика спрямована на корекцію вимушеної пози, поліпшення венозного кровообігу, часткове заповнення дефіциту рухової активності. М'язові зусилля комплексу вправ – помірні, темп середній. Після закінчення гімнастики необхідний пасивний відпочинок, тривалістю в 2-3 хвилини перед роботою.

У всіх випадках, коли виробничі обставини не дозволяють застосувати регламентовані перерви, тривалість безперервної роботи з ВДТ не повинна перевищувати 4 години.

У приміщеннях з КТ повинен бути забезпечений 3-кратний обмін повітря в годину. Для забезпечення постійних параметрів мікроклімату (температури, вологості, швидкості руху і чистоти повітря) в приміщеннях можуть бути встановлені побутові кондиціонери типу БК-1500, БК-2000, БК-2500 та ін.

Приміщення з КТ повинні мати природне і штучне освітлення. При незадовільному освітленні знижується продуктивність праці користувачів КТ, можлива поява короткозорості, швидка стомлюваність.

Природне освітлення в приміщеннях з КТ має відповідати вимогам ДБН В.2.5-28-2006 «Інженерного обладнання будівель і споруд. Природне і штучне освітлення». Природне освітлення повинно здійснюватися через світлові прорізи, орієнтовані переважно на північ або північний схід і забезпечувати коефіцієнту природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски на поверхні екранів і клавіатури, повинні бути передбачені сонцезахисні пристрої, на вікнах повинні бути жалюзі або штори. Задовільний природне освітлення легше створити в невеликих приміщеннях на 5-8 робочих місць.

Штучне освітлення в приміщеннях з робочими місцями, обладнаними комп'ютерними РС, має здійснюватися системою загального рівномірного освітлення.

Яскравість світильників загального освітлення в зоні кутів випромінювання від 50° до 90° з вертикаллю в подовжній і поперечній площинах повинна складати не більше 200 кд / м , захисний кут світильників - не менше 40° .

Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях, обладнаних ПК, повинні відповідати вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» і ДСН 3.3. 6-037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку».

Під час виконання робіт з ПК у виробничих приміщеннях значення характеристик вібрації на робочих місцях не повинні перевищувати допустимі згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» і ДСН 3.3.6-039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації».

Системи опалення та системи кондиціонування слід встановити так, щоб ні теплий, ні холодне повітря не направлявся на людей. На виробництві рекомендується створювати динамічний клімат з певними перепадами показників. Температура повітря в поверхні підлоги і на рівні голови не повинна відрізнятись більш ніж на 5 градусів. У виробничих приміщеннях крім природної вентиляції передбачають припливно-витяжну вентиляцію. Основним параметром, що визначає характеристики вентиляційної системи, є кратність обміну, тобто скільки разів за годину зміниться повітря в приміщенні.

Нижче наведено розрахунок загального рівномірного штучного освітлення приміщення методом світлового потоку:

1.1. Вихідні дані:

Довжина приміщення (A)=8 м

Ширина (B)=6 м

Висота (H)=3,5 м

$E_n=200$ мк

$h.p=0,8$ м

РЗР = III (б) Рівень нормованого загального освітлення E_n . За умовою $E_n=200$ мк

1.2. Тип світильника виходячи з того, де він буде використовуватись:

За умовою $h.p=0,8$ м, то тип світильника - **ЛВП**. Його світлорозподіл переважно прямий(косинусна), **$L/h=1,3$; $IP=54$**

1.3. Визначити ступінь захисту світильників **$IP(1)(2)$** (International Protection) від пилу (перша цифра) - присутній захист від пилу та вологи (друга цифра) – присутній захист від бризок

1.4. Оцінити коефіцієнт запасу k_3 освітленості, який враховує зниження рівня освітленості з часом в результаті забруднення та старіння ламп, світильників і поверхонь приміщення **$k_3=1,5$**

1.5. Розрахувати кількість рядів світильників у приміщенні N_p :

$N_p =$, шт.

де: B – ширина приміщення, м;

H – висота приміщення, м;

h_p – висота робочої поверхні, м;

$[L/h]$ – числове значення коефіцієнта світильника $N_p =$

$$\frac{6}{(3,5 - 0,8) \cdot 1,3} = 1,71 \approx 2 \text{ ряди}$$

1.6. Визначити максимально припустиму відстань між рядами світильників

$$L_{\max} = \quad ; L_{\max} = \frac{6}{2} = 3$$

1.7. Розрахувати висоту підвісу світильника над робочою поверхнею h :

$$h = \frac{L_{\max}}{\left[\frac{L}{h}\right]} ; h = \frac{3}{1,3} = 2,31 \quad (\text{м})$$

1.8. Знайти висоту звисання світильника від стелі $h_3 = H - h_p - h$; $h_3 = 3,5 - 0,8 - 2,31 = 0,4$ (м)

1.9. Визначити значення індексу приміщення i , що характеризує співвідношення розмірів освітлювального приміщення і висоти розміщення світильників:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} ; i = \frac{48}{2,3 \times 14} \approx 1,5$$

1.10. Визначити значення коефіцієнта використання світлового потоку η , створюваного світильниками вибраного типу. Вибирається в залежності від виду джерела світла, типу обраного світильника, коефіцієнтів відбиття поверхонь приміщення та індексу приміщення

За умовою $\rho_{\text{ст}} = 50\%$, $\rho_{\text{с}} = 30\%$, $\rho_{\text{п}} = 10\%$

Тоді $\eta = 49\%$

1.11. Визначити сумарний світловий потік освітлювальної установки у даному приміщенні Φ_{Σ} : z – коефіцієнт нерівномірності (мінімальної) освітленості (відношення середньої освітленості до мінімальної освітленості), як правило дорівнює: $z = 1,1$ – для люмінісцентних ламп низького тиску

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot A \cdot B \cdot k_z \cdot z}{\eta} = \frac{200 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{49\%} = 32326,53$$

1.12. Визначити умовну загальну кількість світильників у приміщенні

$$\frac{8 \cdot 6}{9}$$

$$N_{\text{св.}}^* = \frac{A \cdot B}{L_{\text{max}}}; N_{\text{св.}}^* = 5,3 \approx 6 \text{ шт.}$$

1.13. Розрахувати світловий потік умовного джерела світла

$$\Phi_{\text{л}}^* =$$

$N_{\text{л}}^*$ - загальна кількість ламп у світильнику, яка розраховується

$N_{\text{л}}^* = N_{\text{св.}}^* \cdot n$, n -кількість ламп у світильнику. За умовою їх 2

$$N_{\text{л}}^* = 6 \cdot 2 = 12, \Phi_{\text{л}}^* = \frac{32326,53}{12} = 2693,88$$

1.14. Вибрати тип стандартної лампи з найближчим значенням фактичного

світлового потоку лампи $\Phi_{\text{л}}$, і знайти коефіцієнт $m =$

Тип стандартної лампи – ЛД, $\Phi_{\text{л}} = 2500$

$$m = \frac{2693,88}{2500} = 1,08$$

1.15. Визначити оптимальну (фактичну) кількість світильників у приміщенні:

$$N_{\text{св.}} = N_{\text{св.}}^* \cdot m; N_{\text{св.}} = 6 \cdot 1,08 = 6,48 \approx 6 \text{ шт.}$$

1.16. Визначити фактичну кількість ламп у приміщенні $N_{\text{л}} = N_{\text{св.}} \cdot n$, шт.

$$N_{\text{л}} = 6 \cdot 2 = 12 \text{ шт.}$$

1.17. Визначити загальну розрахункову освітленість E_p у приміщенні, що створюється при застосуванні стандартних ламп $E_p =$;

$$E_p = \frac{2500 \cdot 12 \cdot 49\%}{6 \cdot 8 \cdot 1,1 \cdot 1,5} = 185,61$$

$E_p = (-10\% \dots + 20\%) \cdot E_n$, лк – рівність виконується

1.18. Розрахувати загальну потужність освітлювальної установки P_Σ :

$P_\Sigma = N_L \cdot P_L$, Вт; $P_\Sigma = 12 \cdot 40 = 480$ Вт; P_L - потужність вибраної стандартної лампи

1.19. Ескіз розташування світильників на плані приміщення, враховуючи розмірів світильників.

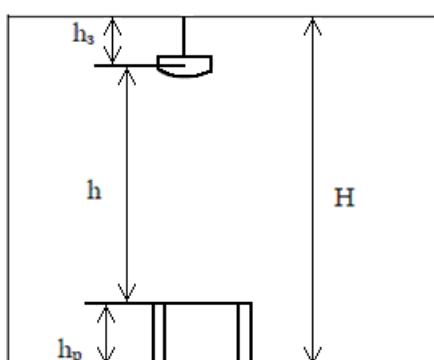


Схема розміщення світильників над робочою поверхнею (H – висота приміщення=3,5 м; h_s – висота звисання світильника від стелі=0,4 м; h – висота підвісу світильника над робочою поверхнею=2,31 м; h_p – висота робочої поверхні=0,8 м.)

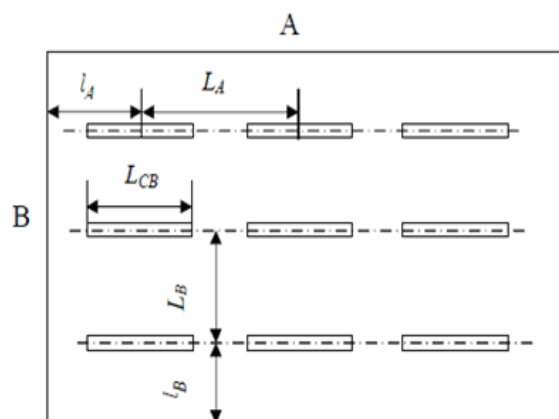


Схема розміщення світильників (з люмінесцентними лампами) у приміщенні
 (A – довжина приміщення=8 м; B – ширина приміщення=6 м;
 L_A – відстань між центрами сусідніх світильників в ряду=2,7 м;
 l_A – відстань від крайніх світильників у ряду до стіни=1,3 м;
 L_B – відстань між рядами світильників=3 м; l_B – відстань від крайніх рядів світильників до стіни=1,5 м; L_{CB} – довжина обраного світильника,=0,955 м;

3.4. Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

Аварії технічних систем є найбільшою небезпекою для життєдіяльності. Причинами можуть стати стихійні лиха, порушення режимів технологічних процесів, а також невиконання правил техніки безпеки. Попереджувальними заходами таких ситуацій являються прогнозування, виявлення і періодичний контроль за змінами обстановки, оповіщення персоналу організації.

Необхідність рішення проблем безпеки викликає задачу формування цілісної системи знань з проблем охорони праці, необхідних для прийняття в будь-яких кризових ситуаціях вивірених рішень щодо безпеки людини, колективу, підприємства, галузі, регіону й суспільства в цілому. У межі промислової діяльності рівень виробничого травматизму залишається високим, причинами якого є ряд чинників. Для запобігання аварій, виробничого травматизму та інших небезпечних явищ конструкція обладнання на механічній дільниці повинна відповідати вимогам національних стандартів та технічному регламенту безпеки, а дотримання нормативно - правових актів забезпечить можливість виключити ризики травмування та зберегти здоров'я робітників.

3.4.1. Заходи з пожежної безпеки

Згідно СНиП 2.09.02-85 "Виробничі будівлі" виробничо лабораторне будівля повинна мати ступінь вогнестійкості не нижче III. Категорія вибухо-пожежебезпеки – Д.

У приміщеннях і коридорах слід передбачати димовиділення на випадок пожежі відповідно до СНиП 2.04.05-86.

Для евакуації людей у разі виникнення пожежі СНиП 2.09.02-85 допускає організацію одного евакуаційного виходу з приміщення, розташованого на будь-якому поверсі (крім підвальних та цокольного), якщо цей вихід веде до двох

евакуаційних виходів з поверху, відстань від найбільш віддаленого робочого місця до виходу з приміщення не перевищує 25 м і чисельність працюючих в найбільш численній зміні не перевищує 25 чол.

Відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу з приміщення безпосередньо назовні або в сходову клітку для будівель категорії Д не регламентується.

Згідно ГОСТ 12.1.004-85, пожежна безпека об'єкта повинна забезпечуватися системами запобігання пожежі, протипожежного захисту та організаційно-технічними заходами.

Системи пожежної безпеки повинні характеризуватися рівнем забезпечення пожежної безпеки людей та матеріальних цінностей, а також виконувати одну з наступних завдань: виключати виникнення пожежі; забезпечувати пожежну безпеку людей і / або матеріальних цінностей.

Об'єкти повинні мати системи пожежної безпеки, спрямовані на запобігання впливу на людей небезпечних факторів пожежі, в тому числі їх вторинних проявів на необхідному рівні.

Під активною боротьбою з пожежею розуміють гасіння пожежі з застосуванням засобів пожежогасіння. До цих засобів відносять різні вогнегасники, їх ділять по типу наповнення на порошкові і вуглекислотні, пісок, негорючі матеріали, будь-які матеріали та засоби, які перешкоджають поширенню вогню і горіння матеріалів.

Небезпечними факторами пожежі, які впливають на людей і матеріальні цінності, є: полум'я та іскри; підвищена температура навколишнього середовища; дим; знижена концентрація кисню.

До вторинних проявів небезпечних факторів пожежі, яке впливає на людей і матеріальні цінності, відносяться: осколки, частини зруйнованих апаратів, агрегатів, установок, конструкцій; токсичні речовини і матеріали, що вийшли із зруйнованих апаратів і установок; електричний струм, що виник в результаті

винесення високої напруги на струмопровідні частини конструкцій, апаратів, агрегатів; вогнегасники речовини.

Електрична проводка в будівлі повинна бути ізольована, так як це знижує ризик виникнення замикання і виникнення в результаті цього вогню. Кабель, провід повинен бути прокладений по негорючому основі. Для того, щоб знизити ризик короткого замикання встановлюють прилади УЗО, автоматичні, плавкі запобіжники. Газові й електричні плити повинні бути ізольовані від дерев'яних меблів. Розетки на зовнішніх стінах будівлі і в санвузлах повинні бути ізольовані від попадання вологи.

Так як в ПК використовується електроніка, то виниклу пожежу не можна гасити водою, так як це може призвести до короткого замикання і виникнення нових вогнищ пожежі. Для гасіння електроустановок використовують вуглекислий газ, піну або порошкові склади. Первинним засобом пожежогасіння вуглекислим газом є ручні вогнегасники типу ОУ-2, ОУ-5. Для гасіння вогню необхідно застосовувати вогнегасники цих типів.

Для виявлення початкової стадії загоряння та оповіщення служби пожежної охорони використовуються системи автоматичної пожежної сигналізації (АПС). Крім того, вони можуть самостійно пускати в хід установки пожежогасіння, коли пожежа ще не досяг великих розмірів. Системи АПС складаються з пожежних сповіщувачів, ліній зв'язку та прийомних пультів (станцій). Ефективність застосування систем АПС визначається правильним вибором типу сповіщувачів та місць їх установки. При виборі пожежних сповіщувачів враховувалися конкретні умови їх експлуатації: особливості приміщення і повітряного середовища, наявність пожежних матеріалів, характер можливого горіння, специфіка технологічного процесу тощо.

Відповідно до "Типових правил пожежної безпеки для промислових підприємств" приміщення кімнати, як і суміжні приміщення, обладнуються димовими пожежними сигналізаціями, оскільки в приміщеннях на початку пожежі

при горінні різних пластмасових, ізоляційних матеріалів і паперових виробів виділяється значна кількість диму і мало теплоти. Об'єкти будівлі, в якому знаходиться кімната, крім АПС обладнані установками стаціонарного автоматичного пожежогасіння. Найбільш доцільно застосовувати установки газового гасіння пожежі, дія яких заснована на швидкому заповненні приміщення вогнегасною газовим речовиною з різким зниженням вмісту в повітрі кисню.

3.4.2. Засоби індивідуального захисту

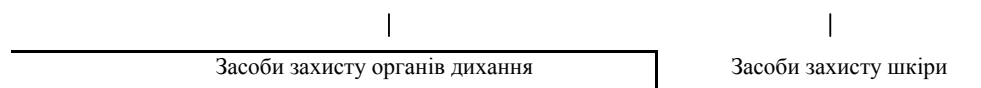
Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) — засоби, використані працівником для згладжування дії шкідливих і небезпечних умов праці, а також для захисту від забруднення.

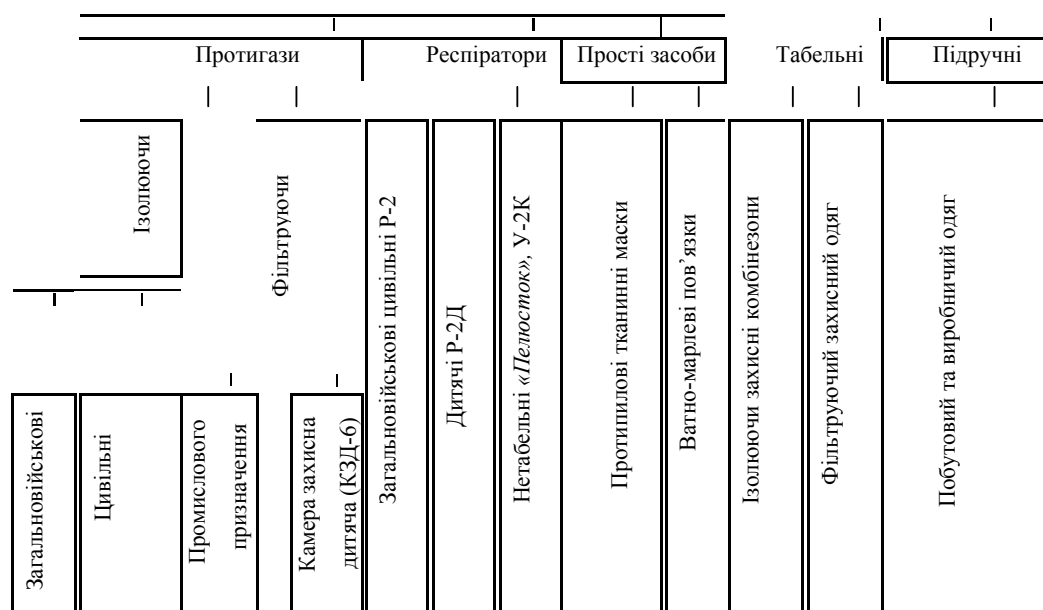
Індивідуальний вид захисту - це виконання прийомів індивідуального захисту дихальних шляхів, шкіри, а також медичних засобів захисту. Цей спосіб використовується у мирний час в умовах підвищеної радіоактивності, в заражених сильнодіючими отруйними речовинами зонах, районах біологічного зараження, місцях стихійних лих. Під час надзвичайної ситуації і надзвичайного стану всі заходи для захисту населення передбачають використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

Засоби індивідуального захисту потрібні для захисту від потрапляння у середину організму людини, а також на шкіру та одяг отруйних речовин, сильнодіючих отруйних речовин, радіоактивних речовин та бактеріальних (біологічних) засобів ураження.

До ЗІЗ належать засоби захисту органів дихання і засоби захисту шкіри.

Класифікація засобів індивідуального захисту:





ЗІЗ бувають фільтруючі та ізолюючі, залежно від способу захисту.

Фільтрація зводиться до того, що повітря, яке проходить у засобах захисту органів дихання через фільтри, шар активованого вугілля, залишається без шкідливих домішок і подається в організм людини чистим.

Індивідуальні засоби захисту ізолюючого типу, виготовлені з матеріалів, що не пропускають заражене повітря, повністю ізолюють організм людини від навколишнього середовища.

За способом виготовлення засоби індивідуального захисту поділяються на виготовлені промисловістю і найпростіші, або підручні, які виготовлені з підручних матеріалів.

Засоби індивідуального захисту є табельні, забезпечення якими передбачається табелями (нормами) оснащення залежно від організаційної структури формувань цивільного захисту, і підручні (не табельні), як доповнення до табельних засобів або для заміни їх.

Для захисту органів дихання людей у системі цивільного захисту є протигazi. Вони захищають органи дихання, обличчя й очі людини від радіоактивних речовин, небезпечних хімічних сполук і бактеріальних речовин, які є в повітрі.

Для того щоб індивідуальні засоби захисту органів дихання забезпечували надійний заслон, вони повинні виконувати такі вимоги:

- гарантування низької опірності диханню для зменшення втоми;
- подачу чистого повітря без його забруднення через підсос;
- запобігати запотіванню окулярів через подачу сухого повітря;
- мати малий мертвий об'єм для унеможливлення вдихання вдруге повітря,

що видихається;

- легко і швидко збиратись;
- не заважати роботі в місцях з обмеженим доступом повітря;
- бути легкими і міцними;
- підтримувати задовільний рівень комфортності, стимулюючи

використання, знижувати втому і сприяти зосередженню уваги користувача;

- мати низький рівень шуму дихального клапана, не відволікаючи працівника;

- мати переговорну мембрану, яка швидко може замінитись на радіо-переговорний пристрій.

4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

4.1 Стейкхолдери

Інтеграція України в європейський та світовий бізнес вимагає адаптації до правил господарювання та імплементації основоположних принципів діяльності в практику українського підприємництва. Ратифікація Україною європейських стандартів потребує на прийняття рішень за ціннісно-орієнтованим підходом, тобто за цінністю для стейкхолдерів. Відносини зі стейкхолдерами є основою сталого розвитку підприємству. Врахування впливу інтересів стейкхолдерів при прийнятті рішень дозволяє підприємству отримати достовірну оцінку своєї діяльності та краще розуміти власні ризики й можливості.

Важливу роль у визначенні взаємовідносин зі стейкхолдерами відіграє обраний інструментарій. У світовій практиці налічується значна кількість корисних інструментів, що використовуються для покращення взаємодії зі стейкхолдерами, проте найефективнішим серед них залишається оцінювання рівня задоволення інтересів (очікувань) стейкхолдерів.

Проаналізуємо опис ідеї та занесемо дані в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувачів
Виготовлення оптичного сенсора	Технологічний процес	Закупівля якісного матеріалу та спеціальне технічне обладнання .
	Виготовлення	Вироблення більш якісної продукції та більш дешевої продукції.

Проаналізуємо ринкові можливості запуску реалізації ідеї та характеристику потенційного ринку та занесемо дані в таблицю 4. 2;

Таблиця 4.2 Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Головні конкуренти	Харківський машинобудівельний завод «ФЕД», Київський VD MAIS
2	Динаміка ринку	Нейтральна
3	Наявність обмежень для входу	Вузька специфіка ринку
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Наявність сертифікатів МО України та УРДДАУ

Визначимо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, і сформуємо орієнтовний перелік вимог до послуг для кожної групи, дані занесемо в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 Попередня характеристика потенційних клієнтів

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
1	Виготовлення	Організації які експлуатують військову техніку	Договір	Якісна продукція
2	Ремонт	Організації які експлуатують військову техніку	Договір	Якісний ремонт

Здійснимо SWOT-аналіз середовища реалізації інноваційного проекту та занесемо дані в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 SWOT-аналіз підприємства

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
-----------------	-----------------

- Сучасне обладнання - Своєчасне постачання - Зменшується вплив людського фактора при виготовлення - Високого кваліфікація виконавців - Наявність держзамовлення	- Закупівля матеріалу за кордоном , та її поставка - Робітники високо кваліфіковані пенсіонери
Можливості:	Загрози:
- Якісний ремонт Можливість збільшити обсяг виготовлення продукції	- Відсутність попиту на ринку збиту - Перебої з фінансуванням замовлень - -

Ідентифікуємо стейкхолдерів та здійснимо їх пріорітезацію та побудуємо Карту стейкхолдерів (рис.4.1), яка дозволить візуалізувати картину взаємозв'язків стейкхолдерів.

Зацікавлені сторони по відношенню до організації можуть бути як зовнішніми, так і внутрішніми. До зовнішніх зацікавлених сторін відносяться клієнти, кредитори, постачальники, представники органів державної та місцевої влади, громадські організації, засоби масової інформації, а серед внутрішніх зацікавлених сторін називають власників, вище керівництво, робітників.

Відображення взаємозв'язків стейкхолдерів на Kartі відокремлено в три концентричних області, в яких розміщено всіх зацікавлених осіб інноваційного проекту за можливостями впливу на них ініціатора проекту. Область внутрішніх стейкхолдерів – область повноважень/відповідальності ініціатора.

Ініціатором виступає відділ технічного контролю, який вимагає покращення технічних характеристик оптичних сенсорів.

Залежні зацікавлені сторони формально ініціатору проекту не підлеглі, проте тісні ділові стосунки потребують на пошук взаємовигідних рішень та компромісів.

Інвестором виступає адміністрація підприємства, яка забезпечує фінансування проекту.

Науковою організацією виступає технічний відділ підприємства, який забезпечує розробку стендів і технічної документації. На периферії ж знаходяться зовнішні зацікавлені сторони. Це область стейкхолдерів опосередкованого впливу на успішність реалізації інноваційного проекту.

Споживачем є виробництво підприємства, яке експлуатує дані сенсори і дозволяє їх виготовляти.

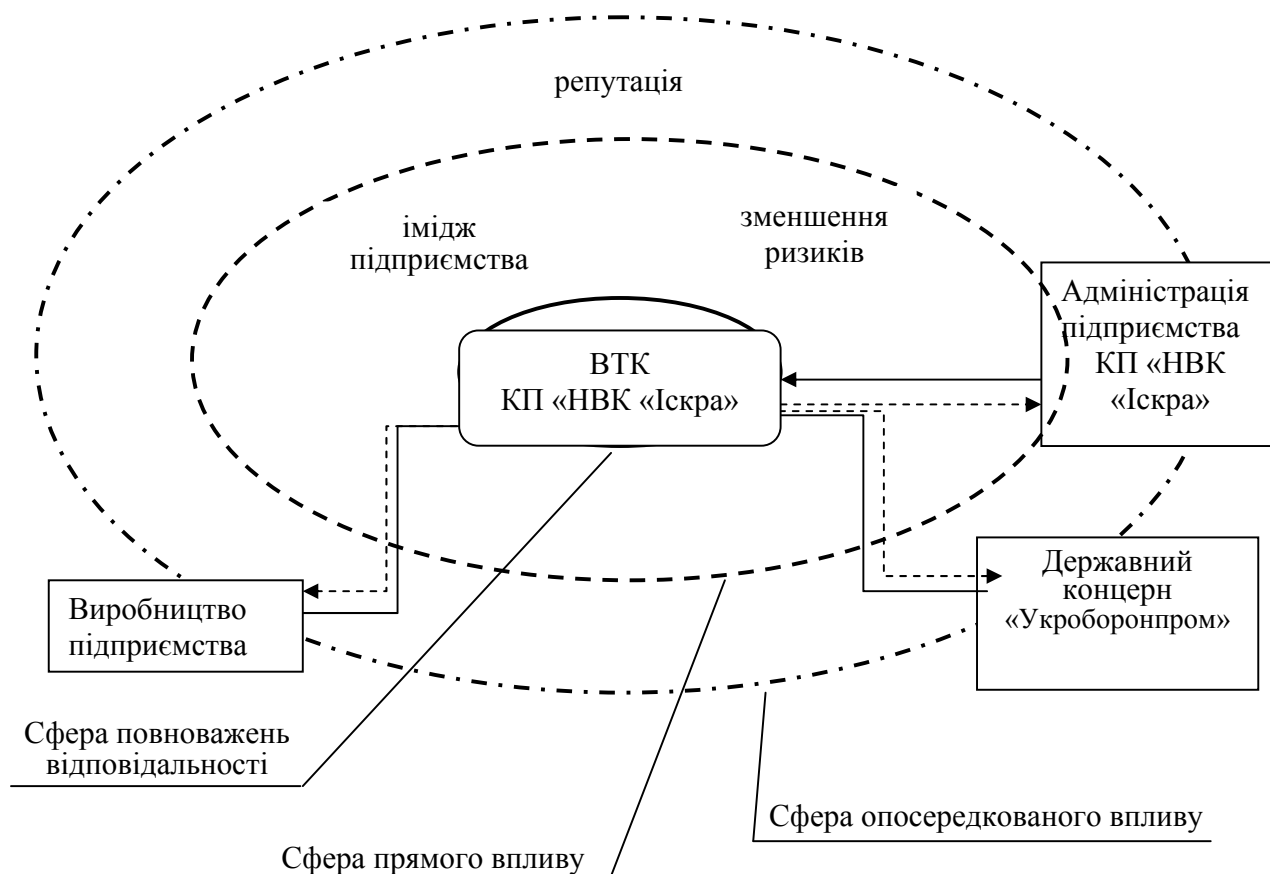


Рисунок 4.1 Карта стейкхолдерів

4.2 Визначення трудомісткості та тривалості роботи

Науково-дослідницька робота поділена на етапи. Для кожного етапу вказані їх назви, виконавці, трудомісткість та строк робіт. В даній роботі беруть участь один молодший науковий співробітник і один старший науковий співробітник. Значення тривалості та трудомісткості всіх робіт наведені в таблиці 4.5.

В зв'язку з тим, що важко встановити трудомісткість виконання робіт, в процесі виконання більшості науково-дослідницьких робіт, використовується

ймовірнісний метод. При цьому використовують дві або три вірогідних оцінки часу. Ці оцінки є вихідними для розрахунку очікуваного часу виконання роботи за формулою 4.1:

$$t_{\text{оч}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min}} + 2t_{\text{max}}}{5}, \quad (4.1)$$

де $t_{\text{оч}}$ – очікувана оптимальна оцінка часу виконання роботи, днів;

t_{min} – мінімально необхідний час на виконання роботи при найбільш сприятливих умовах, днів;

t_{max} – максимальні витрати часу на виконання роботи за несприятливих умов, днів.

Правильність визначення визначається за допомогою дисперсії (різниці між максимальним та мінімальним часом виконання певного етапу (НДР):

$$\sigma = \frac{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}}{5}, \quad (4.2)$$

Таблиця 4.5 – Оцінка довготривалості та трудомісткості етапів робіт

	Етапи науково-дослідницької роботи (НДР)	Часові оцінки НДР, днів			Дисперсія	Виконавці		Тривалість днів
		t _{min}	t _{max}	t _{оч}		Спеціальність	Число, чол.	
	Підбір літератури,	4	7	5	0,6	Молодший науковий	1	5

	отримання технічного завдання							
	Розгляд готових теоретичних моделей систем.	1 6	2 4	19	1,6	співробітник	1	19
	Створення комп'ютерних моделей, моделювання в середовищі Mathcad	1 6	2 1	18	1		1	16
	Аналіз результатів моделювання	7	1 1	9	0,8	Молодший науковий співробітник, старший науковий робітник	2	10
5	Порівняння технологій за результатами комп'ютерного моделювання	7	14	10	1,4	Молодший науковий співробітник	1	10

6	Висновки та пропозиції	5	8	6	0,6	Молодший науковий співробітник, старший науковий співробітник	2	6
	Разом	5 7	8 8	6 9	–	–	2	66

Науково-дослідницьку роботу треба виконувати поетапно, оскільки без результатів попереднього етапу неможливо починати наступний етап. Дані з таблиці 4.5 складаються в лінійний календар, який представлено на рисунку 4.2.

4.3 Підрахування кількості витрат на реалізацію дипломного проекту

При розрахунку затрат на реалізацію дипломного проекту враховуються всі матеріальні витрати, необхідні для виконання всіх робіт. Дана методика передбачає по-перше первинне обчислення основної заробітної плати, а вже після цього – відсоткових частин інших статей витрат на реалізацію проекту.

Статті, витрати за якими можуть бути розраховані більш точно, розраховуються за звичайною методикою.

Для того, щоб з'ясувати кількість грошових витрат, потрібно зробити кошторис витрат, до якого входять:

- обладнання для здійснення роботи;
- покупні вироби і матеріали;
- обчислення заробітної плати;
- відрахування на єдиний соціальний внесок;
- накладні витрати.

4.3.1 Обладнання для виконання науково-дослідницької роботи

До переліку витрат на спеціальне обладнання входять витрати на ноутбук та принтер. Ноутбук необхідний для виконання розрахунків, моделювання. Був вибраний саме ноутбук через його мобільність. Кошторис витрат на спеціальне обладнання зведений в таблиці 4.6.

Амортизаційні відрахування визначаються за формулою:

$$A = \frac{B_0 * H_a * T}{100 * 12 * 8 * 21}, \quad (4.3)$$

де

A – амортизаційні відрахування, грн;

B_0 – балансова вартість, грн;

H_a – норма амортизації на повне відновлення спеціального обладнання, 60%;

T – час використання спеціального обладнання на рік, годин. $T=8 \text{ год} * 21 \text{ роб день} * 12 \text{ місяців} = 2016 \text{ годин}$.

$$A_{\text{ноут}} = \frac{19999 * 60 * 2016}{100 * 12 * 8 * 21} = 11999,40 \text{ грн,}$$

Результати заносимо до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Обчислення вартості обладнання

Обладнання	Модель	Кількість, штук	Вартість, грн.	Строк експлуатації, років	Амортизація річна, грн
Ноутбук	Ноутбук Asus VivoBook S14 S430UN- EB113T	1	19999	4	11999,40
Усього			11075		

4.3.2 Розрахунок вартості матеріалів

В цьому пункті йдеться про затрати на основні та допоміжні матеріали, потрібні для реалізації дипломного проекту. Під час виконання науково-дослідницької роботи були використані матеріали, вартість яких описана в таблиці 4.7:

Таблиця 4.7 – Вартість основних та допоміжних матеріалів

	Кількість, шт	Ціна, грн	Вартість, грн
Папір А4	200	0,25	50
Заправка катриджу	1	210	210
Ручка	2	4,35	8,70
Олівець	2	5	10
Разом			278,70

4.3.3 Розрахунок заробітної плати

Заробітна плата – грошова винагорода за виконану працівником роботу, яка залежить від кваліфікації працівника, робочого дня, об'єму виконаної роботи, її важкості, ступені шкідливих умов при їх наявності тощо. Також до неї входять премії та компенсації. Розрізняють основну та додаткову заробітну плату. В табл. 4.8 представлені витрати на основну заробітну плату:

Додаткова заробітна плата – це 10% від основної. Витрати на додаткову заробітну плату зведені в таблицю 4.9:

Таблиця 4.8 – Витрати на основну заробітну плату

Посада працівника	Чисельність працівників, чол.	Щомісячний оклад, грн	Середньоденний оклад, грн	Кількість робочих днів	Загальна заробітна плата, грн
Старший науковий	1	9000	428,57	16	6857,12

співробітник					
Молодший науковий співробітник	1	5200	247,62	66	16342,92
Всього	2	–	–	–	23200,04

Таблиця 4.9 – Витрати на додаткову заробітну плату

Посада робітника	Додаткова заробітна плата, грн	Сума основної та додаткової заробітної плати, грн
Старший науковий співробітник	685,71	7542,83
Молодший науковий співробітник	1634,29	17977,21
Всього	2320	25520,04

4.3.4 Відрахування на єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок – це страховий внесок. Він визначається в розмірі 22% від суми основної та додаткової заробітних плат.

$$\text{ЄСВ} = (\text{ЗП}_{\text{осн}} + \text{ЗП}_{\text{дод}}) 0,22 = 25520,040,22 = 5614,41 \text{ грн}, \quad (4.4)$$

де $\text{ЗП}_{\text{осн}}$ та $\text{ЗП}_{\text{дод}}$ – основна та додаткова заробітна плата відповідно.

4.3.5 Накладні витрати

Накладні витрати обчислюються в процентному співвідношенні і складають 25% від основної заробітної плати працівників.

$$NB = 3\Pi_{\text{осн}} 0.3 = 23200,04 \cdot 0.25 = 5800,01 \text{ грн.} \quad (4.5)$$

4.3.6 Витрати на електроенергію

Витрати на електроенергію обчислюються наступним чином

$$B_E = T_p \cdot 2,68, \quad (4.6)$$

де T_p – час роботи обладнання в період виконання роботи.

$$T_p = 8 \cdot 66 = 528 \text{ годин.}$$

Тоді

$$B_E = T_p \cdot 2,68 = 528 \cdot 2,68 = 1415,04 \text{ грн.} \quad (4.7)$$

В таблиці 4.10 зведені всі витрати на виконання даної науково-дослідницької роботи:

Таблиця 4.10 – Кошторис витрат для реалізації НДР

Стаття витрат	Сума, грн	Питома вага, %
Основна заробітна плата	23200,04	32,85
Додаткова заробітна плата	2320	3,28
Обладнання	19999	28,32
Амортизація	11999,40	17
Матеріали	278,70	0,39

Електроенергія	1415,04	2
Накладні витрати	5800,01	8,21
Відрахування на єдиний соціальний внесок	5614,41	7,95
Усього	70626,6	100

4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-дослідницької роботи

Для теоретичних розрахунків майже завжди складно чи навіть неможливо обчислити економічний коефіцієнт. Через це раціонально буде з'ясувати їх техніко – економічну ефективність з огляду на наступні ознаки:

- потрібність дослідження;
- складність проекту;
- плідність і перспективність застосування.

Потрібність теоретичного дослідження визначають за його призначенням:

- технологічні інновації;
- вирішення складних проблем;
- відповідати вимогам спеціальної техніки.

Складність впровадження проекту визначається порівнянням отриманих результатів цього проекту з результатами схожих загальновідомих досліджень, беручи до уваги, на затрати трудових та грошових ресурсів.

Результативність цього проекту визначається по повноті рішень поставленої проблеми.

Техніко-економічна ефективність визначається за формулою

$$K_{\text{ндр}} = \frac{J^n RT}{B_{\text{ндр}} t_{\text{ндр}}}, \quad (4.8)$$

де $K_{\text{ндр}}$ – ступінь ефективності дослідження (коефіцієнт техніко – економічної ефективності НДР);

$J = 2$ – важливість роботи. Значення було обрано через те, що подібні результати були відомі в досліджуваній області і не несуть принципової новизни;

$R = 2$ – результативність роботи;

$T = 5$ – технічна складність виконання НДР. Значення показника відповідало наступному параметру – робота виконується одним підрозділом, загальні витрати на проведення НДР складають 50000 - 100000 грн.;

$B_{\text{ндр}} = 70626,6$ грн. – витрати на реалізацію НДР;

$t_{\text{ндр}} = 66$ днів – час проведення НДР;

$n = 1$ – показник використання результатів НДР (результати НДР використовуються в дослідно-конструкторських роботах);

γ – питома вага одного балу, грн.

Дані показники визначаються з таблиць 4.7, 4.8, 4.9, 4.10

Таблиця 4.11 - Шкала для оцінки важливості розробки $K_{\text{ндр}}$

№ з/п	Показник	Бали
1	Ініціативна робота, що не є частиною комплексної програми, або завданням відомчих органів	1
2	Робота, виконувана за договором про науково-технічну допомогу	3
3	Робота представляє частину відомчої програми	5
4	Робота представляє частину відомчої комплексної програми	7

5	Робота представляє частину міжнародної комплексної програми	8
---	---	---

Отримані кінцеві результати покажуть то, що дослідницька робота не є частиною комплексних програм чи завданням відомчих органів.

Таблиця 4.12 - Шкала оцінки можливості використання результатів розробки n

№ з/п	Показник	Бали
1	У даному підрозділі	1
2	У даній організації	3
3	У багатьох організаціях	5
4	У масштабах країни	8

Обрали значення показника n=1, бо результати НДР використовуються в дослідно-конструкторських роботах, у даному підрозділі.

Таблиця 4.13 – Шкала оцінки теоретичної значимості й рівня новизни дослідження J

№ з/п	Показник	Бали
1	Аналіз, узагальнення й класифікація відомої інформації. Подібні результати були відомі в досліджуваній області	2
2	Одержання нової інформації, що доповнює знання про сутність досліджуваних процесів, не відомі в досліджуваній області	3

3	Одержання нової інформації, що змінює уявлення про сутність досліджуваних процесів, не відомої раніше	5
4	Створення нових теорій, методик	6
5	Одержання інформації, що сприяє формуванню напрямків, не відомих раніше	8

Таке значення обрали, тому що результати роботи являються базовим матеріалом для моделювання активних елементів і рекомендуються для подальшого розвитку радіоелектроніки.

Таблиця 4.14 – Шкала оцінки показників складності T

№ з/п	Показник	Бали
1	Робота виконується одним підрозділом, витрати менш 10000 грн.	1
2	Робота виконується одним підрозділом, витрати 10000 - 50000 грн.	3
3	Робота виконується одним підрозділом, витрати 50000 - 100000 грн.	5
4	Робота виконується за участю багатьох підрозділів, витрати 100000 - 500000 грн.	7
5	Робота виконується декількома організаціями, витрати понад 500000 грн.	8

Так як технічна складність виконання НДР виконується одним підрозділом і витрати на дослідження складають більше 50 тис грн, обираємо показник $T = 5$.

$$K_{\text{ндр}} = \frac{f^{\text{ндр}} \cdot R \cdot T}{V_{\text{ндр}} \cdot t_{\text{ндр}}} = \frac{2^1 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 1000}{70626,6 \cdot 0,189} = 1,498. \quad (4.9)$$

В цьому розділі була обґрунтовано економічної ефективності науково – дослідницької роботи. Обчислено, що строк виконання науково-дослідницької роботи вимірюється у терміні приблизно 66 днів. При цьому загальні затрати на роботу дорівнюють 70626,6 грн, з них:

- основна та додаткова заробітна плата – 25520,04 грн (36,13 %);
- накладні витрати – 5800,01 грн (8,21 %);
- обладнання – 11999,40 грн (17 %);
- покупні вироби і матеріали – 278,70 грн (0,39 %);
- відрахування на соціальне страхування – 5614,41 грн (7,95 %);

Розрахунок економічної ефективності ґрунтується на таких складових, як важливість дослідження, складності розробки, результативність й можливість використання. Отриманні данні показують на доцільність проведення НДР, оскільки коефіцієнт КНДР складає 1,845. Ці дані відповідають вимогам до результативності робіт.

ВИСНОВКИ

Одержано розмірні залежності спектральної добротності для двошарових сферичних наночастинок різного складу і морфології, використовуваних в якості чутливих елементів сенсорів на поверхневому плазмонному резонансі. Розрахунки спектральної чутливості проводилися для двох типів чутливих елементів сенсорів: оболонкової частинки (діелектричне ядро – металева оболонка) та біметалевої наночастинок.

Встановлено, що спектральна чутливість оболонкових частинок збільшується зі зменшенням радіуса діелектричного ядра. Це пов'язано зі збільшенням вмісту металу у метал-діелектричній наночастиці, а стрибок чутливості за товщини оболонки $t \approx 30$ нм (для усіх розглянутих значень радіуса ядра) пов'язаний з різким збільшенням частоти поверхневих плазмонів при малій зміні діелектричної проникності оточуючого середовища. У зв'язку з цим такі сенсорні пристрої можуть детектувати надмалі концентрації речовини при осіданні малої кількості її молекул на поверхню чутливого елементу.

У випадку оболонок із інших металів чутливість різко збільшується за значень товщини оболонки, менших, ніж для частинок $\text{SiO}_2 @ \text{Ag}$. Внаслідок того, що з технологічної точки зору простіше виготовляти двошарові частинки з «товстою» оболонкою, частинки $\text{SiO}_2 @ \text{Ag}$ матимуть беззаперечну перевагу перед іншими розглянутими оболонковими частинками.

Показано, що для біметалевих наночастинок, залежно від розміру ядра має місце або різке спадання (при малих товщинах оболонок), або різке зростання (при великих товщинах) спектральної чутливості, аналогічно до випадку оболонкової частинки. Вказаний факт для цих частинок також пояснюється суттєвою зміною частоти поверхневого плазмонного резонансу при незначній зміні діелектричної проникності оточуючого середовища.

Перелік посилань

1. И.Д. Войтович, В.М. Корсунский. Сенсоры на основе плазмонного резонанса: принципы, технологии, применения. – Киев, «Сталь», 2011. – 534 с.
2. Дмитрук УФЖ
3. Григорчук МФиНТ
4. Pires N. M. M. Recent developments in Optical detection technologies in Lab-on-a-Chip devices for biosensing applications / N. M. M. Pires, T. Dong, U. Hanke, N. Hoivik. // *Sensors*. - 2014. – Vol. 14. – P. 15458-15479.
5. Maier S. A. *Plasmonics: fundamentals and applications*. – Springer Science & Business Media, 2007 223 p.
6. Klimov V. *Nanoplasmonics*. – Pan Stanford, 2014 p.581
7. Huang Y.H., Ho H.P., Wu S.Y., Kong S.K., Wong W.W., Shum P. Phase sensitive SPR sensor for wide dynamic range detection // *Opt. Lett.*, Vol. 36, No. 20, 2011. pp. 4092–4094.
8. Kretschmann E., Raether H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light // *Z. Naturforsch*, Vol. 23a, 1968. pp. 2135–2136.
9. Anker J.N., Hall W.P., Lyandres O., Shah N.C., Zhao J., Van Duyne R.P. Biosensing with plasmonic nanosensors // *Nat. Mater*, Vol. 7, 2008. pp. 442–453.
10. Сотников Д.В., Жердев А.В., Дзантиев Б.Б. Детекция межмолекулярных взаимодействий, основанная на регистрации поверхностного плазмонного резонанса [Текст]// *Успехи биологической химии*, Т. 55, 2015. С. 391–420.
11. Pockrand, I. Surface plasmon spectroscopy of organic monolayer assemblies // I. Pockrand, J. D. Swalen, J. G. Gordon II, M. R. Philpott // *Surf. Sci.* - 1978. - Vol. 74. - №1. - p. 237 – 244.
12. Gordon II, J. G. Surfaceplasmons as aprobe of the electrochemical interface / J.G.Gordon II, S. Ernst // *Surf. Sci.* - 1980. - Vol. 101. - №1-3. - p. 499 – 506.
13. [66] Liedberg, B. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing / B. Liedberg, C. Nylander, I. Linstroem // *Sensors and Actuators*. 1983.

Vol. 4. 鈔p. 299–304.

14. Kretschmann, E. Notizen: Radiative Decay of Non-Radiative Surface Plasmons Excited by Light / E. Kretschmann, H. Raether // Zeitschrift für Naturforsch.

A. 會1968. 會Vol. 23, №12. 會p. 2135–2136.

15. Piliarik, M. Surface plasmon resonance (SPR) sensors: approaching their limits? / M. Piliarik, J. Homola // Opt. Express. 羅 2009. 羅 Vol. 17, № 19. 羅 p. 16505.

16. Present and future of surface plasmon resonance biosensors / J. Homola // Anal. Bioanal. Chem. 均2003. 均Vol. 377, №3. 均p. 528–539.

17. Abbas, A. Sensitivity comparison of surface plasmon resonance and plasmon-waveguide resonance biosensors / A. Abbas, M. J. Linman, Q. Cheng // Sensors Actuators B Chem. 鵬2011. 鵬Vol. 156, №1. 鵬p. 169–175.

18. Hayashi, S. Waveguide-coupled surface plasmon resonance sensor structures: Fano lineshape engineering for ultrahigh-resolution sensing / S. Hayashi, D. V. Nesterenko, Z. Sekkat // J. Phys. D: Appl. Phys. 團 2015. 團 Vol. 48, No.32. 修p. 325303.

19. Nesterenko, D. V. Extremely narrow resonances, giant sensitivity and field enhancement in low-loss waveguide sensors / D. V. Nesterenko, S. Hayashi, Z. Sekkat // J. Opt. 澗2016. 澗Vol. 18, №6. 澗p. 065004.

20. Kabashin, A. V. Plasmonic nanorod metamaterials for biosensing / A. V. Kabashin, P. Evans, S. Pastkovsky et al. // Nat. Mater. 翫 2009. 翫 Vol. 8, №11. 翫p. 867–71.

21. Sreekanth, K. V. Extreme sensitivity biosensing platform based on hyperbolic metamaterials // K. V. Sreekanth, Y. Alapan, M. El-Kabbash et al. // Nat. Mater. 翫2016.

22. Konopsky, V. N. Photonic crystal surface waves for optical biosensors / V. N. Konopsky, E. V. Alieva // Anal. Chem. 吓 2007. 吓 Vol. 79, № 12. 吓 p. 4729–35.

23. Konopsky, V. N. A biosensor based on photonic crystal surface waves with an independent registration of the liquid refractive index / V. N. Konopsky, E. V. Alieva // Biosens. Bioelectron. 2010. Vol. 25, №5. p. 1212–1216.
24. Konopsky, V. Photonic Crystal Biosensor Based on Optical Surface Waves / V. Konopsky, T. Karakouz, E. Alieva et al. // Sensors. 2013. Vol. 13, No.12. p. 2566–2578.
25. Arcimovirc, S. S. LSPR chip for parallel, rapid, and sensitive detection of cancer markers in serum. / S. S. Arcimovirc, M. A. Ortega, V. Sanz et al. // Nano Lett. 2014. Vol. 14, №5. p. 2636–41.
26. Liu, N. Nanoantenna-enhanced gas sensing in a single tailored nanofocus / N. Liu, M. L. Tang, M. Hentschel et al. // Nat. Mater. 2011. Vol. 10, No.8. p. 631–636.
27. Jeong, H.-H. Dispersion and shape engineered plasmonic nanosensors / H.-H. Jeong, A. G. Mark, M. Alarcorn-Correa et al. // Nat. Commun. 2016. Vol. 7. p. 11331.
28. Brolo, A. G. Surface Plasmon Sensor Based on the Enhanced Light Transmission through Arrays of Nanoholes in Gold Films / A. G. Brolo, R. Gordon, B. Leathem, K. L. Kavanagh // Langmuir. 2004. Vol. 20, №12. p. 4813–4815.
29. Yanik, A. A. An Optofluidic Nanoplasmonic Biosensor for Direct Detection of Live Viruses from Biological Media / A. A. Yanik, M. Huang, O. Kamohara et al. // Nano Lett. 2010. Vol. 10, №12. p. 4962–4969.
30. Im, H. Label-free detection and molecular profiling of exosomes with a nanoplasmonic sensor. // H. Im, H. Shao, Y. I. Park et al. // Nat. Biotechnol. – 2014. Vol. 32, №5. – p. 490–5
31. 171. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б., Пырков Ю.Н., Парамонов В.Н. Измерение ширины линии излучения одночастотного полупроводникового лазера с использованием кольцевого волоконного интерферометра // Квантовая электроника, Т. 41, № 7, 2011. С. 656–658.

32. МИ 2083-90 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешности. М.: Стандартинформ, 1991. 11 с.
33. Wünsch G., Potulski E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edl n's formulae // Metrologia, Vol. 35, No. 2, 1998. pp. 133–139.
34. Wagner W., PruЯ A. The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use // J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 31, No. 2, 2002. pp. 387–535.
35. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. 2-е издание-е изд. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
36. ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М.: Стандартинформ, 2006. 27 с.
37. ГОСТ 8.606-2012 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов. М.: Стандартинформ, 2013. 11 с.
38. Перспективы создания портативных биосенсоров на основе поверхностного плазмонного резонанса / И. Д. Войтович, В. М. Корсунский, А. Н. Косогор и др. // Сенсор. електрон. і мікросистем. технології. - 2005. - № 3. - С. 56-65.
39. Эггинс Б. Химические и биологические сенсоры / Эггинс Б. –М.: Техносфера, 2005. -366 с.
40. **Коротун, А. В.** К расчету оптических характеристик и размерных сдвигов поверхностных плазмонов сферических биметаллических наночастиц [Текст] / А.В. Коротун, В.В. Погосов // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – №1. – С. 120-131.