

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 Плазмонні властивості острівцевих металевих наноплівочок

Виконав: студент(ка) ІІ курсу, групи РТ-319м

Спеціальності

153 «Мікро-та наносистемна техніка»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої

Фомін. А. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Коротун А. В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Сніжной В.Л

(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 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) «Мікро- та наноелектроні прилади і пристрої»
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Фоміна Артема Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Плазмонні властивості острівцевих металевих наноплівоч

керівник проекту (роботи) Коротун Андрій Віталійович, доцент, канд. фіз.-мат. наук

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «13» листопада 2020 року №331

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

3. Вихідні дані до проекту (роботи) розміри і матеріали наноострівців, параметри металів і матеріалів підкладки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) методи дослідження оптичних і плазмонних властивостей острівцевих металевих плівок; розрахунок квадрупольної поляризованості, частот невидимості і поверхневого плазмонного резонансу; 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	Коротун А.В., доцент каф. МіНЕ		
3	Круглікова В. 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 щодо оптичних властивостей острівцевих металевих плівок	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 співвідношень для квадрупольної поляризованості	23.10. – 28.10.	виконано
6	Одержання співвідношень для частот невидимості і поверхневого плазмонного резонансу	29.10. – 03.11.	виконано
7	Складання процедури розрахунку	04.11. – 08.11.	виконано
8	Одержання чисельних результатів та їх аналіз	09.11. – 12.11.	виконано
9	Аналіз економічної ефективності проекту	13.11. – 17.11.	виконано
10	Розробка заходів по охороні праці	18.11. – 21.11.	виконано
11	Оформлення графічної частини	22.11. – 24.11.	виконано
12	Оформлення ПЗ	25.11. – 30.11.	виконано

Студент(ка)

(підпис)

А.В. Фомін

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

А.В. Коротун

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

ПЗ: 102 с., 34 рис., 19 табл., 50 джерел.

Мета роботи: дослідження частотної залежності квадрупольної поляризованості напівсферичних металевих острівців з урахуванням поверхневого розсіювання електронів.

Об'єкт та предмет дослідження: об'єктом дослідження виступають острівцеві металеві плівки; предметом дослідження є оптичні і плазмонні властивості напівсферичних острівців, розташованих на діелектричній підкладці.

Методи дослідження: розрахунково-аналітичний.

Результати: результатом дослідження є аналітичні вирази для частотних залежностей квадрупольної поляризованості, частот невидимості та поверхневого плазмонного резонансу.

Рекомендації щодо впровадження: робота носить фундаментальний характер, проте деякі її результати можуть бути використані для удосконалення методів оптичного запису інформації.

Практична цінність: досліджено вплив розміру металевих острівців та властивостей підкладки на плазмонні явища у таких системах.

ОСТРІВЦЕВІ ПЛІВКИ, КВАДРУПОЛЬНА ПОЛЯРИЗОВАНІСТЬ,
ЧАСТОТА НЕВИДИМОСТІ, ЧАСТОТА ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО
РЕЗОНАНСУ, ДІЕЛЕКТРИЧНА ФУНКЦІЯ

ЗМІСТ

	Вступ	6
1	Формування, оптичні властивості і використання плазмонних структур	8
	1.1 Формування плазмонних структур різної морфології та їх оптичні характеристики	8
	1.2. Застосування плазмон-активних підкладок в раманівській спектроскопії	26
2	Розмірні залежності оптичних і плазмонних характеристик напівсферичних металевих наночастинок	36
	2.1 Поляризованість напівсферичної наночастинок	36
	2.2 Частоти невидимості та поверхневого плазмонного резонансу	47
	2.3 Результати розрахунків та їх обговорення	50
3	Економічна частина	59
	3.1 Стан ринку нанотехнологій	59
	3.2 Розрахунок витрат на проведення НДР	71
	3.3 Розрахунок економічної ефективності НДР	76
4	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	81
	4.1 Аналіз потенційних небезпек	81
	4.2 Заходи забезпечення безпеки	82
	4.3 Заходи з промсанітарії та гігієни праці	83
	4.4 Заходи з пожежної безпеки	90
	4.5 Заходи забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях	91
	Висновки	96
	Перелік посилань	97

ВСТУП

Бурхливий розвиток нанотехнологій в останні десятиріччя стимулювало активне використання мікро- і наноструктур, що підтримують оптичні резонанси різного роду. Відповідно до матеріалу, з якого сформовані структури, розрізняють плазмонні і просторові резонанси.

При збудженні плазмонних резонансів відбувається істотне підсилення локальних електричних полів [1], що зумовлює застосування металевих наноструктур в сенсориці [2], нелінійній оптиці [3], раманівській спектроскопії [4], лазерних технологіях [5], для підвищення ефективності фотокаталізу [6]. При цьому положення резонансу істотно залежить як від морфології структури [7] та оточення [8], так і наявності в околі наночастинки інших частинок [9].

Одним із широко поширених типів наноструктур, які формуються за рахунок самоорганізації, є острівцеві металеві плівки. Інтерес до вивчення властивостей подібних систем продиктований, зокрема, можливостями їх застосування для різних застосувань оптики і фотоніки. Так, сильне утримання електронів і фотонів на наномасштабному рівні у подібних матеріалах, дає можливість використовувати окремі наночастинки або їх групи для представлення інформаційних одиниць. Це, в свою чергу, дозволяє розробити проривні методи оптичного зберігання даних із надвисокою щільністю запису, надзвичайно тривалим терміном зберігання даних і ультранизьким споживанням енергії [10].

На сьогодні запропоновано і реалізовано декілька наноструктурованих фоточутливих матеріалів на основі металевих наночастинок. Характеристики таких матеріалів переважно залежать від локалізованого поверхневого плазмонного резонансу, пов'язаного зі збудженням колективних коливань вільних електронів у наночастинці при її опроміненні світлом із певною довжиною хвилі. Поверхневі плазмони надзвичайно чутливі до геометрії і розміру наночастинок.

Одними з найбільш ефективних плазмон-активних структур є острівцеві плівки, в яких острівці можуть мати форму напівсферичних наночастинок. Поверхневий плазмонний резонанс у наночастинках відкриває нові можливості створення на основі таких плівок спектрально селективних поглинаючих покриттів [4], а також приводить до підсилення сигналу флуоресценції, інфрачервоної спектроскопії і раманівського розсіювання. Крім того, острівцеві плівки металів можуть ефективно використовуватися у фотовольтаїці і сонячних елементах [6], а також у каталізі. Тому питання про розрахунок поляризованості металевих напівсфер на підкладці, що формують острівцеву плівку, і характеристик поверхневих плазмонів у таких системах є актуальним.

1 ФОРМУВАННЯ, ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І ВИКОРИСТАННЯ ПЛАЗМОННИХ СТРУКТУР

1.1 Формування плазмонних структур різної морфології та їх оптичні характеристики

Найбільш розповсюдженим способом збудження локалізованих поверхневих плазмонів є використання нанотекстурованих поверхонь плівок благородних металів (золото, срібло) певної морфології (нанокільки, нанотрубки, наностержні, нанодиски, нанодроти, наносліти). Резонансне збудження локалізованих плазмонів може бути здійснено електромагнітним опроміненням видимого діапазону [11]. Одними із найбільш ефективних плазмон-активних структур є острівцеві плівки. Головним недоліком є низька відтворюваність їх характеристик та неоднорідність на мікро- та нанорівнях. Однак, завдяки технологічності процесу виготовлення, острівцеві плівки золота і на даний час широко використовуються в плазмоніці.

Найбільш значимими технологічними факторами, які дозволяють керувати властивостями плазмон-активних структур з точки зору їх використання у фотоніці та плазмоніці, є вихідна товщина плівки і температурні режими її обробки. В [12, 13] було показано, що неупорядковані масиви наночастинок золота можна формувати шляхом відпалу в атмосфері аргону при температурах 673-973 К тонких нанорозмірних плівок золота, нанесених методом термічного осадження на скляні підкладки фірми «Corning» з провідним шаром ІТО.

Середній розмір наночастинок залежить як від номінальної товщини плівки золота, так і від температури відпалу. Наприклад, середній розмір наночастинок золота, одержаних після відпалу плівки при температурі 723 К товщиною 8 нм складає $\sim 20-60$ нм (рис. 1.1, *a*). Якщо номінальна товщина плівки Au 12 нм, то середній розмір наночастинок при тій же температурі відпалу складає $\sim 70-80$ нм. При товщині плівок Au 25 нм середній розмір сформованих НЧ – $\sim 120-150$ нм (рис. 1.1, *б*). З одержаних результатів

досліджень морфології масивів наночастинок золота видно, що зі зростанням номінальної товщини осадженого Au зменшується поверхнева щільність острівців та зростають їх середні розміри. Такі морфологічні зміни призводять і до суттєвих змін в спектрах плазмонного поглинання. На рис. 1.2 наведені спектри поглинання масивів наночастинок Au, одержаних при варіюванні номінальної товщини вихідної плівки та режимів відпалу. На вставках рис. 1.2 наведені АСМ-зображення відповідних масивів. Видно, що із збільшенням розмірів НЧ Au положення максимуму смуги поверхневого плазмонного резонансу λ_m зсувається в ділянку більших довжин хвиль. Дослідження показали, що λ_m наночастинок Au у залежності від технологічних режимів виготовлення може змінюватись у межах від 520 до 580 нм [12, 13].

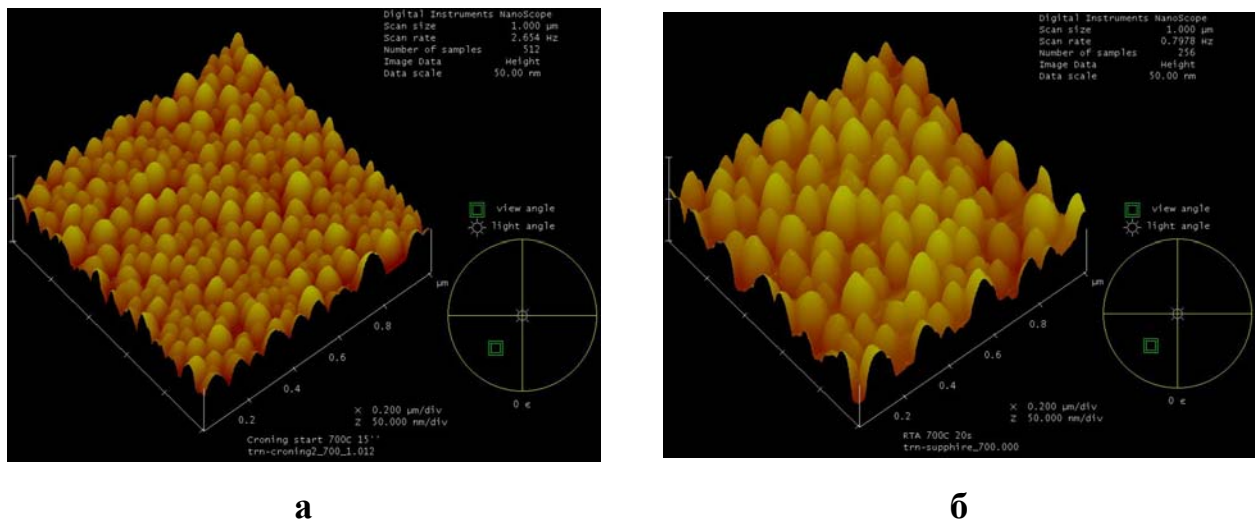


Рисунок 1.1 – АСМ-зображення масивів НЧ золота, сформованих шляхом відпалу при 723 К плівок Au товщиною 8 нм (а) і 25 нм (б)

В [14, 15] приведені результати експериментів по формуванню неупорядкованих масивів НЧ срібла методом швидкого (20-25 К/с) радіаційного нагрівання тонких (4-20 нм) плівок Ag, одержаних методом резистивного випаровування на скляні підкладки, до температур 573-723 К на повітрі та осадженням срібла на підігрівані (до 700 К) скляні підкладки у вакуумі. При напиленні плівок та формуванні масивів НЧ Ag проводився контроль динамічних змін їх спектрів пропускання за допомогою

спектрофотометра Ocean Optics. Використання спектрофотометра у процесі термообробки плівок срібла на повітрі та їх осадження у вакуумі дозволило контролювати зміни максимуму смуги ППР при формуванні масивів НЧ і припиняти процес при досягненні ними заданих розмірів. В результаті, сформовані масиви НЧ Ag з розміром наночастинок 20-100 нм, положення максимуму смуги ППР яких знаходяться в ділянці спектру 480-510 нм (рис.1.2).

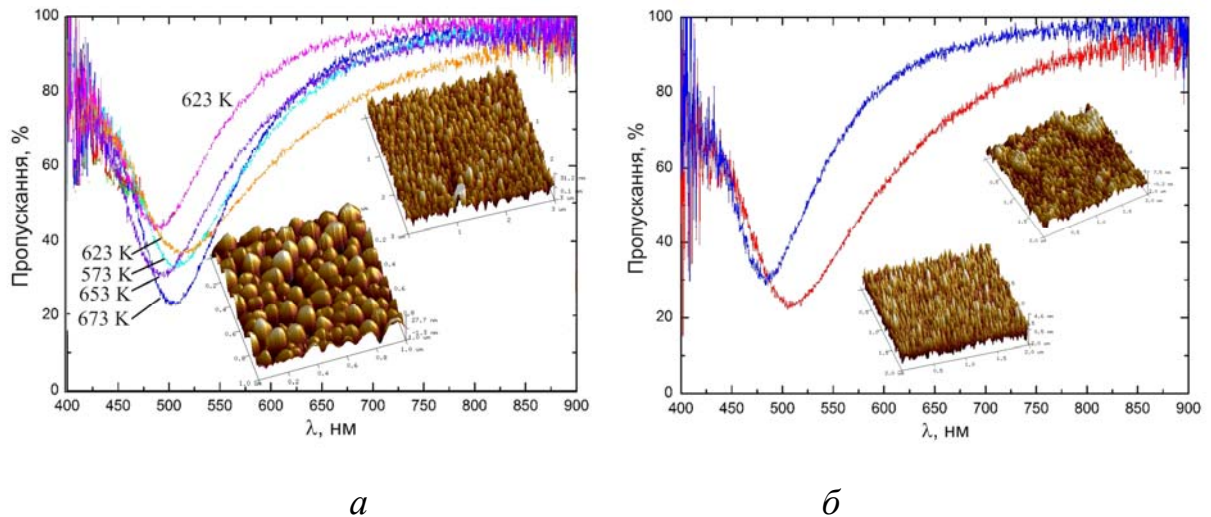


Рисунок 1.2 – Спектри оптичного пропускання та АСМ-зображення (вставки) масивів НЧ Ag, сформованих у процесі радіаційного нагрівання плівок срібла різної товщини до $T=573-673$ К (а) протягом 30-60 с (а) та у процесі осадження срібла на підігріту (673 К) скляну підкладку (б) [15]

Як випливає з наведених даних, неупорядковані масиви НЧ золота і срібла (у вигляді напівсфероїдів різної морфології), які одержуються шляхом відпалу плівок благородних металів, є досить ефективними плазмон-активними структурами. Однак, така наноструктурована поверхня характеризується рядом виступів широкого набору розмірів та форм. Точний теоретичний аналіз такої поверхні провести досить складно. Крім того, одержання таких масивів на відносно великих площах є складним технологічним завданням.

В ряді робіт [16-20] було показано, що оптимальною системою для збудження локалізованих поверхневих плазмонів є шорстка металева поверхня

з регулярними неоднорідностями однакових розмірів (у нанометровому масштабі), на яких виникають поверхневі електромагнітні хвилі.

Одним із методів одержання плазмонних упорядкованих структур відносно великих розмірів є метод наносферної літографії (інша назва колоїдна нанолітографія) [20-25]. Він дозволяє забезпечувати однакові форму, розмір та взаємне розташування текстур і здійснювати моделювання розподілу електромагнітної хвилі. Для реалізації даного методу необхідним є виготовлення темплату маски певної конфігурації із каліброваних полістиренових кульок, яка наноситься на підкладку. Наприклад, в [20] в якості підкладки використовувалися діелектричні (слюда, скло), напівпровідникові (Si(100) і Si(111)) та металічні (Cu(100) і Au(полір.)) матеріали. В [21,22] використовувалися скляні підкладки з нанесеними на їх поверхні тонкими (3-10 нм) шарами хрому або титану (для покращення адгезії металу до скла).

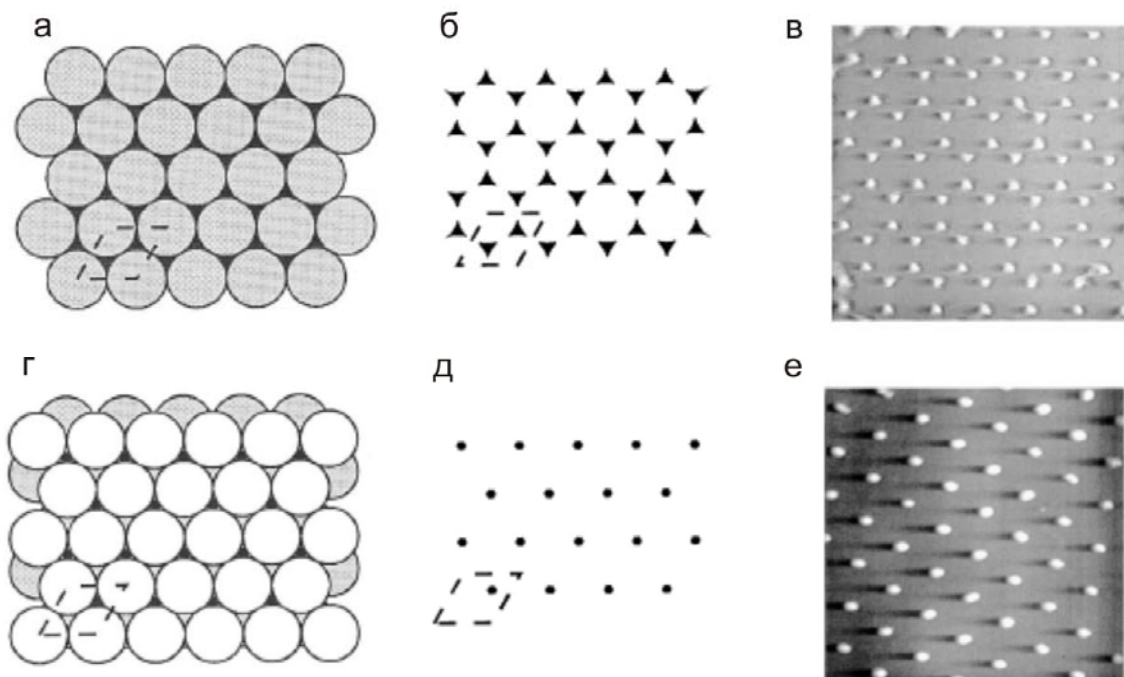


Рисунок 1.3 – Етапи наносферної літографії (а,б,г,д) та АСМ-зображення масивів НЧАг на слюдяних підкладках, одержаних при використанні в якості темплату моношару (а-в) та подвійного шару (г-е) полістиренових кульок діаметром 264 нм [20]

Рис. 1.3 схематично ілюструє процес наносферної літографії для формування упорядкованих масивів НЧ металів з використанням масок з моно- та подвійного шарів полістиренових кульок (*a, б, г, д*) та АСМ-зображення масивів НЧ Ag на підкладці із слюди (*в, е*). Маска з моношару самоупорядкованих полістиренових кульок різного діаметру (200 нм – 3 мкм) на поверхню підкладки наносилася методом центрифугування або занурення (dip-coating) [20-22, 24]. В якості вихідної речовини використовувалась водна суспензія сферичних кульок. При нанесенні двошарової маски (рис. 1.3, *г*) використовувалась більш концентрована суспензія. У подальшому на моношар (або подвійний шар) сферичних кульок методом термічного випаровування наносилася металева плівка наномасштабного розміру. На заключному етапі плівка металу із шаром кульок знімалася (lift-off) за допомогою скотча або обробкою в ультразвуковій ванні з бідистильованою водою [21, 22, 24] або CH_2Cl_2 [20]. Метал, який був нанесений на підкладку (через трикутні канали, що утворилися при формуванні маски), за рахунок адгезії залишався на ній у вигляді упорядкованих масивів тригранних призм, розміщених гексагонально (рис.1.4-1.7).

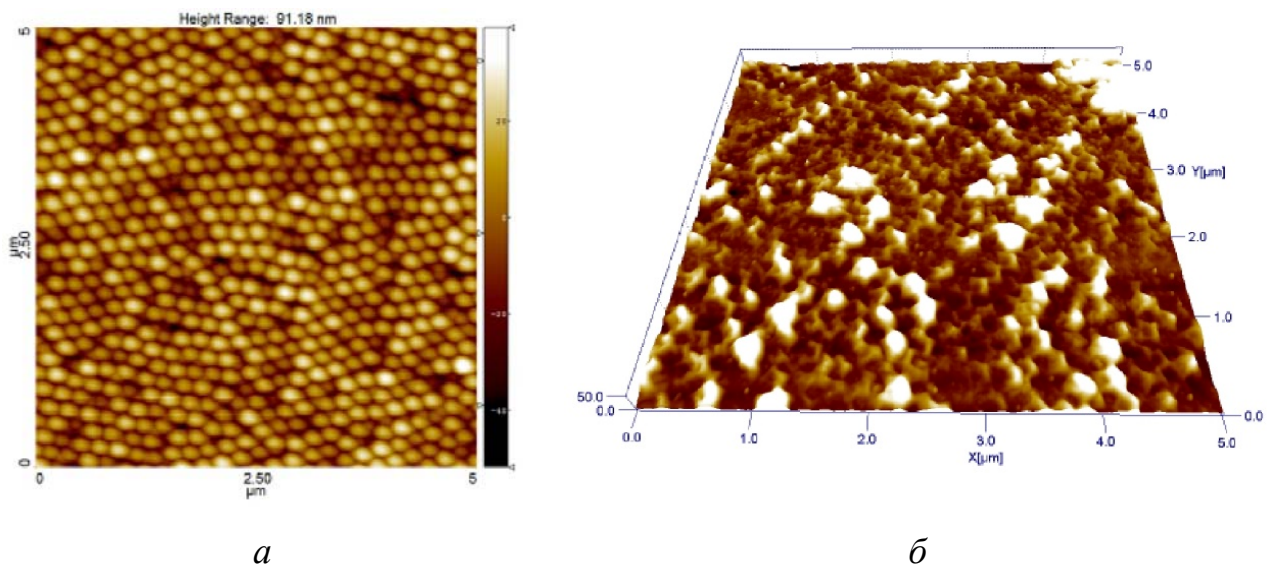


Рисунок 1.4 – АСМ-зображення моношару полістиренових кульок діаметром 200 нм (*a*) та масиву НЧ Au, одержаного після процедури lift-off (*б*) за допомогою скотча [21]

Слід відмітити, що при використанні процедури відриву плівки металу з моношаром полістиренових кульок можна досягнути тільки певного ступеню упорядкування наночастинок, оскільки відрив скотчу не видаляє всі кульки [20, 21]. Цей висновок добре підтверджує рис. 1.4, б, на якому наведено АСМ-зображення масиву НЧ Au, одержаного після процедури lift-off за допомогою скотча шару полістиренових кульок діаметром 200 нм з нанесеною на них плівкою золота товщиною 50 нм.

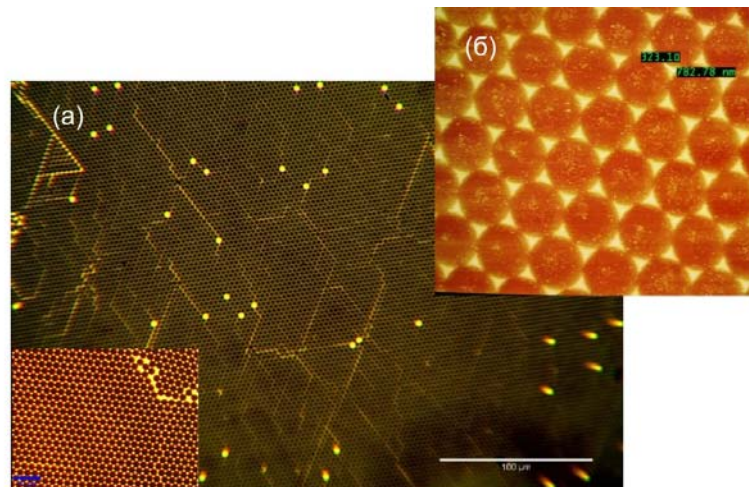


Рисунок 1.5 – Оптичне (а) та АСМ (б) зображення масиву НЧ Au, одержаного при використанні темплату з моношару полістиренових кульок діаметром 3 мкм [22]

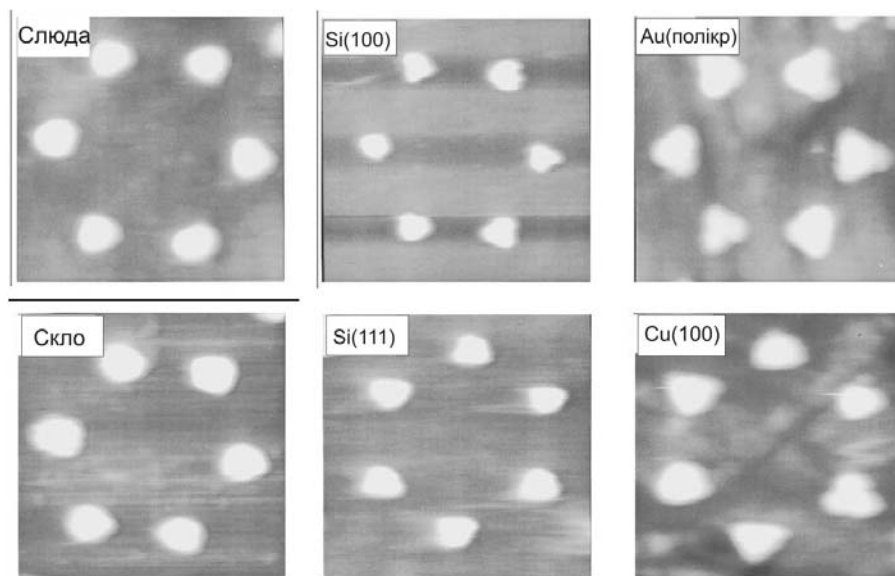


Рисунок 1.6 – АСМ-зображення масивів НЧ Ag, одержаних при використанні темплату з моношару полістиренових кульок діаметром 264 нм на різних підкладках [20]

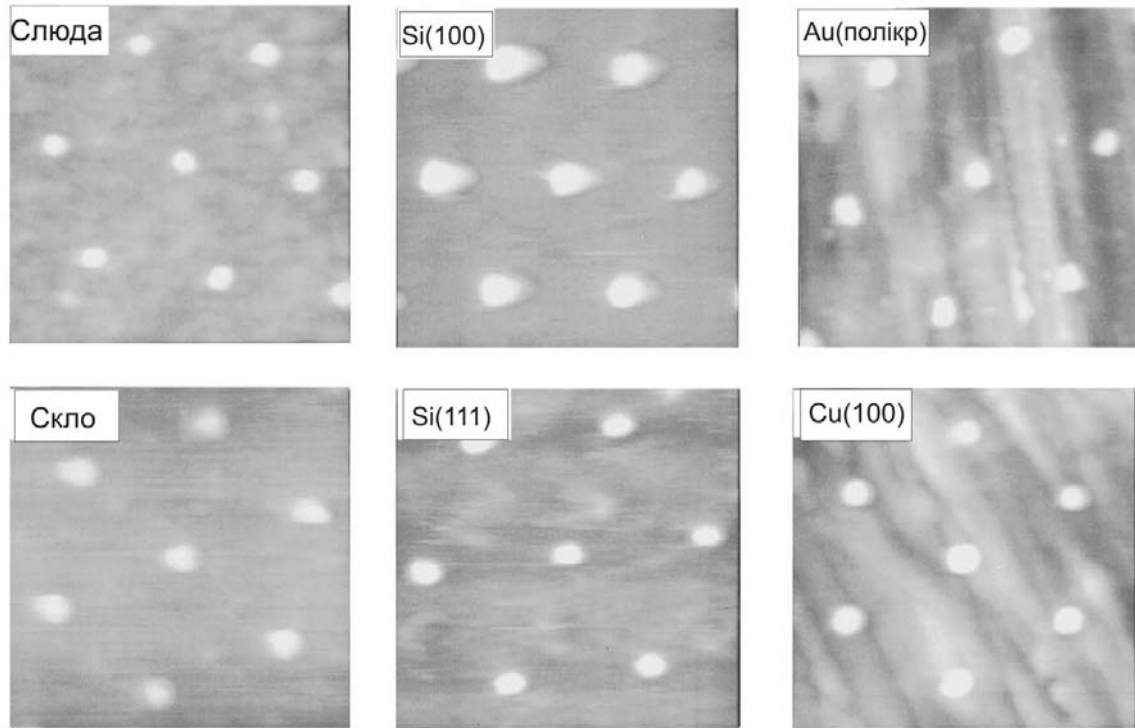


Рисунок 1.7 – АСМ-зображення масивів НЧ Ag, одержаних при використанні темплату з подвійним шаром полістиренових кульок діаметром 264 нм на різних підкладках [20]

Високий ступінь упорядкування металевих наночастинок досягається при обробці темплатів з нанесеними на них плівками металів ультразвуком. На рис. 1.5 наведено оптичне (а) та АСМ (б)-зображення масиву НЧ Au, одержаного після видалення моношару самоупорядкованих полістиренових кульок діаметром 3 мкм з нанесеною на них плівкою золота товщиною 50 нм, в ультразвуковій ванні з бідистилятом. На підкладці сформувався масив НЧ Au у вигляді тригранних призм з розміром ~ 780 нм в основі і висотою 35-40 нм, гексагонально розміщених на відстанях ~ 325 нм. Максимум смуги ППР таких масивів НЧ Au знаходиться в тій же ділянці спектру, що і для неупорядкованих масивів [22]. Дослідження показали, що геометричні параметри упорядкованих масивів металевих наночастинок залежать від діаметру полістиренових кульок,

природи металу та матеріалу підкладки [20]. Для прикладу в табл. 1.1 і 1.2 наведені експериментальні геометричні характеристики (d^M , d^P – відстань між НЧ, a^M , a^P – середній розмір НЧ в основі, h^M , h^P – висота НЧ) упорядкованих масивів наночастинок деяких металів (Ag, Au, Cr), одержаних методом наносферної літографії з використанням темплатів моно- (М) і подвійних (П) шарів полістиренових кульок діаметром 264 нм на різних підкладках. Товщина нанесеного шару металу у більшості випадків складала 22 нм, а обробка проводилася в ультразвуковій ванні.

Таблиця 1.1. – Параметри упорядкованих масивів НЧ Ag на різних підкладках [20]

Підкладка	темплат – моношар кульок			темплат – подвійний шар кульок		
	d^M , нм	a^M , нм	h^M , нм	d^P , нм	a^P , нм	h^P , нм
Слюда	152±5	50±3	23±1	267±7	45±4	23±1
Si (100)	152±5	36±2	23±1	267±7	32±2	18±1
Au (полікр.)	152±5	37±4	22±2	267±7	45±3	20±1
Скло	152±5	46±3	20±1	267±7	35±2	21±1
Si (111)	152±5	43±4	17±1	267±7	64±3	16±1
Cu (100)	152±5	66±2	20±2	267±7	44±2	18±1

У випадку використання в якості темплату подвійного шару полістиренових кульок (після ультразвукової обробки) на поверхні підкладок залишався метал у вигляді упорядкованого масиву наностержнів (рис. 1.3 д, е; 1.7). Аналіз АСМ-зображень одержаних масивів показав, що відстань між металевими наночастинами d^P суттєво збільшилася у порівнянні з d^M (табл.

1.1 і 1.2), оскільки другий шар блокує половину трикутних отворів [20]. Однак, як видно з табл. 1.1 і 1.2, ця величина не залежить від матеріалу підкладки. Значно більше впливає цей фактор на середній розмір в основі і висоту нанострижня.

Таблиця 1.2 – Параметри упорядкованих масивів різних металевих НЧ на підкладці Si (100) [20]

Метал	темплат – моношар кульок			темплат – подвійний шар кульок		
	d^M , нм	a^M , нм	h^M , нм	d^P , нм	a^P , нм	h^P , нм
Ag	152±5	36±2	22	267±7	32±2	18±1
Au	152±5	19±1	20	267±7	51±3	16±1
Cr	152±5	8±1	10	267±7	48±3	17±1

Відмітимо, що в [20] показана можливість формування даним методом не тільки періодичних металевих наноструктур на різних підкладках, але і упорядкованих масивів НЧ діелектриків і напівпровідників на напівпровідниковій підкладці, тобто можливість формування масивів квантових точок та одноелектронних транзисторів.

Відомо [22, 23, 25-29], що поверхневий плазмонний резонанс може бути збуджений в плівках металів, перфорованих массивом наноотворів або наноподряпин-нанослітів. Останні можуть бути одержані методами зондової нанолітографії (безпосередньо зондом атомно-силового мікроскопу), сканувальної ближньопольової мікроскопії (СБОМ) та за допомогою сфокусованого іонного променя на скануючому електронному мікроскопі. На даний час, починаючи з піонерської роботи [32], існує велика кількість публікацій, присвячених використанню АСМ для одержання наноструктур за

допомогою зондів. У більшості випадків зонд мікроскопу виконує роль наноіндентора, що, в залежності від його форми та напрямку руху, дозволяє отримати масив нанослітів чи наноотворів шляхом скрайбування або прямим наноіндентуванням [24,31].

На рис. 1.8 наведені АСМ-зображення масивів нанослітів, одержаних при скрайбуванні плівок золота товщиною 40-70 нм з використанням алмазних (у вигляді тригранної піраміди) і кремнієвих (у вигляді чотиригранної піраміди) зондів.

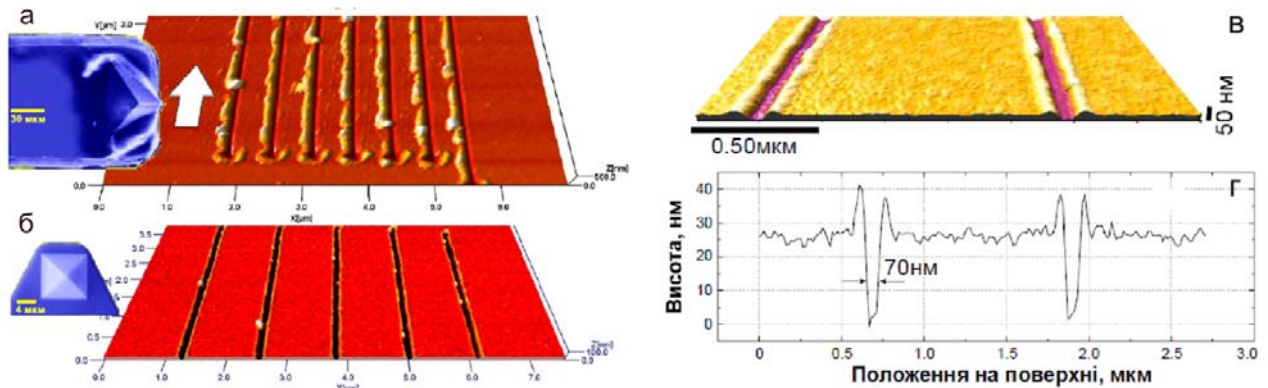


Рисунок 1.8 – АСМ-зображення (а-в) та профіль (г) нанослітів, одержаних методом скрайбування [24]

Навантаження на зонд АСМ підбиралося таким чином, щоб за рахунок скрайбування золото з канавки видалялося повністю (принаймні на початку одержаної канавки), залишаючи чисту поверхню скла підкладки шириною 70-200 нм. Видалений матеріал формував спіралеподібні луски на краях канавок. При значних розмірах лусок їх видаляли за допомогою ультразвукової ванни. Одержані масиви нанослітів довжиною 10-12 мкм з періодом 500-900 нм [32]. «Найчистіші» подряпини V-профілю були сформовані за допомогою кремнієвого зонда у вигляді чотиригранної піраміди при напрямку скрайбування, ортогональному до довгої осі кантилівера (рис. 1.8 б). Для обох типів зондів, незалежно від напрямку скрайбування, вигляд країв канавки був подібним з такими ж характерними напливами (рис. 1.8, в, г).

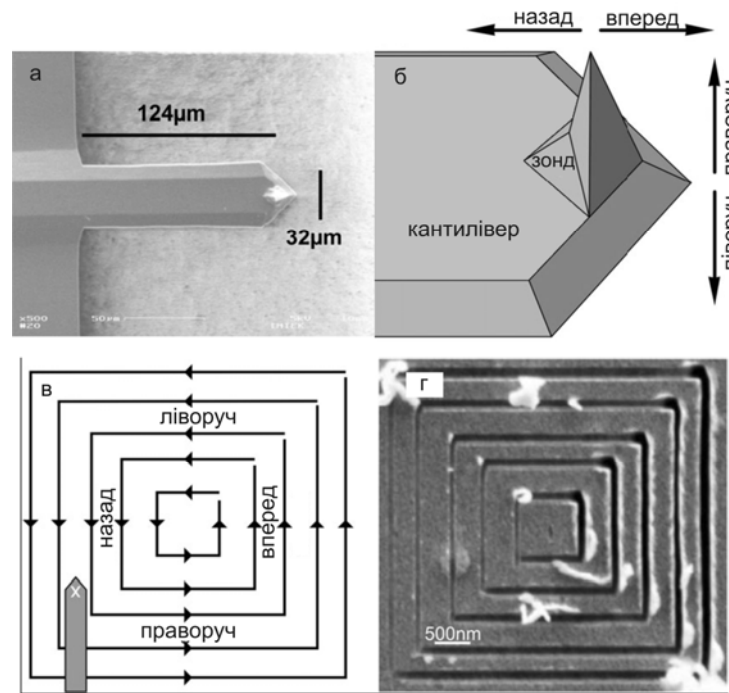


Рисунок 1.9. – СЕМ-зображення кантилівера з зондом (а) і конструкція зонда (б), схема скрайбування (в) та СЕМ-зображення п'яти нанослітів різного розміру (г) в плівці золота [31]

В [31] проведені детальні дослідження процесів формування масивів нанослітів в плівках золота методом зондової нанолітографії. Експерименти проводились з використанням зондів у вигляді тригранних призм з нітриду кремнію (Si_3N_4). СЕМ-зображення кантилівера з зондом і конструкція зонда наведені на рис. 1.9 а. Товщина плівок золота складала 75 нм. Встановлено, що ширина і глибина нанослітів залежить від напрямку руху зонда та прикладеної сили (рис. 1.9-1.11, табл. 1.3). Найбільш якісні масиви нанослітів одержані у випадку, коли скрайбування проводили у напрямках «ліворуч» і «праворуч» (рис. 1.10 і рис. 1.11 б).

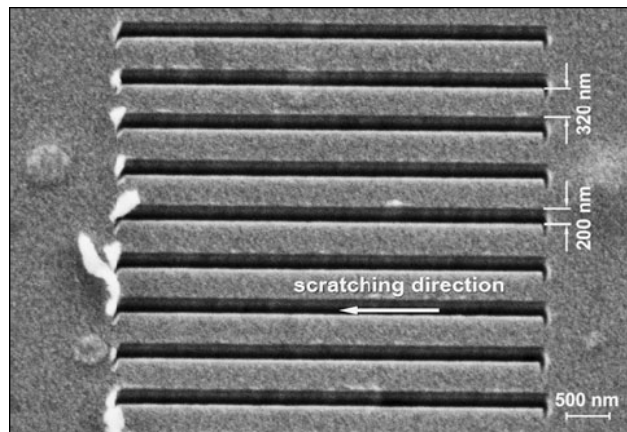


Рисунок 1.10 – СЕМ-зображення масиву нанослітів з періодом 500 нм, одержаних в плівці Au, скрайбуванням в напрямку «ліворуч» і прикладеній силі 31 мкН [31]

Таблиця. 1.3 – Глибина і ширина нанослітів для різних напрямків руху зонда та прикладених сил [31]

	Назад	Вперед	Ліворуч	Праворуч	F , мкН
Глибина, нм	7 ± 1	65 ± 5	31 ± 2	33 ± 2	15 ± 4
Ширина, нм	55 ± 2	75 ± 5	128 ± 10	130 ± 10	
Глибина, нм	10 ± 1	75 ± 5	35 ± 3	35 ± 3	21 ± 4
Ширина, нм	60 ± 2	85 ± 5	150 ± 10	147 ± 10	

Формування плазмонних структур у вигляді упорядкованих масивів нанослітів може бути здійснене за допомогою сфокусованого іонного променя на скануючому електронному мікроскопі. На рис. 1.12 наведені АСМ-зображення декількох періодичних наноструктур сформованих в плівках золота товщиною 100 нм, нанесених попередньо методом вакуумного термічного

осадження на скляні підкладки з провідним шаром ІТО (оксиду індію олова) та ультратонким (2-10 нм) шаром титану [22, 24].

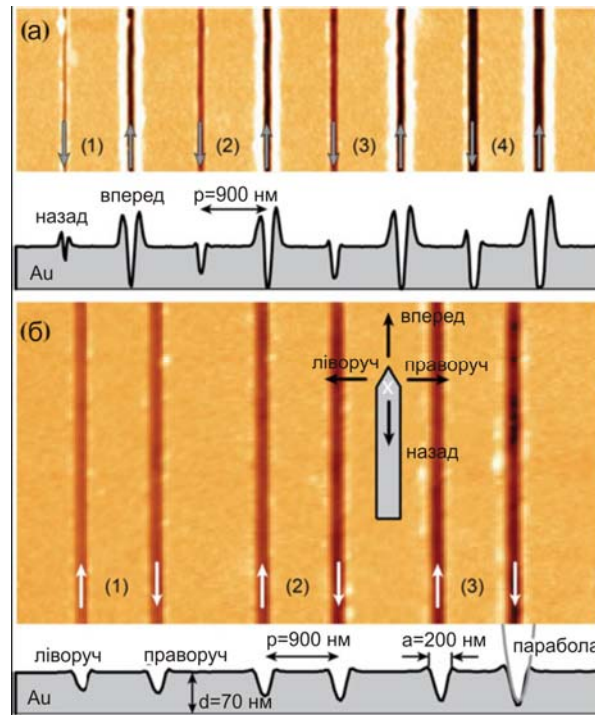


Рисунок 1.11 – АСМ-зображення масивів нанослітів, одержаних скрайбуванням плівки золота в різних напрямках і при різних навантаженнях: а) (1) – 24 мкН, (2) – 26 мкН, (3) – 29 мкН, (4) – 31 мкН; б) (1) – 17 мкН, (2) – 20 мкН, (3) – 24 мкН [31]

Масиви нанослітів з різними періодами та шириною слітів одержані за допомогою травлення сфокусованим променем іонів галію на скануючому електронному мікроскопі (прискорююча напруга – 30-50 кеВ, номінальний діаметр променю – 5 нм, роздільна здатність ~ 10 нм) (рис. 1.12). Положення максимуму смуги ППР виявлено в ділянці спектру 600-650 нм.

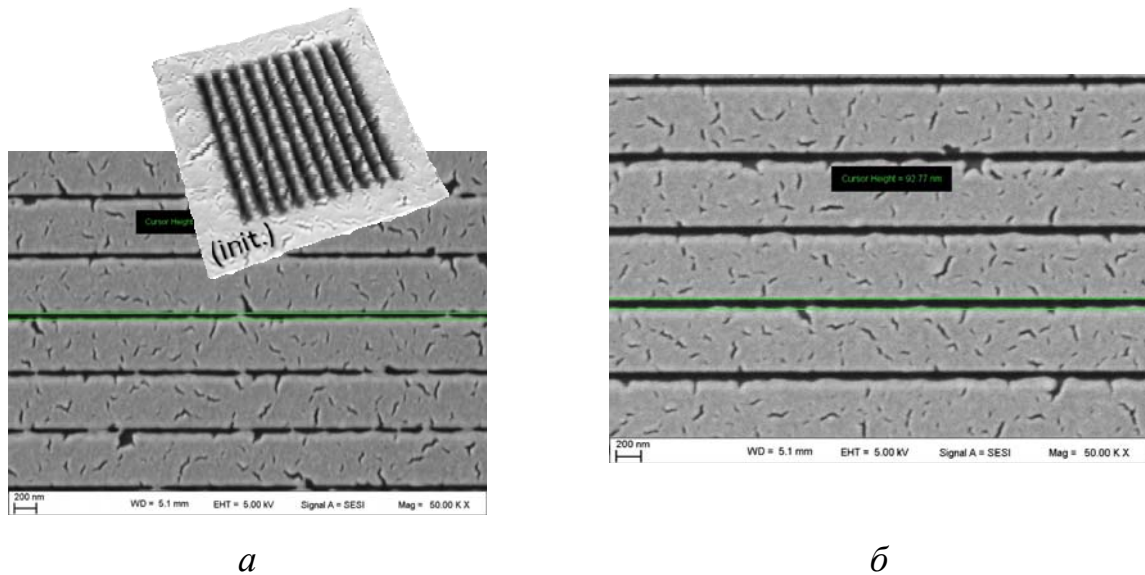


Рисунок 1.12 – АСМ-зображення масивів нанослітів з різними шириною та періодом: 63 нм і 527 нм (а); 93 нм і 611 нм (б); 250 нм і 630 нм (вставка) [22, 24]

В [28] наведені результати експериментів із формування масивів нанослітів методом електронно-променевої літографії у тонких плівках Au товщиною 130 нм, нанесених на скляні підкладки з підшаром Ti товщиною 5 нм, дослідженню їх оптичних характеристик та можливості використання в якості кольорових фільтрів та біосенсорів. СЕМ-зображення одного з масивів нанослітів з періодом 600 нм та шириною сліта 80 нм наведено на рис. 1.13, а, а спектри пропускання на повітрі та у воді при різних поляризаціях – на рис. 1.14. Більш детально про властивості даних структур та можливості їх практичного використання наведено нижче. Оптичні зображення масивів нанослітів з різними періодом (400-900 нм) та шириною (20-100 нм) слітів наведені на рис. 1.13, б. Відмітимо, що колір досліджуваних комірок (масивів нанослітів) змінюється не тільки при зміні періоду, але і при варіації ширини слітів.

Подібні результати одержані при дослідженні масивів нанослітів Ag [33]. На рис. 1.15 наведені АСМ-зображення масивів нанослітів різної періодичності в ультратонких (~30 нм) плівках срібла. Такі структури можуть використовуватися в якості плазмонних кольорових фільтрів. В таких фільтрах певні кольори (блакитний, пурпуровий, жовтий) генеруються шляхом

видалення додаткових компонентів (червоного, зеленого, синього) з видимого спектру за допомогою зміни періоду нанограток (рис. 1.15) в ультратонкому шарі срібла. Створені конструкції (масиви нанослітів) привабливі для використання в мініатюрній спектроскопії, мультиспектральних пристроях, прозорих дисплеях [33].

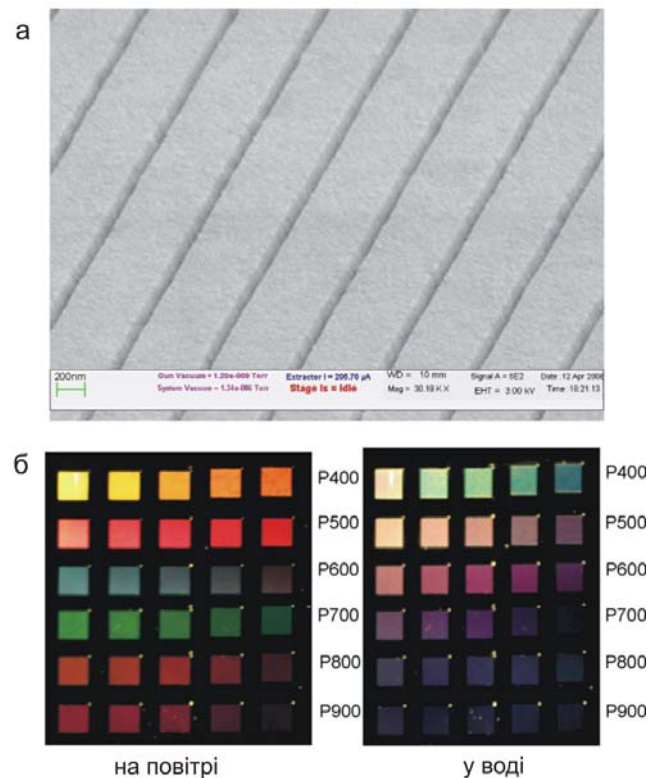


Рисунок 1.13 – СЕМ-зображення масиву нанослітів із періодом 600 нм і шириною 80 нм (а) та оптичні зображення масивів з різними періодами та шириною на повітрі і у воді (б) [28]

Суттєвим недоліком плазмонних структур, одержаних методами зондової нанолітографії, сканувальної ближньопольової мікроскопії та електронно-променевої літографії є їх малий розмір, оскільки ці методи можуть бути використані тільки на відносно невеликих площах (не більше $100 \text{ мкм} \times 100 \text{ мкм}$ – $200 \text{ мкм} \times 200 \text{ мкм}$). Це створює значні труднощі як при дослідженні оптичних характеристик таких плазмон-активних структур, так і при безпосередньому використанні їх за призначенням.

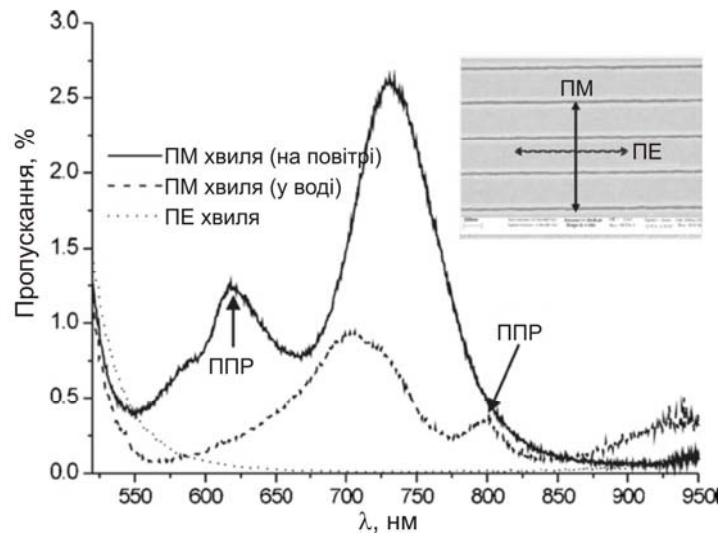


Рисунок 1.14 – Спектри пропускання масиву нанослітів шириною 80 нм та відстанню між ними 520 нм при різних поляризаціях збуджуючого світла

[28]

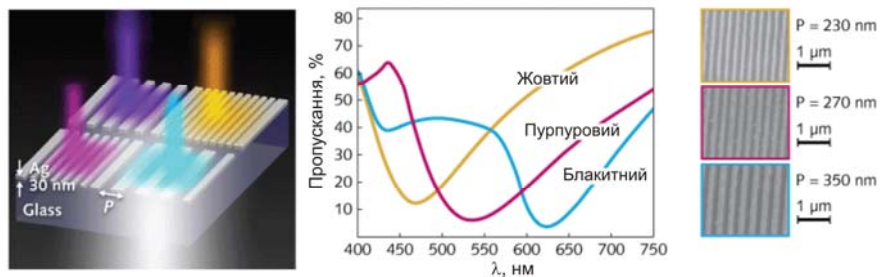


Рисунок 1.15 – АСМ-зображення масивів нанослітів різної періодичності, сформованих у плівці Ag сфокусованим іонним променем, та їх спектри пропускання [33]

У цьому плані надзвичайно привабливими є електрохімічні методи одержання плазмон-активних структур нанометрового масштабу у вигляді нанодротів та наностержнів [23, 34–38], які мають унікальні властивості і можуть бути використані в якості провідних з'єднань в нанoeлектроніці, в магнітних пристроях, хімічних і біологічних датчиках.

У даному методі для виготовлення нанодротів (наностержнів) використовуються матриці (темплати) з анодованого нанопористого оксиду

алюмінію (ААО). Плівки ААО на поверхні алюмінію високої чистоти при електрохімічному травленні у певних розчинах здатні утворювати квазіперіодичні структури пор [34, 36, 38, 39]. На поверхні алюмінію формується тонкий шар густого оксиду алюмінію (Al_2O_3). Молярна частка оксиду алюмінію удвічі більша, ніж чистого алюмінію. Це спричинює появу в оксиді механічних стискувальних напружень. Незважаючи на густину оксиду, у зовнішньому електричному полі можливий зустрічний дрейф іонів алюмінію та кисню, зумовлений наявністю кристалографічних дефектів. Вихід іона алюмінію на межу з електролітом супроводжується утворенням поруватого оксиду (рис. 1.16, *a* і 1.17, *в*). Вважають, що квазірегулярна система наноканалів є наслідком впливу двох чинників – механічних напружень та локальних електричних полів.

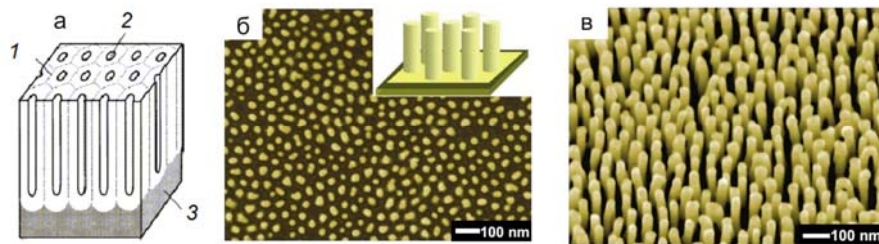


Рисунок 1.16 – Темплат на базі ААО (*a*) (1 – комірка, 2 – пора, 3 – алюмінієва підкладка) та СЕМ-зображення системи квазірегулярних Au-наностержнів, сформованих в порах ААО (*б, в*) (*б* – в матриці Al_2O_3 , *в* – після видалення Al_2O_3) [36-38]

Товщина плівки поруватого ААО і щільність пор залежать від режимів попередньо хімічного та електрохімічного травлення алюмінієвих підкладок [34,38,39]. Щільність пор становить 10^{10} - 10^{11} см^{-2} . Відмітимо, що в [39] для виготовлення темплату, що представляє собою високоупорядкований масив нанопор, було використано алюмінієву фольгу високого класу чистоти (99,99 %) товщиною 250 мкм. Виготовлені шаблони з товщиною плівок ААО 5-100 мкм, розміром пор 30-80 нм та відстанню між ними ~ 95 нм. Діаметр пор залежить від часу анодизації (рис. 1.17 *a* і *б*). В подальшому одержані темплати

можна використовувати як маски для формування масивів нанодротів або наностержнів з високим ступенем упорядкування. Діаметр нанодротів (наностержнів) визначається розміром пор, а їх довжина – часом електроосадження [37]. Максимальна довжина визначається товщиною шару ААО. На рис. 1.17 б, в наведено зображення масиву наностержнів золота в матриці ААО (б) та після її видалення у водному розчині гідроксиду натрію [37]. Були сформовані масиви значної площі, які складаються з окремих наностержнів Au діаметром 20-40 нм і довжиною 200-400 нм та відстанню між ними 40-100 нм. Спектри екстинкції вбудованих в матрицю ААО масивів наностержнів (наноантен), досліджені при різних поляризаціях (*s*- і *p*-) і кутах падаючого світла, містять два максимуми (рис. 1.18 а), які відображають як анізотропію матриці, так і взаємозв'язок між стержнями. Короткохвильовий максимум (~ 525 нм) пов'язаний з поверхневим плазмонним збудженням, перпендикулярним поздовжній осі наностержня (*T*-резонанс), і який можна збудити поляризованим світлом. Довгохвильовий максимум, який виникає тільки при похилому падінні *p*-поляризованого збуджуючого світла, пов'язаний з переміщенням електронної плазми вздовж наностержня (*L*-резонанс). Положення цих резонансів легко змінювати зміною діаметру і довжини наностержнів та відстанню між ними [37]. Після видалення матриці ААО, за рахунок зміни показника заломлення з 1.6 до 1, має місце зсув *L*-резонансу в бік *T*-резонансу і навіть їх перекриття (рис. 1.18, б).

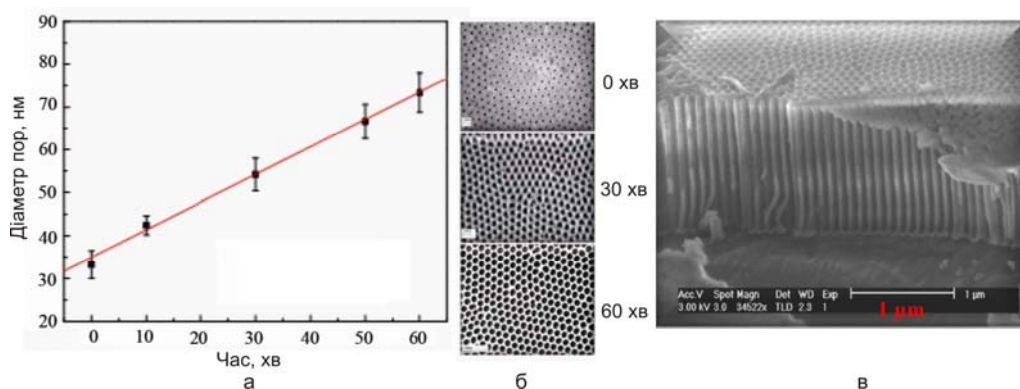


Рисунок 1.17 – Залежність розміру пор від часу обробки (а), СЕМ-зображення зразків, анодованих протягом 0, 30 і 60 хв. (б) та СЕМ-зображення перерізу плівки ААО (в) [39]

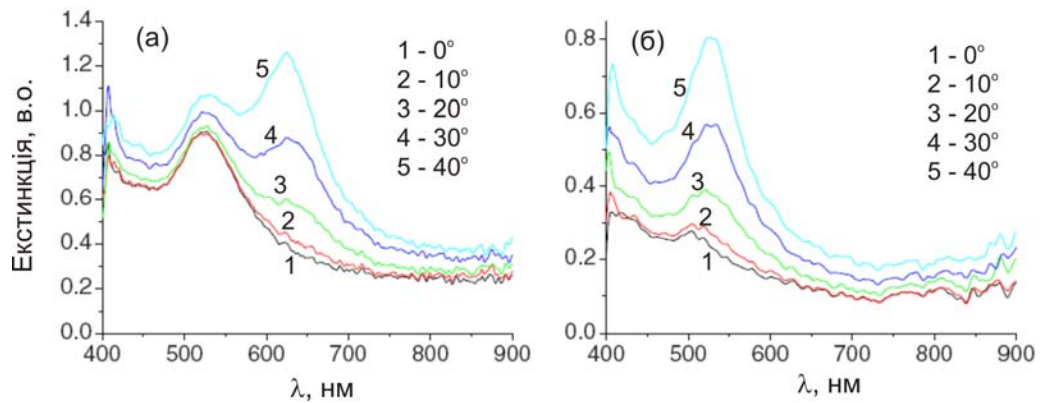


Рисунок 1.18 – Спектри екстинкції масивів наностержнів золота в матриці ААО (а) та після видалення матриці (б) (діаметр і довжина наностержнів та віддаль між ними рівні 25, 300 і 40 нм, відповідно) [39]

1.2. Застосування плазмон-активних підкладок в раманівській спектроскопії

Наноструктуровані металічні поверхні знаходять широке застосування в різноманітних областях науки і техніки, зокрема спектроскопії комбінаційного розсіювання світла (поверхнево підсилена раманівська спектроскопія (SERS)) та біосенсоричі [16,28,40–49].

Поверхнево підсилена раманівська спектроскопія є потужним методом аналізу біологічних молекул, живих клітин та інших речовин у надмалих концентраціях завдяки унікальній властивості – підсилення раманівського сигналу при збудженні поверхневих плазмонів і, відповідно, можливості визначення присутності малої кількості молекул речовин за їх характеристичними спектрами.

Найбільш придатними SERS підкладками є підкладки з наноструктурованих різними методами плівок золота і срібла, які ефективно

розсіюють та поглинають світло у певній, досить вузькій ділянці спектру (ППР), що дозволяє на декілька порядків підвищити коефіцієнт підсилення SERS сигналу. Наприклад, в [48] для SERS підкладок двох типів, сформованих на основі НЧ Au у формі зірок, приводяться значення коефіцієнта підсилення 10^5 і 10^6 . Перший тип (I) підкладок був сформований адсорбцією золотих НЧ на модифіковані скляні пластинки, що поміщалися в колоїдний розчин з попередньо синтезованими НЧ, а другий (II) – у процесі безпосереднього зародження золотих НЧ на модифікованих скляних пластинках, які занурювалися у розчин, в якому відбувався колоїдний синтез (темплатний синтез) [47-49]. СЕМ-зображення таких підкладок наведені на рис. 1.19. Проведені дослідження підсилення SERS підкладками раманівського розсіювання світла при різних концентраціях молекул барвника кристалічного фіолетового в резонансних та нерезонансних умовах лазерного збудження показали (рис. 1.20), що при використанні лазерного випромінювання з $\lambda=532$ нм і $\lambda=671$ нм для SERS підкладок I і II типів вдається зареєструвати спектри від розчинів з концентраціями 10^{-8} М і 10^{-9} М, відповідно, в той час як при нанесенні досліджуваної речовини на скло – з концентрацією 10^{-3} М ($\lambda=671$ нм) і 10^{-5} М ($\lambda=532$ нм) [48,49].

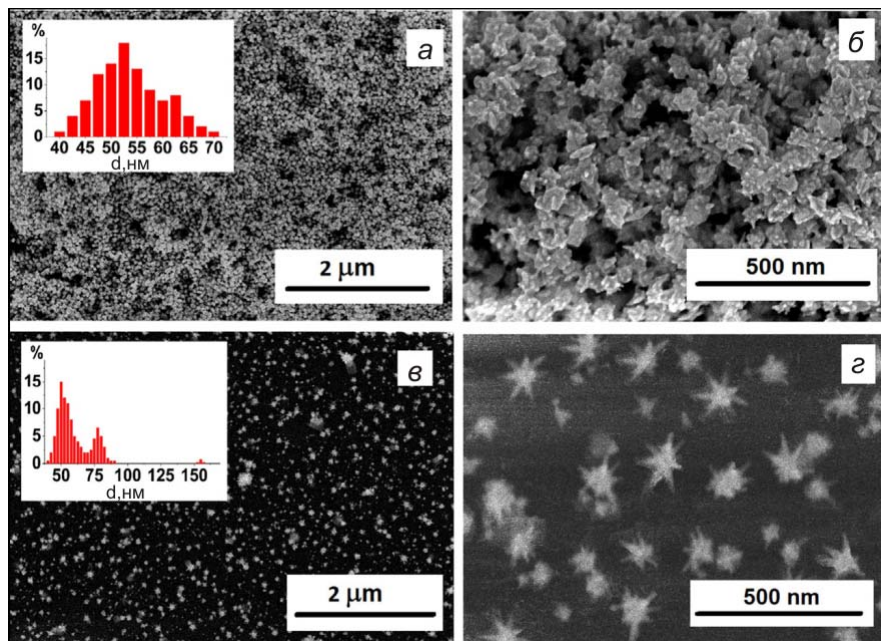


Рисунок 1.19 – СЕМ-зображення масивів зіркоподібних НЧ Au I (*a, б*) і II (*в, г*) типів [49]

Подібні результати були одержані і при дослідженні (з використанням зеленого лазера) раманівських спектрів молекул родаміну (R6G) [47]. На рис. 1.21 наведені спектри комбінаційного розсіювання світла молекул R6G, нанесених на скляну (крива 1) і SERS (II) (крива 2) підкладки. Відмітимо, що SERS-сигнал від молекул родаміну, нанесених на плазмонну підкладку, на декілька порядків вищий, ніж для цих же молекул, але нанесених на скло. Коефіцієнт підсилення у наведеному експерименті складає 10^4 . Відмітимо, що при використанні лазера з $\lambda=471$ нм ефект підсилення раманівського сигналу набагато менший [47].

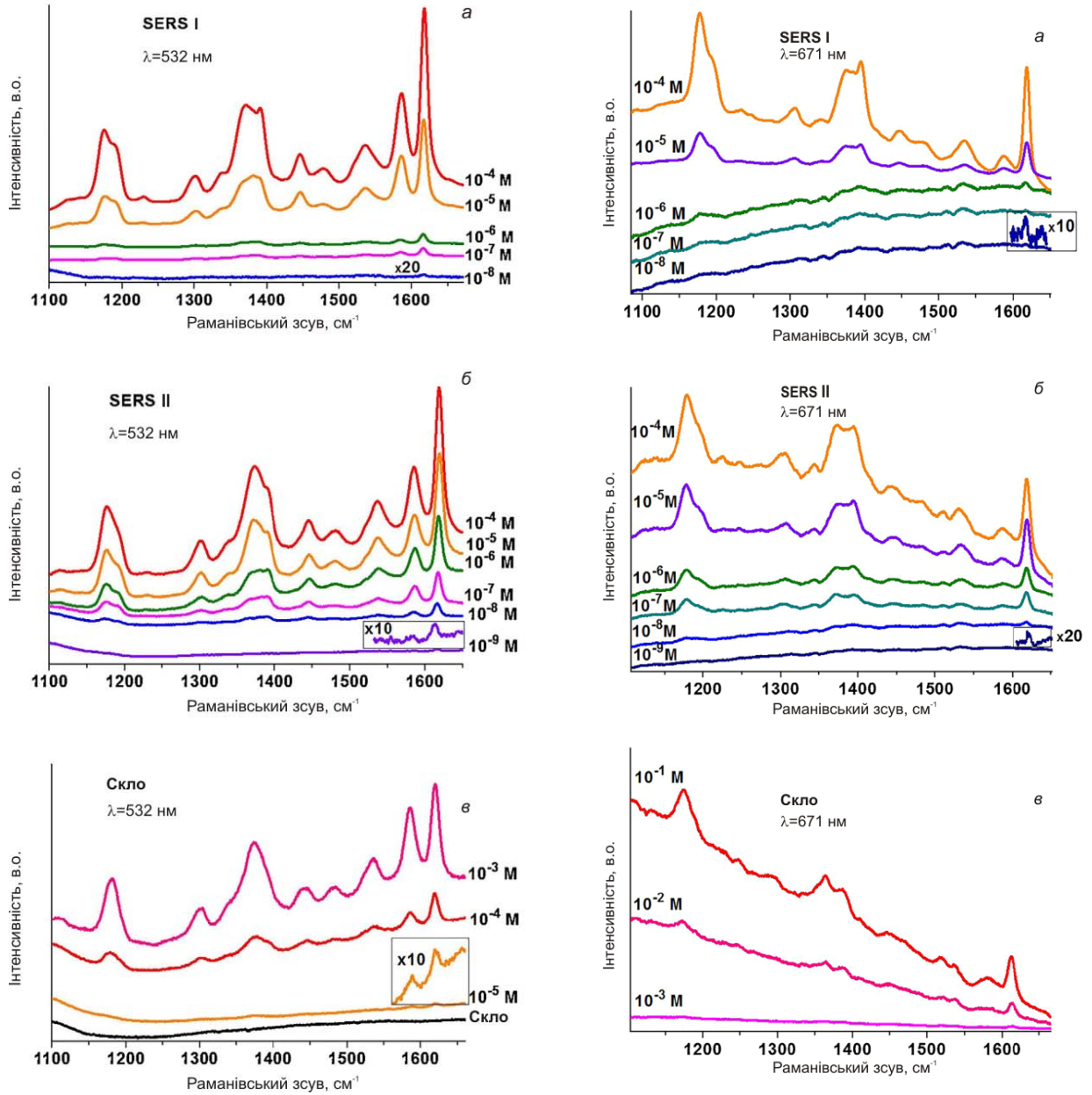


Рисунок 1.20 – SERS-спектри барвника кристалічного фіолетового, нанесеного на SERS-підкладки I (а) і II (б) типу та на скляні (в) підкладки.

Концентрації молекул барвника вказані на кривих [49]

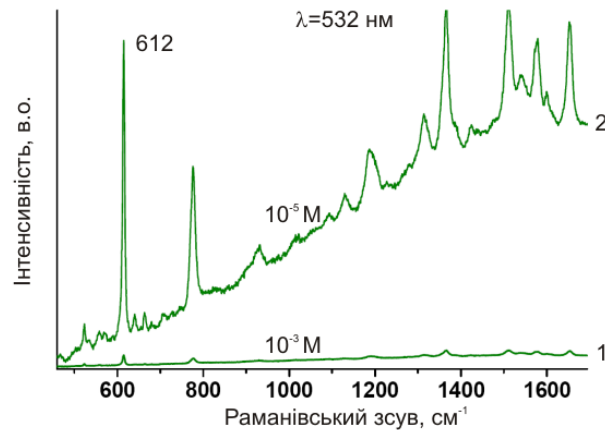


Рисунок 1.21 – Раманівські спектри молекул R6G, нанесених на скляну (I) і SERS (II) (2) підкладки. Концентрації розчинів вказані на кривих [47]

В [44] показана можливість використання в якості SERS підкладок плівок золота, шорсткість поверхні яких штучно збільшена електрохімічним методом (рис. 1.22 а). Як приклад, на рис. 9.38 (крива 2) наведено раманівський спектр для *benzene thiol*, адсорбованого на таку поверхню. Спектр містить ряд смуг різної інтенсивності, характерних для цієї речовини. Однак, для таких композитів ступінь підсилення сигналу сильно залежить від ділянки SERS підкладки, на яку нанесено *benzene thiol* [44]. Відповідно, низькою є і відтворюваність результатів. Значно вищий рівень раманівського сигналу виявлений при використанні SERS підкладок з наноструктурованого (за рахунок використання маски із полістиренових сфер) золота (рис. 1.22 б-г). Як видно з рис. 1.23 (крива 1) ефект підсилення раманівського сигналу у цьому випадку набагато вищий, ніж при використанні підкладки з шорсткою поверхнею (крива 2) [44]. За твердженням авторів цієї роботи вищою є і відтворюваність результатів досліджень (стандартне відхилення становить не більше 10 %).

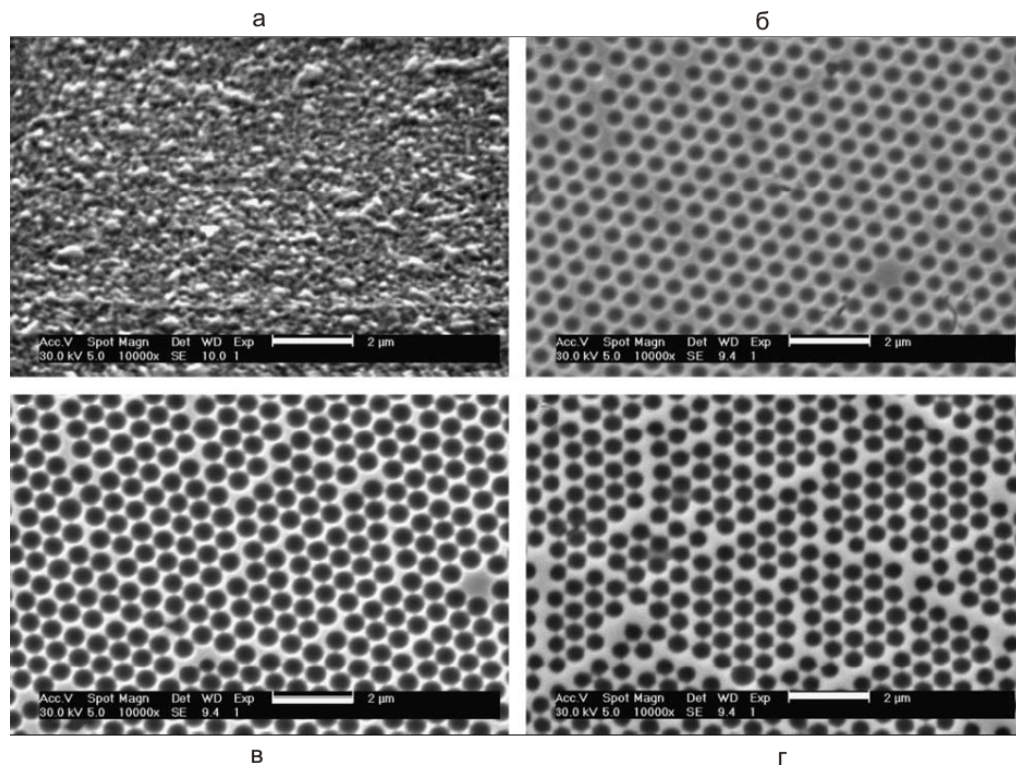


Рисунок 1.22 – СЕМ-зображення розвинутої (за шорсткістю) електрохімічним методом (а) та структурованої за рахунок використання полістиренових сфер діаметром 600 нм (б-г) поверхні золота. Різна ступінь структуризації відповідає товщинам плівки золота 150 нм (б), 260 нм (в) і 460 нм (г), відповідно. Маркер масштабу – 2 мкм [44]

В [43] в якості SERS підкладок були використані упорядковані масиви подовжених золотих наночастинок різного розміру. СЕМ-зображення цих масивів (I і II) показані на вставках рис. 1.24 а, б. Для масиву I головна ($l=175$ нм) та коротка ($d=126$ нм)вісі паралельні підкладці ($l/d=1.39$) Висота (h) НЧ Au рівна 40 нм, а відстань між ними (L) – 461 нм. Для масиву II: $l=154$ нм, $d=120$ нм, $l/d=1.28$, $h=40$ нм, $L=500$ нм. Дані масиви проявляють дуже вузький плазмонний резонанс, спектральне положення якого залежить від їх геометричних параметрів. Анізотропія форми наночастинок дозволяє для збудження ППР використання лазерного випромінювання різної поляризації [43].

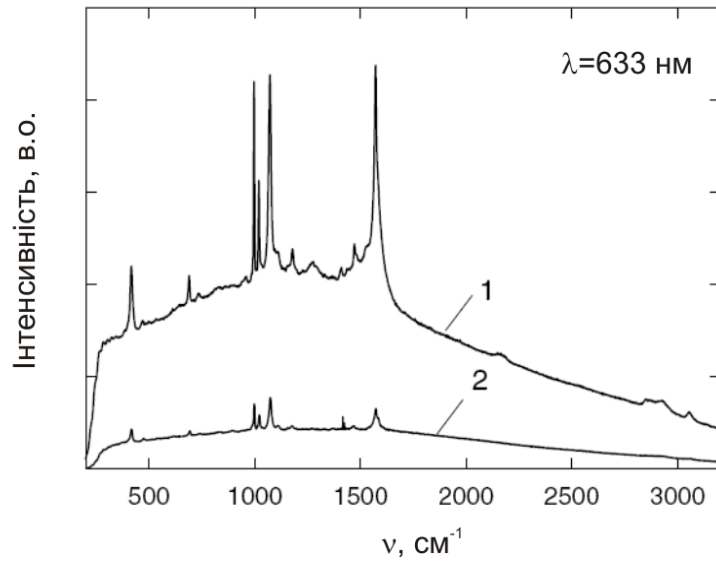


Рисунок 1.23 – SERS-спектри *benzene thiol*, нанесеного на підкладку, зображену на рис. 1.22, б (крива 1), та на шорстку поверхню Au (рис. 1.22, а) (крива 2) [44]

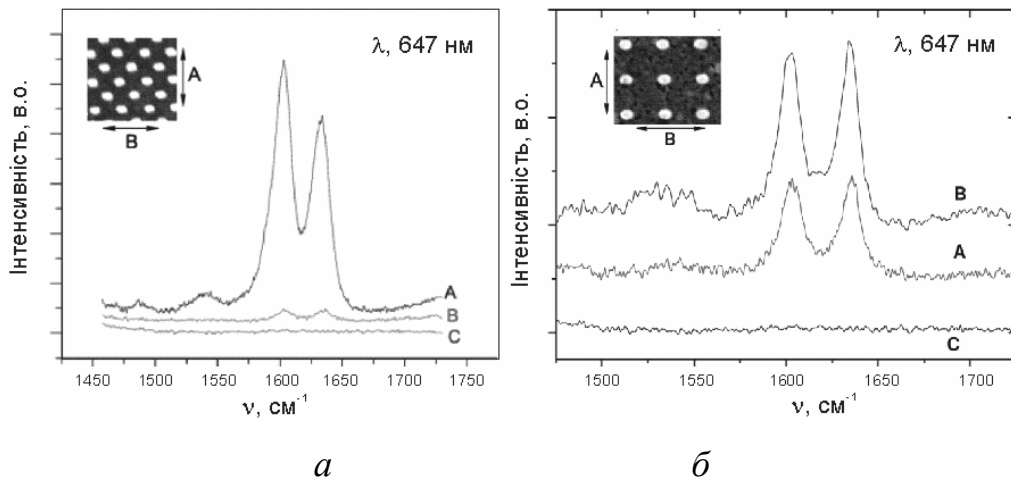


Рисунок 1.24 – SERS-спектри водного розчину *trans-1, 2- bi-(4-pyridyl) ethylene* (BPE) з концентрацією $5 \cdot 10^{-4}$ М, нанесеного на масиви подовжених золотих НЧ різної морфології (пояснення в тексті) [43]

Можливість використання таких SERS підкладок для підсилення раманівського сигналу була доведена за допомогою водного розчину *trans-1, 2- bi-(4-pyridyl) ethylene* (BPE) з концентрацією $5 \cdot 10^{-4}$ М, нанесеного на масиви I (рис. 1.24 а, вставка) і II (рис. 1.24 б, вставка). При збудженні раманівського спектру кріптоновим лазером ($\lambda=647$ нм) його вигляд суттєво залежить від поляризації лазерного променя (рис. 1.24, а, б). На даному рисунку спектри А і

В відповідають лазерному збудженню при поперечній та поздовжній поляризації променю, відповідно. Спектр С записаний для розчину ВРЕ, нанесеного за межами масиву НЧ Au (на гладкій золотій плівці). Відмітимо, що всі спектри були записані при однакових умовах. Спектральний діапазон вимірювань складав $1450-1750 \text{ см}^{-1}$, оскільки саме у цьому діапазоні знаходяться основні коливні моди молекул ВРЕ.

Як видно з рис. 1.24 *a*, для молекул досліджуваної речовини, нанесених на масив I, гігантський раманівський сигнал одержано для ортогональної щодо вісі НЧ Au поляризації (крива А). Для поздовжньої поляризації інтенсивність смуг незначна (крива В). У випадку використання в якості SERS підкладок масиву II з меншим співвідношенням l/d , гігантський сигнал одержано при лазерному збудженні з поздовжньою поляризацією променю (крива В). Однак, і для ортогональної поляризації інтенсивність коливних мод раманівського спектру значна (крива А). В той же час, як при поперечній, так і при поздовжній поляризації лазерного променю, сигнал комбінаційного розсіювання світла практично відсутній для молекул ВРЕ, нанесених на золоту плівку за межами масиву наночастинок.

Ще більш вражаючий SERS-ефект було виявлено в [41] при дослідженні спектрів комбінаційного розсіювання родаміну з наднизькою концентрацією молекул, адсорбованого на прості подовжені НЧ срібла. На рис. 9.40, наведені спектри комбінаційного розсіювання світла молекул родаміну з концентрацією $2 \cdot 10^{-11} \text{ M}$, одержані за допомогою лінійно поляризованих (*p*- і *s*-) лазерних променів з двох наночастинок срібла. Як і у попередньому випадку, можливість використання лазерного випромінювання довільної поляризації обумовлена анізотропією форми НЧ Ag. При запису раманівських спектрів для збудження використовувався сфокусований (250 нм) промінь аргонного лазера ($\lambda=514.5 \text{ нм}$) потужністю 250 нВт. SERS-сигнал одержувався в спектральному діапазоні ($1000-1900 \text{ см}^{-1}$), в якому найбільш яскраво проявляються характерні для цього барвника коливні моди. Як видно з рис. 1.25 основні смуги

раманівського спектру R6G впевнено детектуються як для *p*-, так і для *s*-поляризації, незважаючи на його наднизьку концентрацію.

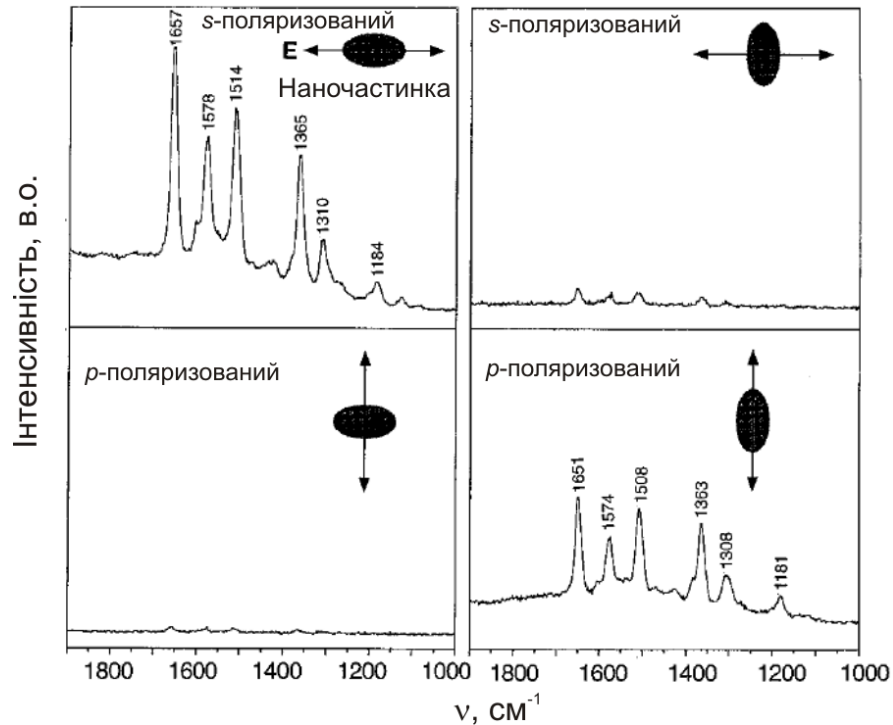


Рисунок 1.25 – SERS-спектри молекул R6G (концентрація $2 \cdot 10^{-11}$ М), одержаних з двох подовжених наночастинок срібла [41]

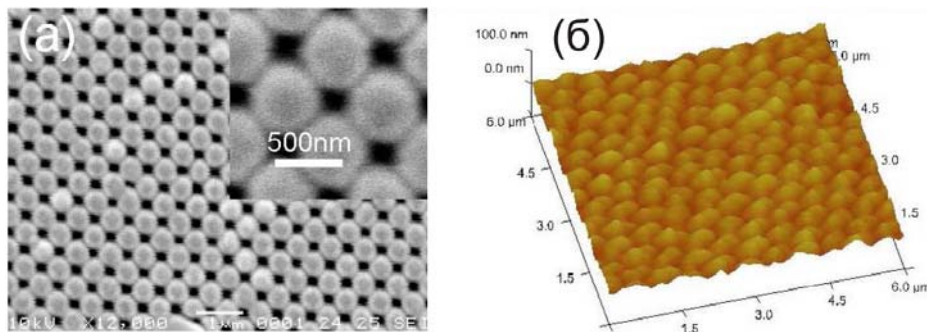


Рисунок 1.26 – СЕМ- (а) та АСМ- (б) зображення SERS-підкладок на основі плівки As_2S_3 [45]

Ефективними SERS підкладками для підсилення раманівських спектрів різних речовин можуть бути періодичні структури, одержані на основі органічних та неорганічних фоторезистів із застосуванням методу

фотолітографії. Так, в роботі [45] в якості таких підкладок були запропоновані періодичні наноструктури на основі fotocутливих плівок сульфїду миш'яку (As_2S_3) рїзної форми, розміру та періоду. Поверхневі рельєфи на плівках As_2S_3 товщиною 2 мкм одержували з використанням голографїчної схеми запису та наступного протравлювання в органічному травнику. Опромїнення халькогенїдних плівок здійснювали твердотїльними лазерами з довжиною хвилї 532 нм. В якостї травників використовували *di-isopentylamine* and *dimethylsulfoxide*. За рахунок селективності травлення опромїнених та неопромїнених ділянок халькогенїдної плівки на її поверхні формувалася періодична структура у вигляді напівсферичних утворів, яка, у подальшому, покривалася шаром золота товщиною 300 нм. СЕМ-і АСМ-зображення однієї із таких структур (перїод ґратки – 730 нм, діаметр утворів – 460 нм, висота напівсфер – 70 ± 5 нм) наведена на рис. 1.26. Дослідження показали, що одержанї наноструктури можуть бути використанї в якостї ефективних SERS-підкладок. Цї підкладки характеризуються резонансним піком поглинання, спектральне положення та інтенсивність якого залежить від періоду ґратки та відповідного діаметру наноутвору [45]. Можливість використання підкладок, виготовлених на основі сульфїду миш'яку та золота, для виявлення малих концентрацій барвників методом раманївської спектроскопії була доведена за допомогою водних розчинів родамїну R6G рїзної концентрації. Характерні для даного барвника три домінантні коливні піки раманївського сигналу при 1320, 1366 і 1509 cm^{-1} впевнено детектувалися при концентраціях ~ 1 мкМ. Інші смуги в раманївських спектрах родамїну проявлялися при концентраціях, вищих 10 мкМ (рис. 1.27). В той же час, проведенї аналогічні дослідження раманївських спектрів R6G, нанесеного на гладку (неструктуровану) золоту поверхню, показали на відсутність будь-яких коливних піків [45].

2 РОЗМІРНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПТИЧНИХ І ПЛАЗМОННИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВСФЕРИЧНИХ МЕТАЛЕВИХ НАНОЧАСТИНОК

2.1 Поляризованість напівсферичної наночастинки

Розглянемо металевий наноострівець у вигляді напівсфери радіусом R і діелектричної проникністю $\epsilon(\omega)$ (середовище 1). Напівсфера розташована на діелектричній підкладці (рис. 2.1) з діелектричною проникністю ϵ_d (середовище 2), а діелектрична проникність оточуючого середовища – ϵ_m (середовище 3). Допоміжна область 4 у підкладці має для загальності діелектричну проникність ϵ_d (середовище 4).

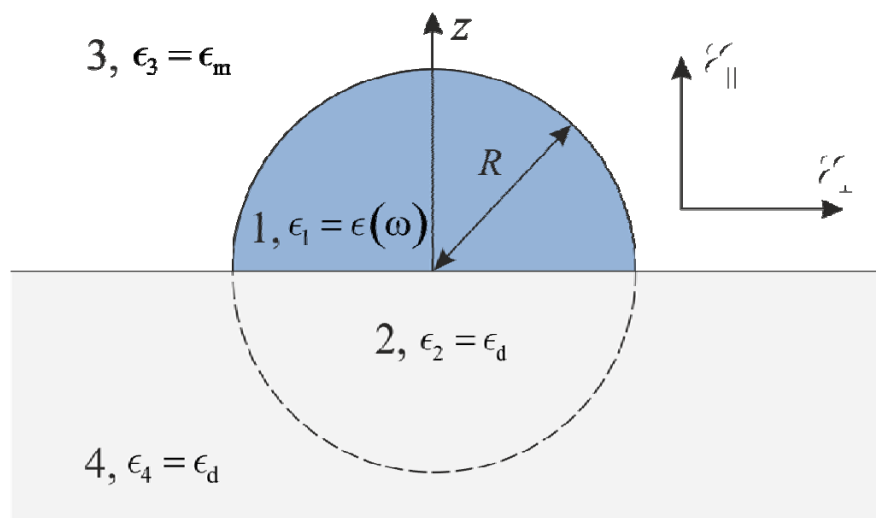


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення напівсфери на підкладці

Внаслідок анізотропії системи існують два незалежних розв'язки – для випадків зовнішнього поля \mathbf{E} , перпендикулярного і паралельного площині перерізу підкладки – оточуюче середовище (рис. 2.1). Отже, є дві незалежних компоненти тензора поляризованості напівсферичної металевої наночастинки аксіальна α_p , що відповідає напрямку зовнішнього поля, перпендикулярного підкладці і паралельного осі z ($\mathbf{E} \parallel Oz$), і поперечна α_{\perp} , коли зовнішнє поле

паралельно підкладці і перпендикулярно осі z ($\mathbf{E} \perp Oz$). Останній випадок відповідає нормальному падінню світла.

Якщо розмір наночастинки набагато менше довжини хвилі, для розв'язку задачі можна скористатися квазістатичним наближенням. У цьому випадку потенціал, що створюється напівсферою в усьому просторі, визначається розв'язком рівняння Лапласа

$$\Delta\varphi = 0. \quad (2.1)$$

Розглянемо випадок нормального падіння світлової хвилі, коли зовнішнє поле перпендикулярно осі z . Слід відзначити, що в дипольному наближенні випадок, що розглядається, не відрізняється від класичної задачі про поляризованість металеві сфери в електричному полі. Тому працюватимемо в квадрупольному наближенні. У цьому наближенні потенціали всередині і поза напівсфери мають вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi_1(r, \theta, \phi) &= [A_1 r P_1^1(\cos\theta) + A_2 r^2 P_2^1(\cos\theta)] \cos\phi; \\ \varphi_2(r, \theta, \phi) &= \left[\frac{B_1}{r^2} P_1^1(\cos\theta) + \frac{B_2}{r^3} P_2^1(\cos\theta) - E_0 r P_1^1(\cos\theta) \right] \cos\phi; \\ \varphi_3(r, \theta, \phi) &= \left[\frac{C_1}{r^2} P_1^1(\cos\theta) + \frac{C_2}{r^3} P_2^1(\cos\theta) - E_0 r P_1^1(\cos\theta) \right] \cos\phi; \\ \varphi_4(r, \theta, \phi) &= [D_1 r P_1^1(\cos\theta) + D_2 r^2 P_2^1(\cos\theta)] \cos\phi, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де $P_1^1(\cos\theta)$ и $P_2^1(\cos\theta)$ – приєднані поліноми Лежандра першого і другого порядку; ϕ – полярний кут, θ – азимутальний кут, r – радіус.

Невідомі коефіцієнти A_i , B_i , C_i , D_i ($i=1, 2$), що входять в (2.2), можна знайти з граничних умов – умови неперервності потенціалу і нормальної складової вектора електричної індукції на плоскій межі між двома

напівсферами і напівпросторами та на напівсферичній межі між сферою і напівпростором:

$$\begin{aligned} \varphi_1|_{r=R} = \varphi_3|_{r=R}, \quad \varphi_2|_{r=R} = \varphi_4|_{r=R}, \\ \Gamma(\omega) \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \Big|_{r=R} = T_m \frac{\partial \varphi_3}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{\partial \varphi_4}{\partial r} \Big|_{r=R}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \varphi_1|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = \varphi_4|_{\theta=\frac{\pi}{2}}, \quad \varphi_2|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = \varphi_3|_{\theta=\frac{\pi}{2}}, \\ \Gamma(\omega) \frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = T_d \frac{\partial \varphi_3}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}}, \quad T_d \frac{\partial \varphi_2}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = T_m \frac{\partial \varphi_4}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

У дипольному наближенні

$$\begin{cases} \varphi_1 = Ar \sin \theta \cos \phi; \\ \varphi_4 = Er \sin \theta \cos \phi; \\ \varphi_2 = \left(\frac{B}{r^2} - \epsilon \mathbf{E}_0 r \right) \sin \theta \cos \phi; \\ \varphi_3 = \left(\frac{D}{r^2} - \mathbf{E}_0 r \right) \sin \theta \cos \phi. \end{cases} \quad (2.5)$$

Підставляючи (2.5) в (2.3) і (2.4), отримаємо

$$\begin{aligned} AR = \frac{D}{R^2} - \mathbf{E}_0 R; \quad A\Gamma(\omega) = - \left(\frac{2D}{R^3} + \mathbf{E}_0 \right) T_m; \\ ER = \frac{B}{R^2} - \epsilon \mathbf{E}_0 R, \quad R = - \frac{2B}{R^3} - \epsilon \mathbf{E}_0; \end{aligned}$$

звідки

$$\begin{cases} -AR + \frac{D}{R^2} = \mathbf{E}_0 R; \\ A\Gamma(\omega) + \frac{2D}{R^3} T_m = -\mathbf{E}_0 T_m, \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} -A + \frac{D}{R^3} = \mathbf{E}_0 \\ A + \frac{\Gamma_m}{\Gamma(\omega)} \frac{2D}{R^3} = -\frac{\Gamma_m}{\Gamma(\omega)} \mathbf{E}_0 \end{cases}$$

$$\frac{D}{R^3} \left(1 + \frac{2\Gamma_m}{\Gamma(\omega)} \right) = \left(1 - \frac{\Gamma_m}{\Gamma(\omega)} \right) \mathbf{E}_0$$

$$D = \mathbf{E}_0 R^3 \frac{\Gamma(\omega) - \Gamma_m}{\Gamma(\omega) + 2\Gamma_m},$$

звідки

$$\alpha_{\text{нсф}} = \frac{D}{\mathbf{E}_0 R^3} = \frac{\Gamma(\omega) - \Gamma_m}{\Gamma(\omega) + 2\Gamma_m}. \quad (2.6)$$

Таким чином, у дипольному наближенні $\alpha_{\text{нсф}} = \alpha_{\text{сф}}$ і необхідно використовувати квадрупольне наближення

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \left[A_1 r P_1^1(\cos\theta) + A_2 r^2 P_2^1(\cos\theta) \right] \cos\phi; \\ \varphi_2 &= \left[\frac{B_1}{r^2} P_1^1(\cos\theta) + \frac{B_2}{r^3} P_2^1(\cos\theta) - \mathbf{E}_0 r P_1^1(\cos\theta) \right] \cos\phi; \\ \varphi_3 &= \left[\frac{C_1}{r^2} P_1^1(\cos\theta) + \frac{C_2}{r^3} P_2^1(\cos\theta) - \mathbf{E}_0 r P_1^1(\cos\theta) \right] \cos\phi; \\ \varphi_4 &= \left[D_1 r P_1^1(\cos\theta) + D_2 r^2 P_2^1(\cos\theta) \right] \cos\phi, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де вирази для поліномів Лежандра мають вигляд

$$P_1^1(\cos\theta) = \sin\theta; \quad P_2^1(\cos\theta) = \frac{3}{2}\sin 2\theta = 3\sin\theta\cos\theta. \quad (2.8)$$

З граничних умови при $\theta = \frac{\pi}{2}$ випливає

$$\begin{cases} A_1 = D_1; \\ B_1 = C_1; \\ \Gamma(\omega)A_2 = \Gamma_d D_2; \\ \Gamma_d B_2 = \Gamma_m C_2. \end{cases} \quad (2.9)$$

Для того, щоб скористатися граничними умовами на сферичній поверхні ($r = R$), домножимо кожний вираз у (2.8) $\sin\theta P_2^1(\cos\theta)$ і проінтегруємо по θ у верхній напівплощині від 0 до $\frac{\pi}{2}$, а у нижній від $\frac{\pi}{2}$ до π :

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\theta P_1^1(\cos\theta) P_2^1(\cos\theta) d\theta = 3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^3\theta \cos\theta d\theta = 3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^3\theta d(\sin\theta) = \frac{3}{4};$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\theta [P_2^1(\cos\theta)]^2 d\theta &= 9 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^3\theta \cos^2\theta d\theta = -9 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - \cos^2\theta) \cos^2\theta d(\cos\theta) = \\ &= -3 \cos^3\theta \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} + \frac{9}{5} \cos^5\theta \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = 3 - \frac{9}{5} = \frac{6}{5}; \end{aligned}$$

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \sin\theta P_1^1(\cos\theta) P_2^1(\cos\theta) d\theta = 3 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \sin^3\theta \cos\theta d\theta = 3 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \sin^3\theta d(\sin\theta) = -\frac{3}{4};$$

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \sin \theta \left[P_2^1(\cos \theta) \right]^2 d\theta = 9 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \sin^3 \theta \cos^2 \theta d\theta = -9 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} (1 - \cos \theta) \cos^2 \theta d(\cos \theta) =$$

$$= -3 \cos^3 \theta \Big|_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} + \frac{9}{5} \cos^5 \theta \Big|_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} = 3 - \frac{9}{5} = \frac{6}{5}.$$

Отже,

$$\begin{aligned} \varphi_1(r, \phi) &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \varphi_1(r, \theta, \phi) \sin \theta P_2^1(\cos \theta) d\theta = \left[\frac{3}{4} A_1 r + \frac{6}{5} A_2 r^2 \right] \cos \phi; \\ \varphi_2(r, \phi) &= \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \varphi_2(r, \theta, \phi) \sin \theta P_2^1(\cos \theta) d\theta = \left[-\frac{3}{4} \frac{B_1}{r^2} + \frac{6}{5} \frac{B_2}{r^3} + \frac{3}{4} \mathbf{E}_0 r \right] \cos \phi; \\ \varphi_3(r, \phi) &= \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \varphi_3(r, \theta, \phi) \sin \theta P_2^1(\cos \theta) d\theta = \left[\frac{3}{4} \frac{C_1}{r^2} + \frac{6}{5} \frac{C_2}{r^3} + \frac{3}{4} \mathbf{E}_0 r \right] \cos \phi; \\ \varphi_4(r, \phi) &= \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \varphi_4(r, \theta, \phi) \sin \theta P_2^1(\cos \theta) d\theta = \left[-\frac{3}{4} D_1 r + \frac{6}{5} D_2 r^2 \right] \cos \phi. \end{aligned} \tag{2.10}$$

Підставляючи граничні умови на поверхні сфери

$$\varphi_1|_{r=R} = \varphi_3|_{r=R}; \quad \varphi_2|_{r=R} = \varphi_4|_{r=R}; \quad \Gamma(\omega) \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \Big|_{r=R} = \Gamma_m \frac{\partial \varphi_3}{\partial r} \Big|_{r=R}; \quad \Gamma(\omega) \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} \Big|_{r=R} = \Gamma_m \frac{\partial \varphi_4}{\partial r} \Big|_{r=R},$$

отримуємо ще чотири рівняння

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{3}{4} A_1 R + \frac{6}{5} A_2 R^2 = \frac{3}{4} \frac{C_1}{R^2} + \frac{6}{5} \frac{C_2}{R^3} - \frac{3}{4} \mathbf{E}_0 R \\ -\frac{3}{4} \frac{B}{R^2} + \frac{6}{5} \frac{B_2}{R^3} + \frac{3}{4} \mathbf{E}_0 R = -\frac{3}{4} D_1 R + \frac{6}{5} D_2 R^2 \\ -\frac{3}{4} D_1 + \frac{12}{5} D_2 R = \frac{3}{2} \frac{B_1}{R^3} - \frac{18}{5} \frac{B_2}{R^4} + \frac{3}{4} \mathbf{E}_0 \\ \tau(\omega) \left[\frac{3}{4} A_1 + \frac{12}{5} A_2 R \right] = \tau_m \left[-\frac{3}{2} \frac{C_1}{R^3} - \frac{18}{5} \frac{C_2}{R^4} - \frac{3}{4} \mathbf{E}_0 \right] \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Підставляючи співвідношення (2.9) в систему (2.11), отримуємо систему чотирьох рівнянь з чотирма невідомими

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{3}{4R^2} C_1 + \frac{6}{5R^3} C_2 - \frac{3}{4} R D_1 - \frac{6}{5} R^2 \frac{\tau_d}{\tau(\omega)} D_2 = \frac{3}{4} \mathbf{E}_0 R; \\ \frac{3}{4R^2} C_1 - \frac{6}{5R^3} \frac{\tau_m}{\tau_d} C_2 - \frac{3}{4} R D_1 + \frac{6}{5} R^2 D_2 = \frac{3}{4} \mathbf{E}_0 R; \\ \frac{3}{2R^3} C_1 - \frac{18}{5R^4} \frac{\tau_m}{\tau_d} C_2 + \frac{3}{4} D_1 - \frac{12}{5} R D_2 = -\frac{3}{4} \mathbf{E}_0; \\ -\frac{3}{2R^3} C_1 - \frac{18}{5R^4} C_2 - \frac{3}{4} \tau(\omega) D_1 - \frac{12}{5} R \tau_d D_2 = \frac{3}{4} \mathbf{E}_0. \end{array} \right. \quad (2.12)$$

З першого і другого рівнянь (2.12) випливає

$$C_2 = R^5 \frac{\tau_d [\tau(\omega) + \tau_d]}{\tau(\omega) [\tau_m + \tau_d]} D_2 \quad (2.13)$$

Додаючи ліві і праві частини третього і четвертого рівнянь (2.12), матимемо

$$-\frac{18}{5R^4} C_2 \left(1 + \frac{\tau_m}{\tau_d} \right) + \frac{3}{4} \left(1 - \frac{\tau(\omega)}{\tau_m} \right) D_1 - \frac{12}{5} R \left(\frac{\tau_d}{\tau_m} + 1 \right) D_2 = 0;$$

$$-\frac{18}{5R^4} \frac{T_d + T_m}{T_d} R^5 \frac{T_d (T(\omega) + T_d)}{T(\omega)(T_m + T_d)} D_2 + \frac{3}{4} \left(1 - \frac{T(\omega)}{T_m}\right) D_1 - \frac{12}{5} R \left(\frac{T_d}{T_m} + 1\right) D_2 = 0;$$

$$\frac{1}{4} \left(1 - \frac{T(\omega)}{T_m}\right) D_1 = \frac{4}{5} R \left(\frac{T_d}{T_m} + 1\right) D_2 + \frac{6}{5} R \frac{T(\omega) + T_d}{T(\omega)} D_2;$$

$$\frac{T(\omega) - T_m}{T_m} D_1 = -\frac{8}{5} R \left[2 \frac{T_d + T_m}{T_m} + 3 \frac{T(\omega) + T_d}{T(\omega)} \right] D_2;$$

$$\begin{aligned} D_1 &= -\frac{8}{5} R \left[2 \frac{T_m + T_d}{T(\omega) - T_m} + 3 \frac{T_m (T(\omega) + T_d)}{T(\omega)(T(\omega) - T_m)} \right] = \\ &= -\frac{8}{5} R D_2 \frac{2T(\omega)T_m + 2T(\omega)T_d + 3T_m T_d + 3T(\omega)T_m}{T(\omega)(T(\omega) - T_m)}, \end{aligned}$$

$$D_1 = -\frac{8}{5} R \frac{5T(\omega)T_m + 2T(\omega)T_d + 3T_m T_d}{T(\omega)(T(\omega) - T_m)} D_2. \quad (2.14)$$

Підставляючи (2.13) і (2.14) в друге рівняння (2.12), отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{3}{4R^2} C_1 - \frac{6}{5R^3} \frac{T_m}{T_d} R^5 \frac{T_d (T(\omega) + T_d)}{T(\omega)(T_m + T_d)} D_2 + \\ + \frac{3}{4} R \frac{8}{5} R \frac{5T(\omega)T_m + T(\omega)T_d + 3T_d T_m}{T(\omega)(T(\omega) - T_m)} D_2 + \frac{6}{5} R^2 D_2 = \frac{3}{4} \mathbf{E}_0 R; \end{aligned}$$

$$\frac{3}{4R^2} C_1 + \frac{6}{5} R^2 \left[1 + \frac{5T(\omega)T_m + 2T(\omega)T_d + 3T_d T_m}{T(\omega)(T(\omega) - T_m)} - \frac{T_m (T(\omega) + T_d)}{T(\omega)(T_m + T_d)} \right] D_2 = \frac{3}{4} \mathbf{E}_0 R;$$

$$\frac{3}{4R^2} C_1 + \frac{6}{5} R^2 H(T) D_2 = \frac{3}{4} \mathbf{E}_0 R,$$

де

$$H(\tau) = 1 + \frac{5\tau(\omega)\tau_m + 2\tau(\omega)\tau_d + 3\tau_d\tau_m}{\tau(\omega)(\tau(\omega) - \tau_m)} - \frac{\tau_m(\tau(\omega) + \tau_d)}{\tau(\omega)(\tau_m + \tau_d)} = \frac{G(\tau)}{F(\tau)};$$

$$F(\tau) = \tau(\omega)(\tau_d + \tau_m)(\tau(\omega) - \tau_m);$$

$$\begin{aligned} G(\tau) &= \tau(\omega)(\tau_d + \tau_m)(\tau(\omega) - \tau_m) + (5\tau(\omega)\tau_m + 2\tau(\omega)\tau_d + 3\tau_d\tau_m)(\tau_d + \tau_m) - \\ &\quad - \tau_m(\tau(\omega) + \tau_d)(\tau(\omega) - \tau_m) = \tau^2(\omega)\tau_d + \tau^2(\omega)\tau_m - \tau(\omega)\tau_d\tau_m - \\ &\quad - \tau(\omega)\tau_m^2 - \tau^2(\omega)\tau_m - \tau(\omega)\tau_d\tau_m + \tau(\omega)\tau_m^2 + \tau_d\tau_m^2 + 5\tau(\omega)\tau_d\tau_m + \\ &\quad + 2\tau(\omega)\tau_d^2 + 3\tau_d^2\tau_m + 5\tau(\omega)\tau_m^2 + 2\tau(\omega)\tau_d\tau_m + 3\tau_d\tau_m^2 = \tau^2(\omega)\tau_d + \\ &\quad + 4\tau_d\tau_m^2 + 3\tau_d^2\tau_m + 5\tau(\omega)\tau_d\tau_m + 2\tau(\omega)\tau_d^2 + 5\tau(\omega)\tau_m^2 = \\ &= \tau^2(\omega)\tau_d + \tau(\omega)[5\tau_d\tau_m + 2\tau_d^2 + 5\tau_m^2] + \tau_d\tau_m(3\tau_d + 4\tau_m). \end{aligned}$$

Підставляючи (2.13) і (2.14) в четверте рівняння (2.12), отримаємо

$$\begin{aligned} -\frac{3}{2R^3}C_1 - \frac{18}{5R^4}R^5 \frac{\tau_d(\tau(\omega) + \tau_d)}{\tau(\omega)(\tau_m + \tau_d)}D_2 + \\ + \frac{3}{4} \frac{8}{5} R \frac{\tau(\omega)}{\tau_m} \frac{5\tau(\omega)\tau_m + 2\tau(\omega)\tau_d + \tau_d\tau_m}{\tau(\omega)(\tau(\omega) - \tau_m)}D_2 - \frac{12}{5} R \frac{\tau_d}{\tau_m}D_2 = \frac{3}{4}\mathbf{E}_0; \end{aligned}$$

$$-\frac{3}{2R^3}C_1 - \frac{6}{5}R \left[3 \frac{\tau_d(\tau(\omega) + \tau_d)}{\tau(\omega)(\tau_d + \tau_m)} + 2 \frac{\tau_d}{\tau_m} - \frac{5\tau(\omega)\tau_m + 2\tau(\omega)\tau_d + 3\tau_d\tau_m}{\tau_m(\tau(\omega) - \tau_m)} \right] D_2 = \frac{3}{4}\mathbf{E}_0,$$

або

$$-\frac{3}{2R^3}C_1 - \frac{6}{5}RM(\tau)D_2 = \frac{3}{4}\mathbf{E}_0,$$

де

$$M(\Gamma) = 2 \frac{\Gamma_d}{\Gamma_m} + 3 \frac{\Gamma_d (\Gamma(\omega) + \Gamma_d)}{\Gamma(\omega) (\Gamma_d + \Gamma_m)} - \frac{5\Gamma(\omega)\Gamma_m + 2\Gamma(\omega)\Gamma_d + 3\Gamma_d\Gamma_m}{\Gamma_m (\Gamma(\omega) - \Gamma_m)} = \frac{L(\Gamma)}{K(\Gamma)},$$

$$K(\Gamma) \equiv \Gamma_m \Gamma(\omega) (\Gamma_d + \Gamma_m) (\Gamma(\omega) - \Gamma_m) = \Gamma_m F(\Gamma);$$

$$\begin{aligned} L(\Gamma) &= 2\Gamma_d \Gamma(\omega) (\Gamma_d + \Gamma_m) (\Gamma(\omega) - \Gamma_m) + 3\Gamma_d \Gamma_m (\Gamma(\omega) + \Gamma_d) (\Gamma(\omega) - \Gamma_m) - \\ &\quad - \Gamma(\omega) (\Gamma_d + \Gamma_m) (5\Gamma(\omega)\Gamma_m + 2\Gamma(\omega)\Gamma_d + 3\Gamma_d\Gamma_m) = \\ &= 2\Gamma^2(\omega)\Gamma_d^2 + 2\Gamma^2(\omega)\Gamma_d\Gamma_m - 2\Gamma(\omega)\Gamma_d^2\Gamma_m - 2\Gamma(\omega)\Gamma_d\Gamma_m^2 - \\ &\quad - 2\Gamma(\omega)\Gamma_d\Gamma_m^2 + 3\Gamma^2(\omega)\Gamma_d\Gamma_m + 3\Gamma(\omega)\Gamma_d^2\Gamma_m - 3\Gamma_d^2\Gamma_m^2 - \\ &\quad - 3\Gamma(\omega)\Gamma_d\Gamma_m^2 - 5\Gamma^2(\omega)\Gamma_d\Gamma_m - 5\Gamma^2(\omega)\Gamma_m^2 - 2\Gamma^2(\omega)\Gamma_d^2 - \\ &\quad - 2\Gamma^2(\omega)\Gamma_d\Gamma_m - 3\Gamma(\omega)\Gamma_d^2\Gamma_m - 3\Gamma(\omega)\Gamma_d\Gamma_m^2 = \\ &= -2\Gamma^2(\omega)\Gamma_d\Gamma_m - 5\Gamma^2(\omega)\Gamma_m^2 - 2\Gamma(\omega)\Gamma_d^2\Gamma_m - \\ &\quad - 8\Gamma(\omega)\Gamma_d\Gamma_m^2 - 3\Gamma_d^2\Gamma_m^2 = \\ &= -\Gamma_m \left[\Gamma^2(\omega)(2\Gamma_d + 5\Gamma_m) + 2\Gamma(\omega)\Gamma_d(\Gamma_d + 4\Gamma_m) + 3\Gamma_d^2\Gamma_m \right]. \end{aligned}$$

Отже,

$$\alpha_0 = \frac{C_1}{2R^3\xi_0} = \frac{\frac{L(\Gamma)}{\Gamma_m} + G(\Gamma)}{\frac{L(\Gamma)}{\Gamma_m} - 2G(\Gamma)}, \quad (2.15)$$

де

$$\begin{aligned} \frac{L(\Gamma)}{\Gamma_m} + G(\Gamma) = & -2\Gamma^2(\omega)\Gamma_d - 5\Gamma^2(\omega)\Gamma_m - 2\Gamma(\omega)\Gamma_d^2 - 8\Gamma(\omega)\Gamma_d\Gamma_m - \\ & - 3\Gamma_d^2\Gamma_m + \Gamma^2(\omega)\Gamma_d + 4\Gamma_d\Gamma_m^2 + 3\Gamma_d^2\Gamma_m + 5\Gamma(\omega)\Gamma_d\Gamma_m + \\ & + 2\Gamma(\omega)\Gamma_d^2 + 5\Gamma(\omega)\Gamma_m^2 = -\Gamma^2(\omega)\Gamma_d - 5\Gamma^2(\omega)\Gamma_m - \\ & - 3\Gamma(\omega)\Gamma_d\Gamma_m + 5\Gamma(\omega)\Gamma_m^2 + 4\Gamma_d\Gamma_m^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{L(\Gamma)}{\Gamma_m} - 2G(\Gamma) = & -2\Gamma^2(\omega)\Gamma_d - 5\Gamma^2(\omega)\Gamma_m - 2\Gamma(\omega)\Gamma_d^2 - 8\Gamma(\omega)\Gamma_d\Gamma_m - \\ & - 3\Gamma_d^2\Gamma_m - 2\Gamma^2(\omega)\Gamma_d - 8\Gamma_d\Gamma_m^2 - 3\Gamma_d^2\Gamma_m - 10\Gamma(\omega)\Gamma_d\Gamma_m - \\ & - 4\Gamma(\omega)\Gamma_d^2 - 10\Gamma(\omega)\Gamma_m^2 = -4\Gamma^2(\omega)\Gamma_d - 5\Gamma^2(\omega)\Gamma_m - \\ & - 18\Gamma(\omega)\Gamma_d\Gamma_m - 6\Gamma(\omega)\Gamma_d^2 - 10\Gamma(\omega)\Gamma_m^2 - 6\Gamma_d^2\Gamma_m - 8\Gamma_d\Gamma_m^2. \end{aligned}$$

Остаточно для безрозмірної поперечної компоненти тензора поляризованості можна записати

$$\mathcal{R}_\perp = \frac{(\Gamma_d + 5\Gamma_m)\Gamma^2(\omega) + (3\Gamma_d + 5\Gamma_m)\Gamma_m\Gamma(\omega) - 4\Gamma_d\Gamma_m^2}{(4\Gamma_d + 5\Gamma_m)\Gamma^2(\omega) + 2(3\Gamma_d^2 + 5\Gamma_m^2 + 9\Gamma_d\Gamma_m)\Gamma(\omega) + 2\Gamma_d\Gamma_m(3\Gamma_d + 4\Gamma_m)}. \quad (2.16)$$

Тут для металу використовується діелектрична функція Друде

$$\Gamma(\omega) = \Gamma^\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_{\text{eff}}^2} + i \frac{\omega_p^2 \gamma_{\text{eff}}}{\omega(\omega^2 + \gamma_{\text{eff}}^2)}, \quad (2.17)$$

де ω_p – плазмова частота; γ_{eff} – ефективна швидкість релаксації, що визначається як сума швидкостей об'ємної та поверхневої релаксації [46]

$$\gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\text{bulk}} + \gamma_s = \gamma_{\text{bulk}} + \mathcal{A} \frac{v_F}{l_{\text{eff}}} = \gamma_{\text{bulk}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 \frac{v_F}{R}. \quad (2.18)$$

2.2 Частоти невидимості та поверхневого плазмонного резонансу

Вважатимемо, що уявна частина діелектричної функції значно менша за дійсну частину, а $\gamma_{\text{eff}} = \omega$. У цьому випадку діелектрична функція матиме вигляд

$$\tau(\omega) = \tau^{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (2.19)$$

Розкладаючи чисельник і знаменник виразу (2.16) на множники

$$\alpha_{\perp} = \frac{(\tau(\omega) - \tau_0^{(+)})(\tau(\omega) - \tau_0^{(-)})}{(\tau(\omega) - \tau^{(+)})(\tau(\omega) - \tau^{(-)})} \quad (2.20)$$

та прирівнюючи знаменник (2.19) до нуля, матимемо

$$\tau^{(\pm)} = \frac{-3\Gamma_d^2 - 9\Gamma_d\Gamma_m - 5\Gamma_m^2 \pm \sqrt{9\Gamma_d^4 + 30\Gamma_d^3\Gamma_m + 49\Gamma_d^2\Gamma_m^2 + 50\Gamma_d\Gamma_m^3 + 25\Gamma_m^4}}{4\Gamma_d + 5\Gamma_m}. \quad (2.21)$$

Прирівнюючи $\tau(\omega) = \tau^{(\pm)}$ та підставляючи формулу (2.19), отримаємо

$$\omega_{\text{sp}}^{(\pm)} = \frac{\omega_p}{\sqrt{\tau^{\infty} - \tau^{(\pm)}}}. \quad (2.22)$$

Нехай $\tau^{\infty} = \tau_m = 1$, тоді

$$\tau^{(\pm)} = \frac{1}{4\Gamma_d + 5} \left(-3\Gamma_d^2 - 9\Gamma_d - 5 \pm \sqrt{9\Gamma_d^4 + 30\Gamma_d^3 + 49\Gamma_d^2 + 50\Gamma_d + 25} \right);$$

$$\begin{aligned}\Gamma^\infty - \Gamma^{(\pm)} &= 1 - \frac{-3\Gamma_d^2 - 9\Gamma_d - 5 \pm \sqrt{9\Gamma_d^4 + 30\Gamma_d^3 + 49\Gamma_d^2 + 50\Gamma_d + 25}}{4\Gamma_d + 5} = \\ &= \frac{3\Gamma_d^2 + 13\Gamma_d + 10 \pm \sqrt{9\Gamma_d^4 + 30\Gamma_d^3 + 49\Gamma_d^2 + 50\Gamma_d + 25}}{4\Gamma_d + 5},\end{aligned}$$

або

$$\Gamma^\infty - \Gamma^{(\pm)} = \frac{(3\Gamma_d + 10)(\Gamma_d + 1) m \sqrt{9\Gamma_d^4 + 30\Gamma_d^3 + 49\Gamma_d^2 + 50\Gamma_d + 25}}{4\Gamma_d + 5}.$$

Таким чином, співвідношення для верхньої та нижньої гілок частоти поверхневого плазмонного резонансу набувають вигляду

$$\omega_{\text{sp}}^{(\pm)} = \omega_p \sqrt{\frac{4\Gamma_d + 5}{(3\Gamma_d + 10)(\Gamma_d + 1) m \sqrt{9\Gamma_d^4 + 30\Gamma_d^3 + 49\Gamma_d^2 + 50\Gamma_d + 25}}}. \quad (2.23)$$

Розщеплення плазмонного резонансу

$$\begin{aligned}\Delta\omega_{\text{sp}} &= \omega_{\text{sp}}^{(+)} - \omega_{\text{sp}}^{(-)} = \omega_p \sqrt{4\Gamma_d + 5} \times \\ &\times \left\{ \frac{1}{\sqrt{3\Gamma_d^2 + (4\Gamma^\infty + 9)\Gamma_d + 5(\Gamma^\infty + 1) - \sqrt{9\Gamma_d^4 + 30\Gamma_d^3 + 49\Gamma_d^2 + 50\Gamma_d + 25}}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{(3\Gamma_d + 10)(\Gamma_d + 1) + \sqrt{9\Gamma_d^4 + 30\Gamma_d^3 + 49\Gamma_d^2 + 50\Gamma_d + 25}}} \right\}.\end{aligned} \quad (2.24)$$

Умову невидимості отримаємо, прирівнюючи до нуля чисельник виразу
(2.16)

$$\Gamma(\omega^{\#}) = \rho_0^{(\pm)},$$

або

$$\Gamma^{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^{\#(\pm)2}} = -\frac{\tau_m(3\tau_d + 5\tau_m) \pm \tau_m \sqrt{5(5\tau_d^2 + 27\tau_d\tau_m + 5\tau_m^2)}}{2(\tau_d + 5\tau_m)},$$

звідки

$$\omega^{\#(\pm)} = \frac{\omega_p}{\sqrt{\Gamma^{\infty} - \rho_0^{(\pm)}}}. \quad (2.25)$$

Нехай $\tau_m = 1$, тоді

$$\begin{aligned} \Gamma^{\infty} - \rho_0^{(\pm)} &= \Gamma^{\infty} + \frac{3\tau_d + 5 \pm \sqrt{5(5\tau_d^2 + 27\tau_d + 5)}}{2(\tau_d + 5)} = \\ &= \frac{(2\Gamma^{\infty} + 3)\tau_d + 5(2\Gamma^{\infty} + 1) \pm \sqrt{5(5\tau_d^2 + 27\tau_d + 5)}}{2(\tau_d + 5)}. \end{aligned}$$

Тоді частоти невидимості

$$\omega^{\#(\pm)} = \frac{\omega_p \sqrt{2(\tau_d + 5)}}{\sqrt{(2\Gamma^{\infty} + 3)\tau_d + 5(2\Gamma^{\infty} + 1) \pm \sqrt{5(5\tau_d^2 + 27\tau_d + 5)}}}. \quad (2.26)$$

При $\Gamma^{\infty} = 1$

$$\omega^{\#(\pm)} = \frac{\omega_p \sqrt{2(\tau_d + 5)}}{\sqrt{5(\tau_d + 3)} m \sqrt{5(5\tau_d^2 + 27\tau_d + 5)}}.$$

Різниця частот невидимості для випадків $\tau^\infty = 1$ і $\tau^\infty \neq 1$ буде

$$\Delta\omega_{\#} = \omega_{\#}^{(+)} - \omega_{\#}^{(-)} = \omega_p \sqrt{2(\tau_d + 5)} \left\{ \frac{1}{\sqrt{5(\tau_d + 3)} - \sqrt{5(5\tau_d^2 + 27\tau_d + 5)}} - \frac{1}{\sqrt{5(\tau_d + 3)} + \sqrt{5(5\tau_d^2 + 27\tau_d + 5)}} \right\}; \quad (2.27)$$

$$\Delta\omega_{\#} = \omega_{\#}^{(+)} - \omega_{\#}^{(-)} = \omega_p \sqrt{2(\tau_d + 5)} \left\{ \frac{1}{\sqrt{(2\tau^\infty + 3)\tau_d + 5(\tau^\infty + 1)} - \sqrt{5(5\tau_d^2 + 27\tau_d + 5)}} - \frac{1}{\sqrt{(2\tau^\infty + 3)\tau_d + 5(\tau^\infty + 1)} + \sqrt{5(5\tau_d^2 + 27\tau_d + 5)}} \right\}. \quad (2.28)$$

2.3 Результати розрахунків та їх обговорення

Розрахунки було проведено для випадку наноострівців Al, Cu, Au, Pt і Pd, розташованих на скляній підкладці ($\tau_d = 2,25$) у повітрі ($\tau_m = 1$). Параметри металів наведено у табл. 2.1.

Результати розрахунків частотних залежностей дійсної і уявної частин та модуля поперечної компоненти поляризованості для наноострівців Au наведено на рис. 2.2. Відмітимо, що $\text{Re}\alpha_{\perp}(\hbar\omega)$ є знакозмінною функцією частоти, на відміну від $\text{Im}\alpha_{\perp}(\hbar\omega)$, яка завжди додатна. Кількість мінімумів і максимумів, а також їх величина для $\text{Re}\alpha_{\perp}$ та $\text{Im}\alpha_{\perp}$ суттєво залежить від радіуса острівця.

Так, зі збільшенням радіуса кількість екстремумів та їх абсолютні значення також зростають. При радіусі острівця $R=10$ нм присутні по одному максимуму і мінімуму $\text{Re}\epsilon_{\perp}$ та один максимум $\text{Im}\epsilon_{\perp}$. Зі збільшенням радіуса (криві 2 і 3) на кривих $\text{Re}\epsilon_{\perp}(\hbar\omega)$ і $\text{Im}\epsilon_{\perp}(\hbar\omega)$ виникають додаткові екстремуми, причому перший мінімум $\text{Re}\epsilon_{\perp}$ відповідає першому максимуму $\text{Im}\epsilon_{\perp}$. Максимуми уявної частини поляризованості відповідають поверхневому плазмонному резонансу, а наявність двох піків зумовлена просторовою анізотропією.

Таблиця 2.1 – Параметри металів [47]

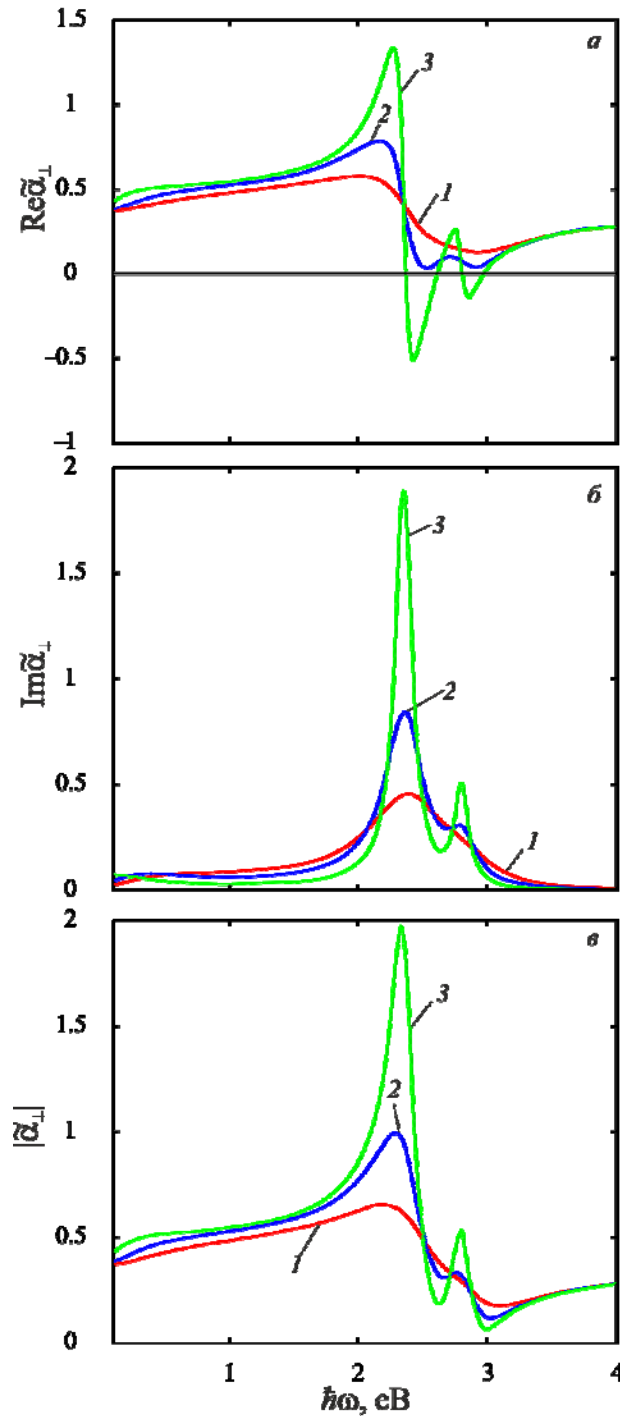
Параметр	Метал				
	Al	Cu	Au	Pt	Pd
r_s / a_0	2,07	2,11	3,01	3,27	4,00
m^* / m_e	1,06	1,49	0,99	0,54	0,37
τ^{∞}	0,7	12,03	9,84	4,42	2,52
$\gamma_{\text{bulk}}, 10^{14} \text{ s}^{-1}$	1,25	0,37	0,35	1,05	1,39

Криві частотних залежностей дійсної і уявної частин та модуля поперечної компоненти поляризованості наноострівців Pt (рис.2 3) якісно подібні відповідним кривим для наноострівців Au, проте абсолютні значення екстремумів для наноострівців Pt більші а другий максимум уявної частини є більш вираженим.

На рис. 2.4, *a* наведено частотні залежності уявної частини поляризованості для напівсферичних наноострівців різних металів з $R = 20$ нм. Цікавим представляється той факт, що другий максимум для наноострівців Au і Cu є слабо вираженим на відмінність від таких самих острівців Pd і Pt. Це

пов'язано з суттєвою відмінністю частот об'ємних плазмонів та часів релаксації для досліджуваних матеріалів.

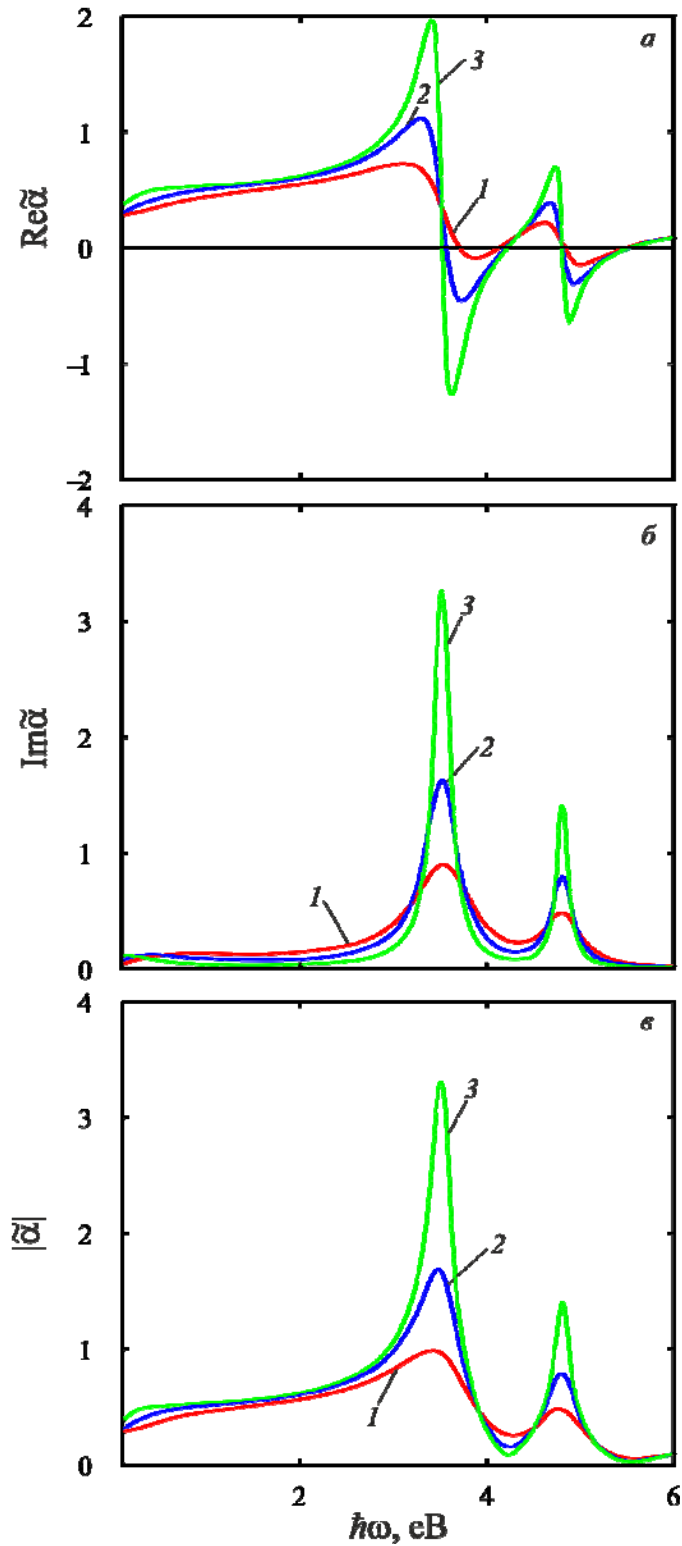
На рис. 2.4, б зображено аналогічні криві для острівців Al з $R = 20$ нм у випадку різної ефективної маси електронів. Бачимо, що зі збільшенням ефективної маси має місце «блакитний» зсув максимумів частотних залежностей уявної частини поляризованості. Треба також відмітити, що піки є гострими, а їх уширення мале, що свідчить, про незначну роль процесів релаксації електронів провідності в острівцях Al.



1 – $R = 10$ нм; 2 – $R = 20$ нм; 3 – $R = 50$ нм

a – дійсна частина; *б* – уявна частина; *в* – модуль

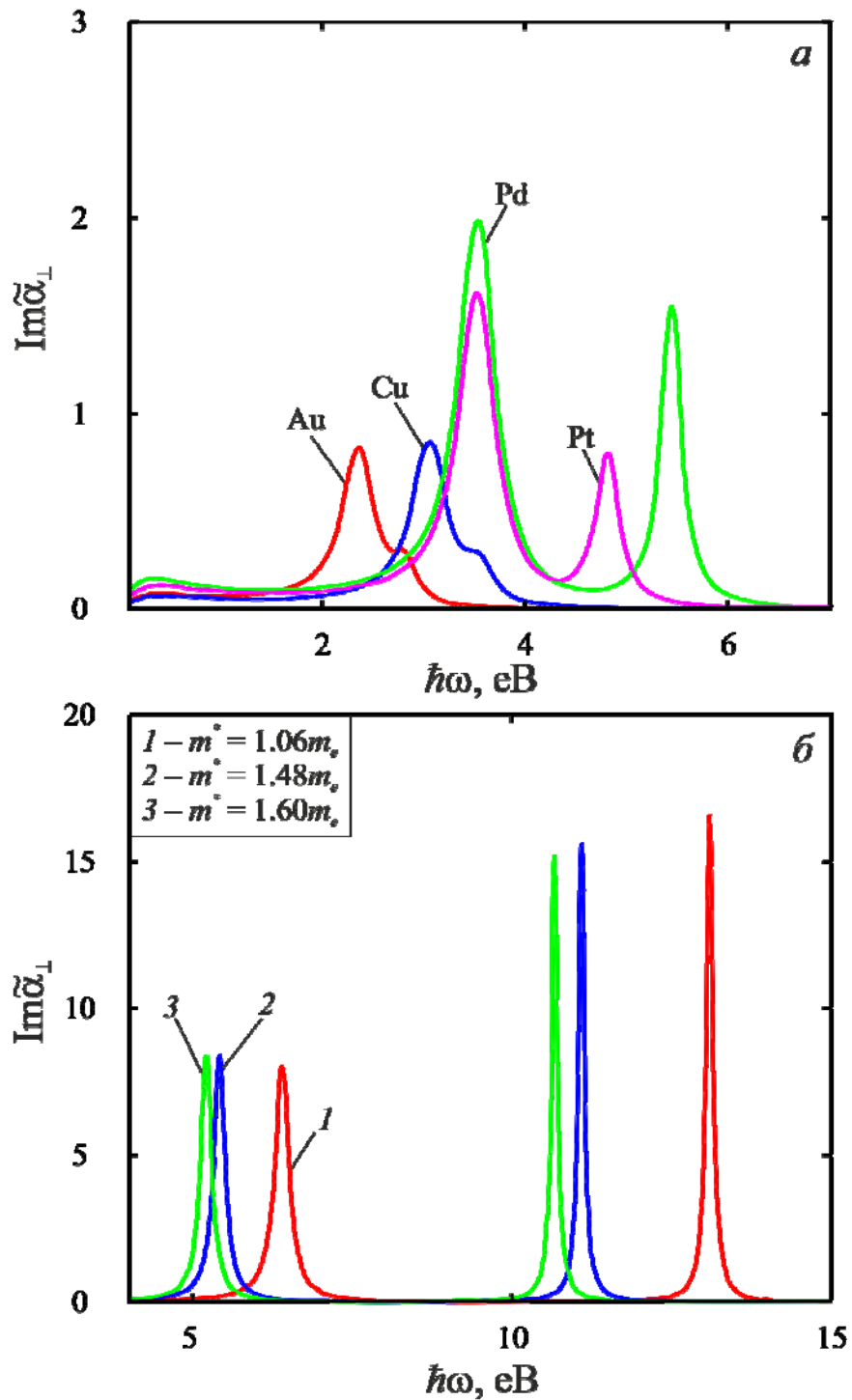
Рисунок 2.2 – Частотні залежності поперечної компоненти поляризованості нанострівців Au на склі ($\tau_d = 2,25$), оточуюче середовище – повітря ($\tau_m = 1$) за різних радіусів



1 – $R = 10$ нм; 2 – $R = 20$ нм; 3 – $R = 50$ нм

a – дійсна частина; *б* – уявна частина; *в* – модуль

Рисунок 2.3 – Частотні залежності поперечної компоненти поляризованості наноострівців Pt на склі ($\tau_d = 2,25$), оточуюче середовище – повітря ($\tau_m = 1$) за різних радіусів



a – наноострівці різних металів;

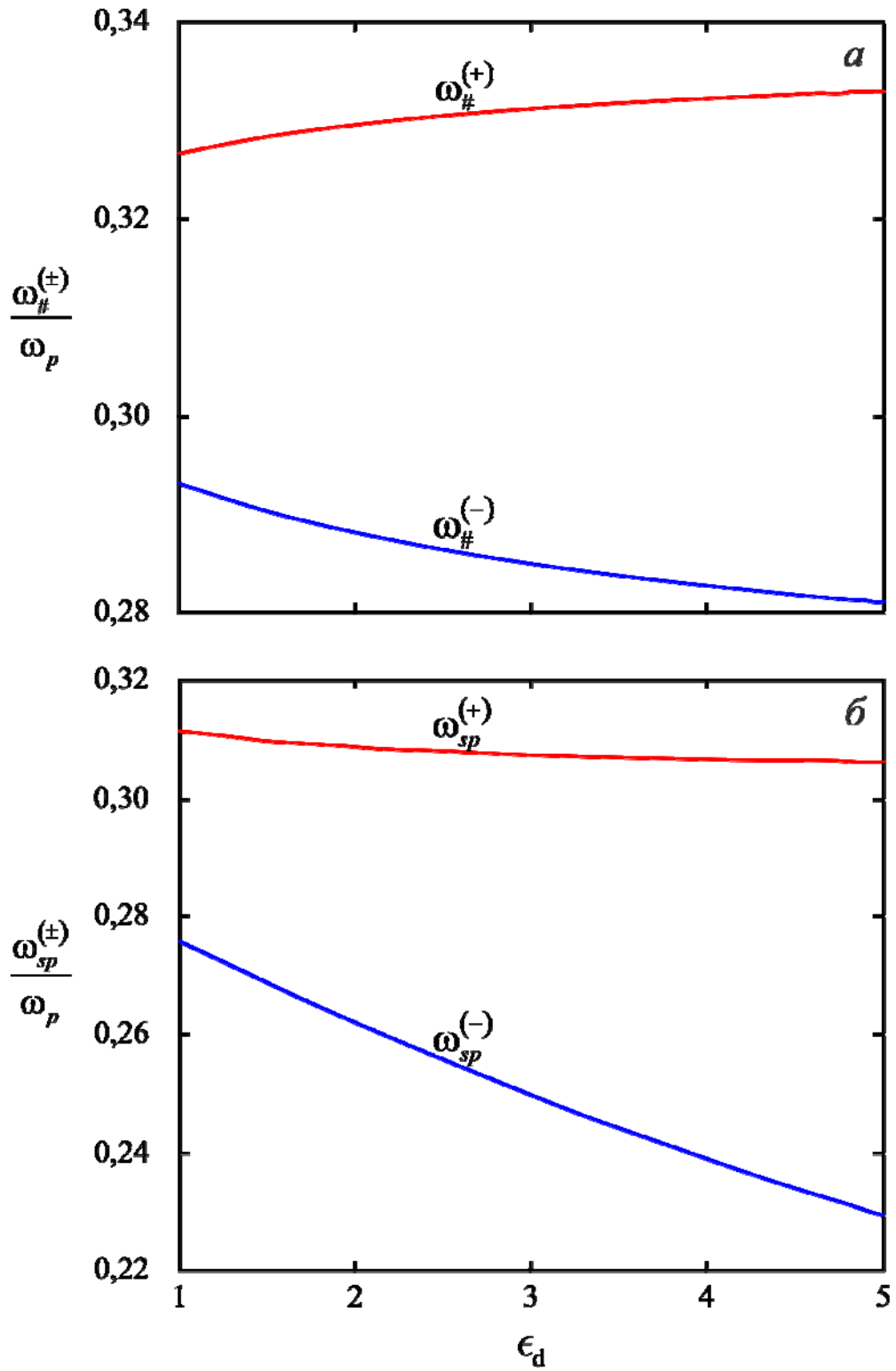
б – наноострівці Al за різних значень ефективної маси

Рисунок 2.4 – Частотні залежності уявної частини поперечної компоненти поляризованості металевих наноострівців на склі

Залежності частот невидимості та поверхневого плазмонного резонансу від діелектричної проникності підкладки ϵ_d наведено на рис. 2.5. З рівнянь

(2.23) і (2.26) впливає, що у напівсферичного острівця є дві частоти невидимості $\omega_{\#}^{(\pm)}$ і дві частоти поверхневого плазмонного резонансу $\omega_{sp}^{(\pm)}$, тобто має місце розщеплення частоти невидимості і поверхневого плазмонного резонансу. Відмітимо, що верхня частота невидимості $\omega_{\#}^{(+)}$ слабо зростає зі збільшенням діелектричної проникності підкладки, тоді як нижня частота слабо зменшується (рис. 2.5, *a*). На відміну від $\omega_{\#}^{(\pm)}$ верхня частота поверхневого плазмонного резонансу $\omega_{sp}^{(+)}$ слабо, а нижня $\omega_{sp}^{(-)}$ сильно зменшуються зі збільшенням τ_d (рис. 2.5, *b*).

Стосовно різниці частот невидимості $\Delta\omega_{\#}$ і розщеплення поверхневого плазмонного резонансу $\Delta\omega_{sp}$ (рис. 2.6) потрібно відмітити, що різниця частот невидимості $\Delta\omega_{\#}$ дуже слабо зростає зі збільшенням діелектричної проникності підкладки, а, величина розщеплення $\Delta\omega_{sp}$ навпаки, зростає суттєво. Таким чином, для утворення «смуги невидимості» потрібно використовувати підкладки з якомога меншою діелектричною проникністю.



a – частота невидимості ; *б* – частота поверхневого плазмонного резонансу

Рисунок 2.5 – Залежності верхньої та нижньої гілок частот від діелектричної проникності матеріалу підкладки

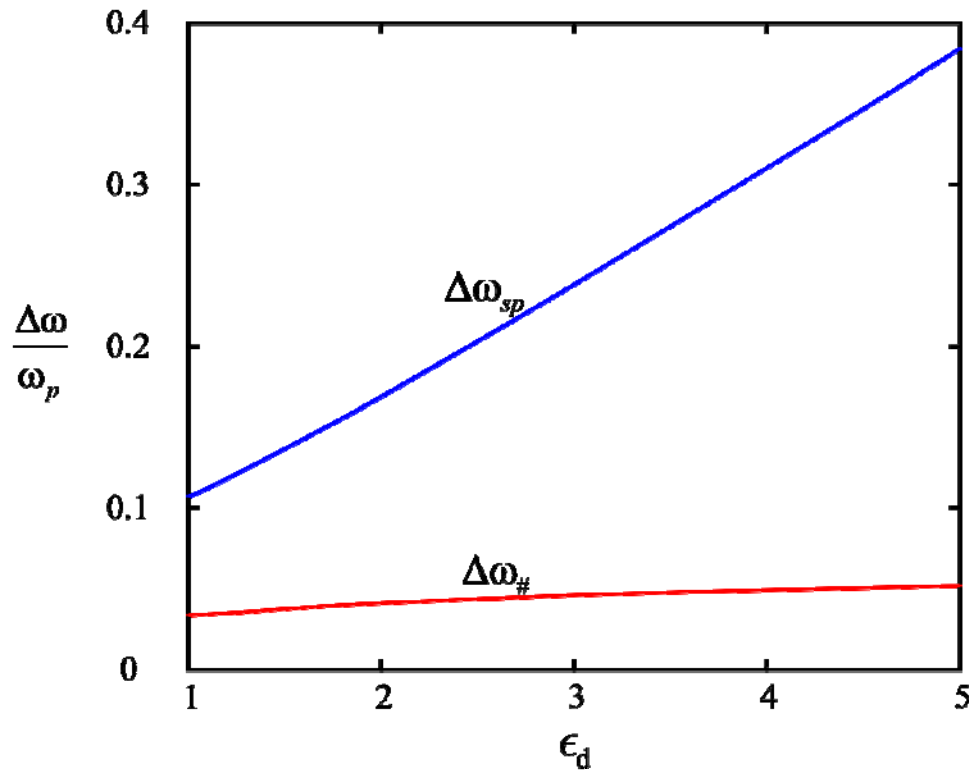


Рисунок 2.6 – Залежності різниці частот поверхневого плазмонного резонансу і невидимості від діелектричної проникності матеріалу підкладки

3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Стан ринку нанотехнологій

На сьогодні запропоновано і реалізовано декілька наноструктурованих фоточутливих матеріалів на основі металевих наночастинок. Характеристики таких матеріалів переважно залежать від локалізованого поверхневого плазмонного резонансу, пов'язаного зі збудженням колективних коливань вільних електронів у наночастиці при її опроміненні світлом із певною довжиною хвилі. Поверхневі плазмони надзвичайно чутливі до геометрії і розміру наночастинок, що відкриває нові можливості для їх застосування для різних напрямів оптики і фотоніки.

Однією з подібних плазмон-активних систем є острівцеві плівки, що можна розглядати як систему на півсфер, розташованих на деякій діелектричній підкладці.

В таблиці 3.1 описано ідею створення та використання острівцевих плівок.

Таблиця 3.1 - Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Користь для споживачів (користувачів)
Плазмонні властивості острівцевих металевих наноплівки	1. Військова сфера	Маскування. Покриття з ефектом невидимості.
	2. Інфо-комунікаційні технології.	Вдосконалення методів оптичної інформації.
	3. Оохоронна сфера	Особливо охоронювані об'єкти з пропусковим режимом.
	4. Медицина	Оптика. Адресна доставка ліків. Виявлення та лікування злоякісних утворень.
	5. Електроніка	Підвищення швидкодії сучасних електронних пристроїв.

Так як створення та використання остріцевих плівок може бути широко застосований у різних сферах, треба детальніше охарактеризувати потенційний ринок в Україні, що наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Головні конкуренти	ІТ-компанії
		Компанії, що надають охоронні послуги
2.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує
3.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Потребує великих інвестицій
4.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Треба розробляти специфічні сертифікації та стандартизації

Тобто, як видно з таблиці 3.2, даний ринок стагнує, тому що ніхто в Україні не використовує на даний момент остріцевих плівок.

Тому, основними конкурентами можуть бути ІТ-компанії, що можуть почати використовувати цей метод, компанії, що надають охоронні послуги . Але так як цей метод тільки набирає оберти, він потребує значних інвестицій та розробки специфічних стандартизацій та специфікацій. Тобто зайти на ринок з цією технологією, з одного боку, не складно, бо ніхто ще її не використовує, але і важко, бо це потребує великих інвестицій.

Тому, для детального визначення потенційних груп клієнтів, їх характеристики, та формування орієнтовного переліку вимог до даного методу для кожної групи, було зроблено табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – 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.	Маскування	Військові підрозділи	Секретність, оперативність, точність, досконалість.	Ефективність та швидкість заходів забезпечення безпеки. Налаштування під особливі потреби.
2.	Інфо-комунікаційні технології.	ІТ-компанії.	Налаштовуваність під особливі потреби, ефективність, стійкість до атак та взлому, швидкість роботи. Ефективність, стійкість до атак, швидкість роботи,	Ефективність, швидкість та надійність заходів забезпечення безпеки, стійкість до атак. Налаштовуваність під особливі потреби.
3.	Медицина	Лікарні	Виявлення та лікування злоякісних утворень.	Створення на основі таких плівок спектрально селективних поглинаючих покриттів, а також приводить до підсилення сигналу флуоресценції, інфрачервоної спектроскопії і раманівського розсіювання

Із таблиці 3.3 можна зробити висновок, що для користувачів нанотехнологій, об'єктів та комп'ютерів або мобільних пристроїв важливі ефективність, надійність, швидкість методів забезпечення безпеки, вартість,

легкість впровадження і підтримки, а також – налаштування під особливі потреби.

Для визначення сильних та слабких сторін використання капсульного методу штучних нейронних мереж, був здійснений SWOT-аналіз середовища реалізації інноваційного проекту, що наведений у таблиці 3.4

Таблиця 3.4 – SWOT-аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
<ul style="list-style-type: none"> - Інноваційність; - порівняна ефективність забезпечення захисту; - висока інтегрованість у різні сфери; - відсутність аналогів на ринку; - доступність технології. 	<ul style="list-style-type: none"> - Недопрацьованість технології, як нової; - потребує специфічних спеціалістів для реалізації; - низька розповсюдженість методу; - неможливість використання одразу, потрібен час для тестувань.
Можливості:	Загрози:
<ul style="list-style-type: none"> - Може використовуватись у багатьох сферах; - залучення інвестицій; - висока конкуренція серед аналогічних пропозицій; - великий потенціал розвитку методу; - буде більш доступний з часом. 	<ul style="list-style-type: none"> - Може зайняти багато часу для впровадження; - не буде достатньої кількості спеціалістів (кваліфікованих кадрів); - великі витрати праці спеціалістів; - може з'явитися більш доступна та продуктивна технологія; - міжнародний ринок витіснить український потенціал.

Також, щоб більш розгорнуто розглянути ідею створення та використання остріцевих плівок, треба розробити ринкову стратегію проекту.

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів, що описано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Військова сфера	У найближчий час не дуже велика готовність, бо метод новий.	Низький попит, тому що існуючі методи розвинені.	Конкуренція досить велика, тому що існує багато охоронних служб, які надають свої послуги.	Складно, тому що охоронні заходи та засоби потребують випробувань на надійність.
2.	Сфера медицини	У найближчий час не дуже велика готовність, бо метод новий.	Низький попит, тому що існуючі методи розвинені та на даний момент можуть бути ефективнішими і дешевшими.	Велика, тому що банків багато, але через специфічність умов, що потрібні, конкуренція не така велика, як у 1 цільовій групі.	Дуже складно, тому що заходи та засоби для забезпечення безпеки банку – дуже серйозне завдання.

3.	Власники ІТ-компаній	У найближчий час не дуже велика готовність, бо метод ще новий.	Низький попит, але ІТ-компанії можуть швидше впроваджувати нові технології, ніж інші сектори.	Велика, тому що ІТ-компаній багато в Україні, але мало хто з них розробляє антивірусне ПЗ. Тому саме у ринку таких компаній конкуренція менша.	Середня складність, тому що можна достатньо легко створити свій стартап або створити свою ідею в ІТ.
Які цільові групи обрано: Власники ІТ-компаній, тому що на цей ринок можна легше зайти та швидше впровадити ідею.					

Тепер потрібно ідентифікувати стейкхолдерів, здійснити їх пріоритизацію та побудувати карту стейкхолдерів, яка дозволить візуалізувати картину взаємозв'язків стейкхолдерів. Вона позначена на рисунку 3.1.

Створення карти проводилось у 4 етапи:

1) ідентифікація – окреслення актуальних груп стейкхолдерів. Це ІТ-компанії, бізнес-партнери, держава, інвестори, фіскальна служба, споживачі, міжнародні організації та наукові організації та установи;

2) аналіз – дослідження впливу та інтересів стейкхолдерів;

3) візуалізація – візуальна ілюстрація взаємодії зі стейкхолдерами;

4) пріоритизація – вибір ключових стейкхолдерів, які найкраще відповідали б істотним питанням, визначеним на попередньому етапі.

З метою відображення взаємозв'язків стейкхолдерів на карті на рис. 3.1 виокремлено три концентричних області, в яких розміщено всіх зацікавлених

У розробці моделі беруть участь один науковий консультант (НК) і науковий співробітник (НС). Весь комплекс науково-дослідних робіт можна підрозділити на типові етапи – таблиця 3.6. При кожному етапі вказуються виконавці і тривалість виконання робіт.

Таблиця 3.6. – Етапи роботи

Номер етапу	Найменування етапу	Тривалість, днів	Зміст роботи
I	Підготовчий	6	Робота на збиранням інформації
II	Вибір методу і напрямків моделювання	7	Вивчення формування плазмонних структур різної морфології та їх оптичні характеристики
III	Проведення моделювання для Ge	18	Дослідження застосування плазмон-активних підкладок у раманівській спектроскопії
IV	Проведення моделювання ВАХ	11	Вивчення поляризованості напівсферичної наночастинки
V	Перевірка моделі на адекватність	7	Робота над ефектом невидимості
VI	Корегування моделі і завершальна перевірка її працездатності	6	Результати розрахунків та їх обговорення
VII	Заключний	10	Економічне обґрунтування проекту

Трудомісткість НДР розраховується в людино-днях витрат робочого часу основних виконавців і залежить від складності розробки й ступеня її новизни, кваліфікації виконавців, наявності у них навичок дослідницької роботи, від використовуваних матеріалів, вимог надійності, технічних умов комплектуючих схем і таке інше.

Спочатку розрахуємо трудомісткість Q кожного етапу:

$$\begin{aligned} \text{I етап: } Q_1 &= 4 \times 2 = 8 \text{ люд. дн.} \\ \text{II етап: } Q_2 &= 6 \times 2 = 12 \text{ люд. дн.} \\ \text{III етап: } Q_3 &= 16 \times 1 = 16 \text{ люд. дн.} \\ \text{IV етап: } Q_4 &= 9 \times 1 = 9 \text{ люд. дн.} \\ \text{V етап: } Q_5 &= 5 \times 2 = 10 \text{ люд. дн.} \\ \text{VI етап: } Q_6 &= 4 \times 2 = 8 \text{ люд. дн.} \\ \text{VII етап: } Q_7 &= 8 \times 1 = 8 \text{ люд. дн.} \end{aligned}$$

Розрахуємо тривалість етапів:

$$T_{\text{ц}} = \frac{Q}{R \cdot k_{\text{в.н.}}}, \quad (3.1)$$

де $T_{\text{ц}}$ – тривалість циклу, дні;

Q – трудомісткість робіт, люд.-днів.;

R – кількість виконавців, люд.;

$k_{\text{в.н.}}$ – плановий коефіцієнт виконання норм ($k_{\text{в.н.}} = 1,1$)

$$T_{\text{ц}1} = \frac{8}{2 \cdot 1,1} = 3,63 \text{ дн.}$$

$$T_{\text{ц}2} = \frac{12}{2 \cdot 1,1} = 5,45 \text{ дн.}$$

$$T_{\text{ц}3} = \frac{16}{1 \cdot 1,1} = 14,54 \text{ дн.}$$

$$T_{\text{ц}4} = \frac{9}{1 \cdot 1,1} = 8,18 \text{ дн.}$$

$$T_{\text{ц}5} = \frac{10}{2 \cdot 1,1} = 4,55 \text{ дн.}$$

$$T_{\text{ц}6} = \frac{8}{2 \cdot 1,1} = 3,63 \text{ дн.}$$

$$T_{\text{ц}7} = \frac{8}{1 \cdot 1,1} = 7,27 \text{ дн.}$$

В результаті отримуємо, що тривалість всього процесу НДР займає 47,25 днів.

Результати розрахунків зводять у табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Тривалість етапів НДР

Етап НДР	Трудомісткість		Виконавці		Тривалість, днів
	ГРУНТ	% до підсумку	Спеціальність	Кількість, чол.	
1	4	7,69	НС, НК	2	3,63
2	6	11,54	НС, НК	2	5,45
3	16	30,77	НС	1	14,54
4	9	17,31	НС	1	8,18
5	5	9,62	НС, НК	2	4,55
6	4	7,69	НС, НК	2	3,63
7	8	15,38	НС	1	7,27
Разом	52	100	-	2	47,25

У ряді випадків дуже важко встановити загальну трудомісткість проведеної НДР. У таких випадках використовують дві чи три вірогідні оцінки часу, що даються відповідальним виконавцям по кожному етапі робіт. Ці оцінки звичайно виражають в днях і є вихідними для розрахунку очікуваного часу виконання етапу робіт із формули:

$$t_{оч} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (3.2)$$

де $t_{оч}$ – очікувана оптимальна оцінка часу виконання етапу НДР, дні;
 t_{min} – мінімально необхідний час на виконання роботи при найбільш сприятливих умовах, дні;
 t_{max} – максимальні витрати часу на виконання роботи даного етапу при несприятливих умовах, дні.

Ступінь правильності визначення $t_{оч}$ перевіряють розрахунком дисперсії (3.3) (розкиду між мінімальними та максимальними оцінками часу виконання робіт).

$$\sigma^2(t) = \left(\frac{t_{max} - t_{min}}{5} \right)^2 \quad (3.3)$$

Таблиця 3.8 – Тривалість НДР

Етапи НДР	Оцінка часу, днів			Дисперсія σ^2	Виконавці	
	t_{min}	t_{max}	$t_{оч}$		Спеціальність	Кількість, чел.
1	3	5	3,8	0,16	НС, НК	2
2	5	6	5,4	0,04	НС, НК	2
3	13	16	14,2	0,36	НС	1
4	7	11	8,6	0,64	НС	1
5	4	6	4,8	0,16	НС, НК	2
6	2	5	3,2	0,36	НС, НК	1
7	7	8	7,4		НС	1
Разом	41	57	47,4	-	-	2

Використовуючи таблиці 3.7 і 3.8 можна побудувати календарний графік виконання НДР. Він може бути сітковим чи лінійним у залежності від можливості паралельного виконання суміжної праці. Так як виконання етапів НДР відбувається послідовно, то будемо використовувати лінійний календарний графік виконання НДР. Графік виконання НДР наведений на рисунку

3.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

Для визначення грошових витрат на проведення науково-дослідної роботи складають кошторис витрат по статтях:

- матеріали;
- енергія зі сторони;
- амортизація устаткування;
- заробітна плата основна і додаткова;
- відрахування на соціальне страхування;
- накладні витрати.

У вартість матеріалів включаються витрати на матеріали для проведення дослідження (наприклад папір).

Розрахуємо вартість основних матеріалів M_O за формулою:

$$M_O = (1 + K_{ТЗ}) \cdot \sum_{i=1}^n (C_i \cdot N_i - C_{i0} \cdot N_{i0}), \quad (3.4)$$

де $K_{ТЗ}$ – коефіцієнт, що враховує транспортно-заготівельні витрати ($K_{ТЗ}=0,15$);

C_i – ціна і-го найменування матеріалу, грн.;

N_i – необхідна потреба в матеріалі і-го найменування;

C_{i0} – ціна зворотних відходів і-го найменування матеріалу, грн.;

N_{i0} – кількість зворотних відходів і-го найменування матеріалу;

n – кількість найменувань матеріалів.

Вихідні дані і розрахунки вартості матеріалів занесемо в таблицю 3.9.

Таблиця 3.9 – Витрати на матеріали

Матеріал	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Сума витрат, грн.
Папір формату А4	шт.	500	0,17	85,00
Флеш-накопичувач	шт.	1	200,00	200,00
Картридж на принтер	шт.	1	335,00	335,00
Ручка	шт.	5	8,00	40,00
Олівець	шт.	2	12,00	24,00
Маркер	шт.	4	15,00	60,00
Ластик	шт.	1	7,00	7,00
Усього				751,00

Для розрахунку витрат на електроенергію E використовуємо формулу:

$$E = \frac{P_y \cdot \Phi_{ef} \cdot K_e \cdot C_e}{\text{ККД}}, \quad (3.5)$$

де P_y – установлена потужність енергетичних струмоприймачів устаткування, кВт;

Φ_{ef} – ефективний фонд часу роботи даного виду устаткування, год;

K_e – коефіцієнт використання енергетичних установок по потужності і часу ($K_e = 0,9$);

C_e – ціна 1кВт-година електроенергії ($C_e = 2,68$ грн. (з НДС)).

$ККД = 0,9$.

Розрахунки використання електроенергії приведені в таблиці 3.10

Таблиця 3.10 – Розрахунок вартості енергоресурсів

Найменування устаткування	Вид енергоресурсів	Установлена потужність, кВт	Тривалість використання, год.	Тариф, за кВт год, грн.	Вартість енергоресурсів, грн.
1. Ноутбук	Е/енергія	0,6	190	2,68	305
2. Принтер	Е/енергія	0,25	20		13,40
3. Сканер	Е/енергія	0,1	28		7,50
Усього:					365,50

До спеціального обладнання належить таке обладнання, яке використовується тільки для проведення окремої дослідної роботи. Вартість спеціального устаткування для проведення НДР визначають на підставі їхньої кількості, цін по прейскурантах. Питома вага в загальній собівартості складає 20%. Результати розрахунку занесено до таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Розрахунок вартості спец обладнання

Устаткування	Марка, ДСТ	Кількість на тему	Ціна за одиницю, грн.	Вартість, грн.
1. Ноутбук	Acer Nitro 5	1	20148	20148
2. Принтер	Canon Pixma TS705	1	1840	1840
3. Сканер	Canon CanoScan LIDE 300	1	1727	1727
Усього				23715

Розрахуємо суму амортизаційних відрахувань. Так як основна робота проводиться на комп'ютері, розрахуємо для нього амортизаційні відрахування. Ціна обладнання – 23715 грн. Результати розрахунку занесені у таблицю 3.12.

Таблиця 3.12 – Розрахунок суми амортизаційних відрахувань

Найменування устаткування	Балансова вартість, грн.	Нормативний строк експлуатації, %	Зайнятість устаткування, год.	Річні амортизаційні відрахування, грн
1. Ноутбук	20148,00	5	190	4029,60
2. Принтер	1840,00	3	20	613,33
3. Сканер	1727,00	3	28	575,66
Усього:				5218,59

Розрахуємо заробітну плату всіх категорій працівників, що безпосередньо зайняті в процесі проведення всіх етапів НДР. Сума заробітної плати розраховується на основі зайнятості виконавців по окремих етапах робіт і середньоденного заробітку для кожної категорії персоналу. Результати розрахунку занесені в таблицю 3.13.

Таблиця 3.13 – Заробітна плата

Професія (посада)	Місячний оклад, грн.	Середньо денна зарплата, грн./день	Кількість виконавців	Зайнятість НДР, днів	Заробітна плата, грн.
Науковий співробітник	7750	352,17	1	52	18312,84
Науковий консультант	5320	241,81	1	19	4594,39
Усього	-	-	2	-	22907,23

Сума по основній заробітній платі складає 22907,23 грн. Додаткова плата приймається 12% від основної заробітної плати, що складає 2748,86 грн. Підсумкова сума заробітної плати складає 25656,09 грн..

Єдиний соціальний внесок – 22% (5644,34 грн.).

Складемо кошторис усіх витрат, результати розрахунку занесемо в таблицю 3.14.

В результаті отримали, що сума усіх витрат, необхідних для проведення НДР, складає 71996,365.

Таблиця 3.14 – Кошторис витрат на виконання НДР

Вид витрат	Сума витрат, грн.	Процент витрат
Основні матеріали	751,00	1,04
Амортизаційні відрахування	5218,59	7,25
Енергоносії	365,50	0,51

Продовження таблиці 3.14

1	2	3
Основна заробітна плата	22907	31,82
Додаткова заробітна плата	2748,9	3,82
Відрахування на соціальні потреби	5644,3	7,84
Накладні витрати (150% від основної заробітної плати)	34361	47,73
Разом	71996	100

3.3 Розрахунок економічної ефективності НДР

Ефективність прикладних НДР визначається, як зіставлення річного економічного ефекту від застосування результатів розрахункових досліджень в умовах виробництва та використаних капіталовкладень для здійснення досліджень та втілення їх у виробництво.

$$E_{\text{фак}} = \frac{\text{Економ.ефект}}{\text{Капіталовкладення}} \quad (3.6)$$

Зіставляючи фактичну економічну ефективність з нормативною ($E_n=0,10\dots0,15$), робиться висновок про доцільність досліджень. Якщо $E_{\text{фак}} >$ або $=E_n$ то дослідження визнаються економічно ефективними. У зворотному випадку дослідження не слід виконувати, тому що економічний зиск від таких досліджень малий. Економічну ефективність досліджень можливо оцінити по строку окупності витрат на їхнє проведення та втілення.

$$T_{\text{ок}}^{\text{фак}} = \frac{\text{Капіталовкладення}}{\text{Економ.ефект}}. \quad (3.7)$$

Фактичний строк окупності капіталовкладень зіставляється з нормативним строком окупності капіталовкладень, прийнятий для промисловості (приблизно 6 років), і на основі порівняння робиться висновок про доцільність досліджень.

Для теоретичних досліджень у більшості випадків важко чи навіть неможливо розрахувати економічний ефект, тому доцільно визначити їхню техніко-економічну ефективність з урахуванням наступних показників:

- важливість дослідження;
- складності розробки;
- результативності й можливості використання.

Важливість теоретичного дослідження оцінюють по його призначенню:

- рішення проблемних питань;
 - задоволення вимог спеціальної техніки; пошук принципово нових конструктивних і технологічних рішень і т.п.

Складність виконання роботи визначають порівнянням отриманих результатів даного дослідження з результатами відомих аналогічних досліджень з обліком грошових і трудових витрат на їхнє проведення.

Результативність НДР можна визначити по повноті рішень поставленого завдання: отриманий результат відповідає плановому, задовільний (часткове рішення) чи негативний.

Аналіз залежності між цими показниками й витратами на їхнє досягнення дає можливість кількісної оцінки техніко-економічної ефективності теоретичних НДР по формулі:

$$K_{\text{НДР}} = \frac{J^n \cdot R \cdot T}{B_{\text{НДР}} \cdot t_{\text{НДР}}}, \quad (3.8)$$

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

J^n – важливість роботи;

R – результативність роботи;

T – технічна складність виконання НДР;

$B_{\text{НДР}}$ – витрати на проведення НДР;

$t_{\text{НДР}}$ – час проведення НДР;

n – показник використання результатів НДР ($n = 0$ – результати НДР не використовуються; $n = 1$ – результати НДР використовуються частково; $n = 2$ – результати НДР використовуються в дослідно-конструкторських роботах (ДКР); $n = 3$ – результати НДР можуть бути використані без проведення ДКР).

При значенні $K_{\text{НДР}} \geq 1$ дослідницька робота вважається ефективною. Наприклад, для НДР, у яких $B_{\text{НДР}} < 100000$ тис.грн. і $t_{\text{НДР}} \leq 2$ років, можна застосовувати значення $J=2..5$; $R=2..5$; $T=1..3$ (таблиця 3.15).

Таблиця 3.15 – Значення оцінних факторів

Оцінні фактори	J	R	T	n
Припустимі значення	2...5	1...4	1...3	1...8
Прийняті значення	4	4	3	4

Отже, розрахуємо $K_{НДР}$, при $J^n = 4^n$; $R=4$, бо отриманий результат відповідає плановому і всі поставлені завдання виконано у повному обсязі; $T = 3$, тому що при виконанні розрахунків використовувався числовий метод; $V_{НДР} = 71996,365$; $t_{НДР} = 52$ днів або $0,14$ року; $n = 5$.

$$K_{НДР} = \frac{4^5 \cdot 4 \cdot 3}{71996,365 \cdot 0,14} = 1,21$$

Після розрахунку (3.8) отримаємо рівень ефективності дослідження $K_{НДР} = 1,21$. Це більше 1, тому робимо висновок, що дана дослідницька робота є ефективною.

Результати науково-дослідної роботи мають велике практичне значення для розвитку нанотехнологій. Проведення досліджень показало, що питання про розрахунок поляризованості металевих напівсфер на підкладці, що формують острівцеву плівку, і характеристик поверхневих плазмонів у таких системах є актуальним.

У даному розділі дипломного проекту було визначено маркетингові аспекти, а саме: описана ідея, проведена попередня характеристика потенційного ринку та клієнтів, зроблений SWOT-аналіз, обрані групи потенційної цільової аудиторії, а також складена карта стейкхолдерів. Також, було розраховано витрати на проведення НДР на 90 днів реалізації проекту, що

складає 71996 грн. з урахуванням річної заробітної плати молодшого наукового співробітника, його керівника і лаборанта, та їх ЄСВ. Також, були розраховані вартість спожитих послуг, в тому числі і специфічного обладнання, а також – амортизація до нього за 3 місяці. Було розраховано рівень ефективності дослідження $K_{НДР} = 1,21$. Це більше 1, тому робимо висновок, що дана дослідницька робота є ефективною.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз потенційних небезпек.

Тема дипломної роботи – «Оптика металевих напівсфер на діелектричній підкладці». Розглянемо робоче місце інженера мікроелектронщика, на якому небезпечні і шкідливі фактори в приміщенні є відповідно до ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ «Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація»:

1) фізичні фактори:

- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- підвищена або знижена вологість повітря;
- відсутність або нестача природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони;
- нераціональна організація освітлення робочого місця (підвищений рівень прямої і відбитої блескості, підвищений рівень засліпленості, нерівномірність розподілу яскравості в полі зору, підвищена яскравість світлового зображення, підвищений рівень пульсації світлового потоку);
- підвищений рівень запиленості на робочому місці;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень статичної електрики;
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання;
- широкий спектр випромінювання від дисплея, який включає рентгенівську, ультрафіолетову і інфрачервону області, а також широкий діапазон електромагнітних випромінювань інших частот;
- небезпека ураження електричним струмом;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- забруднення повітря шкідливими речовинами, пилом, ікроорганізмами і позитивними аероіонами.

4.2 Заходи забезпечення безпеки.

З технічних та організаційних заходів запобігання пожеж в приміщенні (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, тощо) обладнаному ПК з ВДТ передбачені наступні протипожежні заходи. На силовому обладнанні, силових та освітлювальних колах, згідно вимог пункту 3.1 «ПУЕ», встановлені захисні пристрої, що вимикають джерело живлення від ділянки електричного кола, у якій виникло коротке замикання. Згідно з вимогами нормативних документів безпеку електроустановок забезпечується наступними основними заходами:

- струмопровідні частини повинні бути недоступні;
- використання ізоляції належної якості, у деяких випадках – подвійний;
- переносні електроприймачі супроводжуються споживанням тільки зниженою напругою;
- ізоляція електроприймачів від загальної мережі;
- блокуванням, попереджувальною сигналізацією, написами і плакатами;
- проведенням планово-попереджувальних ремонтів і профілактичних випробувань електрообладнання, апаратів і мереж, що знаходяться в експлуатації;
- проведенням ряду організаційних заходів (спеціальне навчання, атестація і переатестація осіб електротехнічного персоналу, інструктажі та т. д.);
- забезпечення орієнтації в електроустановках (електропроводка повинна бути легко розпізнається і, в залежності від провідника, позначена певним кольором).

На користувачів під час роботи з комп'ютерною технікою можуть діяти такі види небезпек:

- ураження електричним струмом;
- енергетична небезпека (виникає через коротке замикання: опіки, електрична дуга, викид розплавленого металу);

- небезпека загоряння;
- термонебезпека (дія високих температур через нагрівання конструктивних елементів);
- механічна небезпека (травми через падіння, дію рухомих частин, поріз за гострі частини конструктивних елементів);
- небезпека випромінювання (дія звукового (акустичного), високочастотного, інфрачервоного, ультрафіолетового й іонізуючого випромінювання, а також видимого світла когерентної високої інтенсивності (лазерного випромінювання);
- хімічна небезпека (контакт із деякими хімікатами, які використовують для того, щоб обслуговувати обладнання, або від вдихання їх парів).

4.3 Заходи з пром санітарії та гігієни праці.

Робочі місця працівників конструкторського бюро, обладнані персональними комп'ютерами (далі – робочі місця), повинні відповідати вимогам «Правил охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин», затверджених Наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 26.03.2010 року № 65 (Правила), та «Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.98 N 7 (ДСанПіН 3.3.2-007-98). Правила поширюються на всіх суб'єктів господарювання незалежно від форм власності, які у своїй діяльності здійснюють роботу, пов'язану з персональними комп'ютерами, у тому числі на тих, які мають робочі місця, обладнані персональними комп'ютерами і периферійними пристроями. Зазначені нормативно-правові акти встановлюють санітарно-гігієнічні вимоги до приміщення, в якому розташоване робоче місце,

власне до робочого місця, освітлення, рівнів вібрації і шуму, мікроклімату в приміщенні тощо.

Умови до організації робочого місця користувача ПЕОМ.

1) Площа на одне робоче місце має бути не менше 6 м^2 , а об'єм - не менше 20 м^3 з урахуванням максимального числа одночасно працюючих в зміні.

2) Робочі місця з ПЕОМ повинні розміщуватися на відстані не менше 1 м від стіни з вікнами, так, щоб природне освітлення падало збоку, бажано зліва.

3) Відстань між бічними поверхнями дисплеїв повинно бути не менше 1,2 м. Відстань між тильною стороною одного дисплея та екраном іншого повинно бути не менше 2,5 м.

4) Конструкція робочого місця з ПЕОМ повинна забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні документів, дисплея, системного блоку, принтера, клавіатури, телефонного апарату і т.д. Системний блок і дисплей встановлюються на основному робочому столі, як правило, з лівого боку.

5) Прохід між рядами робочих місць має бути не менше 1 м.

6) Оптимальні розміри робочого столу, на якому розміщується ПЕОМ, повинні бути: висота - 725 мм; довжина - 1400-1600 мм; ширина - 800 мм.

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

8) Дисплей повинен бути обладнаний поворотною майданчиком, що дозволяє переміщати його в горизонтальній і вертикальній площинах в межах +300 або -300 (вправо-вліво), змінювати кут нахилу екрану до 10-150.

9) 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. Поверхня сидіння, спинки та інших елементів стільця (крісла) повинна бути напівм'якої, з нековзним, неелектризуючимся і повітропроникним покриттям, що забезпечує легке очищення від забруднень.

10) Приміщення повинні бути оснащені аптечкою першої допомоги і вуглекислотними вогнегасниками.

11) У приміщеннях, в яких розташовані робочі місця, слід щоденно робити вологе прибирання.

Приміщення для роботи з персональними комп'ютерами мають бути обладнані системами опалення, кондиціонування повітря, або припливно-витяжною вентиляцією. У приміщеннях на робочих місцях мають забезпечуватись оптимальні значення параметрів мікроклімату: температури, відносної вологості й рухливості повітря у відповідності до ГОСТ 12.1.005-88, СН 4088-86.

Пора року	Температура повітря, град.С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодна	22-24	40-60	0,1
Тепла	23-25	40-60	0,1

Допустимі мікрокліматичні умови встановлені за критеріями допустимого теплового і функціонального стану людини на період 8 - годинний робочої зміни.

Вони не викликають пошкоджень або порушень стану здоров'я, не можуть призводити до виникнення загальних і локальних відчуттів теплового дискомфорту, напрузі механізмів терморегуляції, погіршення самопочуття і зниження працездатності.

Приміщення, в яких встановлені персональні комп'ютери, повинні мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2006.

Загальне освітлення слід виконувати у вигляді суцільних або переривчастих ліній світильників, розташованих збоку від робочих місць, паралельно лінії зору користувача при рядном розташуванні ВДТ і ПЕОМ. При

периметральном розташуванні комп'ютерів лінії світильників повинні розташовуватися локалізованно над робочим столом ближче до його переднього краю, зверненого до оператора

Освітленість на поверхні столу в зоні розміщення робочого документа повинна бути 300 - 500 лк. Допускається установка світильників місцевого освітлення для підсвічування документів. Місцеве освітлення не повинно створювати відблисків на поверхні екрану і збільшувати освітленість екрана більш 300 лк.

Слід обмежувати пряму блескость від джерел освітлення, при цьому яскравість світяться поверхонь (вікна, світильники тощо.), Що знаходяться в полі зору, повинна бути не більше $200 \text{ кд} / \text{м}^2$.

Слід обмежувати відбиту блескость на робочих поверхнях (екран, стіл, клавіатура та ін.) За рахунок правильного вибору типів світильників і розташування робочих місць по відношенню до джерел природного та штучного освітлення, при цьому яскравість відблисків на екрані ПЕОМ не повинна перевищувати $40 \text{ кд} / \text{м}^2$ і яскравість стелі не повинна перевищувати $200 \text{ кд} / \text{м}^2$.

Як джерела світла при штучному освітленні повинні застосовуватися переважно люмінесцентні лампи типу ЛБ.

Яскравість світильників загального освітлення в зоні кутів випромінювання від 50 до 90 градусів з вертикаллю в подовжній і поперечній площинах повинна складати не більше $200 \text{ кд} / \text{м}^2$, захисний кут світильників повинен бути не менше 40 градусів.

Слід обмежувати нерівномірність розподілу яскравості в полі зору користувача ПЕОМ, при цьому співвідношення яскравості між робочими поверхнями не повинно перевищувати 3:1 - 5:1, а між робочими поверхнями і поверхнями стін і устаткування 10:1.

Коефіцієнт пульсації не повинен перевищувати 5%

Коефіцієнт запасу (k_3) для освітлювальних установок загального освітлення має прийматися рівним 1,4.

Для забезпечення нормованих значень освітленості в приміщеннях використання ВДТ і ПЕОМ слід проводити чистку скла віконних рам і світильників не рідше двох разів на рік і проводити своєчасну заміну перегорілих ламп.

Рівні шуму на робочих місцях користувачів персональних комп'ютерів не повинні перевищувати значень, встановлених СанПіН 2.2.4 / 2.1.8.562-96 і становлять не більше 50 дБА.

При виконанні робіт з використанням ПЕОМ у виробничих приміщеннях рівень вібрації не повинен перевищувати допустимих значень вібрації для робочих місць (категорія 3, тип «в») відповідно до діючих санітарно-епідеміологічними нормативами.

Шумляче обладнання (друкуючі пристрої, сервери і т.п.), що є джерелом шуму, слід встановлювати на звукопоглищаючій поверхні автономного робочого місця користувача. Якщо рівні шуму якого перевищують нормативні, повинне розміщуватися поза приміщеннями з ПЕОМ.

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури, друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих за ГОСТ 12.1.045-84, СН 1757-77. Значення напруженості електромагнітних полів на робочих місцях з ВДТ мають відповідати нормативним значенням (ГДР № 3206-85, ГДР № 4131-86, СН № 5802-91, ГОСТ 12.1.006-84). Інтенсивність потоків інфрачервоного випромінювання має не перевищувати допустимих значень відповідно до СН 4088-86, ГОСТ 12.1.005-88. Інтенсивність потоків ультрафіолетового випромінювання має не перевищувати допустимих значень відповідно до СН 4557-88.

Тимчасові допустимі рівні ЕМП, що створюються ПЕОМ

Найменування параметрів		ВДУ
Напруженість електричного поля	в діапазоні частот 5 Гц - 2 кГц	25 В / м
	в діапазоні частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В / м
Щільність магнітного потoku	в діапазоні частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в діапазоні частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напруженість електростатичного поля		15 кВ / м

Для зниження впливу електростатичного поля необхідно :

- встановлювати нейтралізатори статичної електрики;
- підтримувати в приміщенні відносну вологість не нижче 45-50% (чим сухіше повітря, тим більше електростатичний заряд);
- підлогу в приміщенні застелити антистатичним лінолеумом і щодня проводити вологе прибирання;
- обмежити кількість полімерних матеріалів в приміщенні;
- протирати екран і робоче місце спеціальної антистатичної серветкою; для зняття заряду кілька разів на день мити руки і обличчя водою, а також періодично торкатися металевих предметів.

Розрахунок повітрообміну приміщення

Розрахунок повітрообміну проводиться для кімнати площею 15 м^2 , ширина якої 3 м, висота - 3 м, довжина – 5м.

Продуктивність природної винтеляції (прилив або витяжка повітря) визначається:

$$L = k \cdot V_n, \text{ м}^3/\text{год}$$

де k - кратність повітрообміну (відповідно до галузевих норм становить $k=2$);
 V_n - об'єм приміщення, м^3 .

$$V_n = 15 \cdot 3 = 45, \text{ м}^3$$

$$L = 2 \cdot 45 = 90, \text{ м}^3/\text{год}$$

Необхідний повітрообмін в приміщенні, де не виділяється надлишкове тепло визначається:

$$L = l \cdot n, \text{ м}^3/\text{год}$$

l - мінімальна подача повітря до одного працівника відповідно до санітарних норм (при об'ємі приміщення, що припадає на одного працівника, до 20 м^3 - $l=30 \text{ м}^3/\text{год}$, при об'ємі більше 20 м^3 - $l=20 \text{ м}^3/\text{год}$);

n - кількість працівників у приміщенні.

$$n=2$$

$$S = 3 \cdot 5 \cdot 3 = 45 \text{ м}^3 / 2 = 22,5 > 20 \quad (l = 20 \text{ м}^3 / \text{год})$$

$$L = 20 \times 2 = 40, \text{ м}^3/\text{год}$$

Необхідний теплообмін в приміщенні визначається:

$$L = \frac{Q}{C\gamma(t - t_{np})}, \text{ м}^3/\text{год}$$

де Q - сумарна кількість теплоти, що утворюється в приміщенні;

C - питома теплоємність повітря, що дорівнює $1 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{°C})$;

γ - густина зовнішнього повітря, що дорівнює $\gamma = \frac{353}{(273 + t_{np})}, \text{ кг}/\text{м}^3$;

t - температура повітря, що видаляється, °C ;

t_{np} - температура приточного повітря, $t_{np} = 19 \text{ °C}$;

Кількість зовнішнього повітря розраховується для асиміляції надлишкового тепла у приміщенні в теплий період року при використанні кондиціонування повітря. Температура приточного повітря складає 19°C .

$$\gamma = \frac{353}{(273 + 19)} = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$L = \frac{1000}{1 \cdot 1,2(33 - 19)} = 59,5 \text{ м}^3/\text{год}$$

4.4 Заходи з пожежної безпеки.

Пожежна безпека забезпечується виконанням вимог Правил пожежної безпеки в Україні, НПАОП 0.00-1.28-10, ГОСТ 12.1.004-91 «Пожежна безпека. Загальні вимоги». Будинки й ті їх частини, в яких розташовуються конструкторські бюро, мають ступінь вогнестійкості не нижче III.

В данному приміщенні знаходиться дерев'яна мебель, електронна апаратура, паперові носії інформації. Клас пожежі у офісному приміщенні (згідно із ДБН В.1.1.7-2002 «Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва») – пожежі твердих речовин, переважно органічного походження, горіння яких супроводжується тлінням (деревина, пластмаси, папір) – визначається як клас А. Категорія приміщення (згідно із НАПБ Б.03.002-2007 «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою») – визначається як категорії П-Па.

Засоби протипожежного захисту слід утримувати у справному стані. Усім працівникам вміти користуватись наявними вогнегасниками, іншими первинними засобами пожежогасіння, знати місце їх знаходження. Відстань від найбільш віддаленого місця приміщення до місця розташування вогнегасника не повинна перевищувати 20 м. В приміщенні встановлюють порошкові або вуглекислотні вогнегасники. Так як площа приміщення - менше 100 м², то встановлюється один вуглекислотний вогнегасник ВВК-1.4(3.5) або порошковий ВП-3.

Вогнегасники слід розташовувати на об'єкті, відповідно до вимог ГОСТ 12.4.009 (розділ 4.3) таким чином, щоб вони були захищені від дії прямих сонячних променів, будь-яких механічних впливів і інших несприятливих чинників, таких як вібрація, підвищена вологість та інших. Вогнегасники повинні розміщуватися в легкодоступних і помітних місцях. Не допускається зберігання та експлуатація вогнегасників в місцях, де температура може перевищувати 500С і під прямими променями сонця. При гасінні

електроустановок, що знаходяться під напругою, не допускається підводити розтруб ближче 1 м до електроустановки та полум'я. Після застосування вогнегасника в закритому приміщенні, приміщення необхідно провітрити. Кожен співробітник офісу в обов'язковому порядку повинен бути ознайомлений з правилами експлуатації вогнегасників.

4.5 Заходи забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях

Єдина державна система цивільного захисту, її складові та режими функціонування.

Згідно з Кодексом цивільного захисту України забезпечення захисту населення і територій від НС покладено на Єдину державну систему цивільного захисту (ЄДСЦЗ), яка є сукупністю суб'єктів забезпечення цивільного захисту, котрі здійснюють реалізацію державної політики у сфері цивільного захисту.

Суб'єктами забезпечення цивільного захисту в межах своїх повноважень є:

- Рада національної безпеки і оборони України;
- Кабінет Міністрів України;
- центральний орган виконавчої влади, який забезпечує формування та реалізує державну політику у сфері цивільного захисту (нині це Державна служба України з надзвичайних ситуацій – ДСНС);
- інші центральні органи виконавчої влади;
- місцеві державні адміністрації;
- органи місцевого самоврядування;
- суб'єкти господарювання;
- громадяни України.

Основними завданнями єдиної державної системи цивільного захисту є:

- 1) забезпечення готовності міністерств та інших центральних та місцевих органів виконавчої влади, органів місцевого самоврядування, підпорядкованих їм сил і засобів до дій, спрямованих на запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;
- 2) забезпечення реалізації заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій;
- 3) навчання населення щодо поведінки та дій у разі виникнення надзвичайної ситуації;
- 4) виконання державних цільових програм, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям, забезпечення сталого функціонування підприємств, установ та організацій, зменшення можливих матеріальних втрат;
- 5) опрацювання інформації про надзвичайні ситуації, видання інформаційних матеріалів з питань захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій;
- 6) прогнозування і оцінка соціально-економічних наслідків надзвичайних ситуацій, визначення на основі прогнозу потреби в силах, засобах, матеріальних та фінансових ресурсах;
- 7) створення, раціональне збереження і використання резерву матеріальних та фінансових ресурсів, необхідних для запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;
- 8) оповіщення населення про загрозу та виникнення надзвичайних ситуацій, своєчасне та достовірне інформування про фактичну обстановку і вжиті заходи;
- 9) захист населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій;
- 10) проведення рятувальних та інших невідкладних робіт щодо ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, організація життєзабезпечення постраждалого населення;
- 11) пом'якшення можливих наслідків надзвичайних ситуацій у разі їх виникнення;

- 12) здійснення заходів щодо соціального захисту постраждалого населення;
- 13) реалізація визначених законом прав у сфері захисту населення від наслідків надзвичайних ситуацій, в тому числі осіб (чи їх сімей), що брали безпосередню участь у ліквідації цих ситуацій;
- 14) інші завдання, визначені законом.

Режими функціонування єдиної державної системи цивільного захисту

1. Єдина державна система залежно від масштабів і особливостей надзвичайної ситуації, що прогнозується або виникла, функціонує у режимах:

- 1) повсякденного функціонування;
- 2) підвищеної готовності;
- 3) надзвичайної ситуації;
- 4) надзвичайного стану.

2. Положенням про єдину державну систему цивільного захисту визначається перелік заходів, що здійснюються у відповідному режимі, завдання та порядок взаємодії суб'єктів забезпечення цивільного захисту під час функціонування зазначеної системи у відповідному режимі.

3. В особливий період єдина державна система цивільного захисту функціонує відповідно до цього Кодексу та з урахуванням особливостей, що визначаються згідно з вимогами законів України "Про правовий режим воєнного стану", "Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію", а також інших нормативно-правових актів.

Режим повсякденного функціонування ЕДСЦЗ встановлюється за умов нормальної виробничо-промислової, радіаційної, хімічної, сейсмічної, гідрометеорологічної, техногенної і пожежної обстановки, гідрогеології, за відсутності епідемій, епізоотій, епіфітотій. У режимі повсякденного функціонування органи управління ЕДСЦЗ і сили ЦЗ:

- забезпечують спостереження і контроль за обстановкою на об'єктах підвищеної небезпеки і прилеглих до них територіях;
- здійснюють цілодобове чергування оперативно-рятувальних і пожежно-рятувальних підрозділів;

- розробляють і виконують цільові і науково-технічні програми по запобіганню виникненню НС і зменшення можливих втрат;
- здійснюють планові заходи по запобіганню НС, забезпеченню безпеки і захисту населення і територій від них;
- забезпечують підготовку органів управління і сил цивільного захисту відносно дій в надзвичайних ситуаціях;
- організують навчання керівного складу і фахівців цивільного захисту і населення діям в надзвичайних ситуаціях;
- створюють і поновлюють матеріальні резерви для запобіганню, ліквідації надзвичайних ситуацій і їх наслідків;
- здійснюють прогнозування обстановки, погіршення якої може привести до виникнення надзвичайних ситуацій;
- створюють і підтримують в постійній готовності системи оповіщення.

Режим підвищеної готовності ЕДСЦЗ встановлюється в межах конкретної території у разі істотного погіршення виробничо-промислової, радіаційної, хімічної, епідемічної (епізоотичної), сейсмічної, гідрометеорологічної обстановки гідрогеології, за наявності загрози виникнення надзвичайної ситуації. У режимі підвищеної готовності органи управління ЕДСЦЗ і сили ЦЗ:

- здійснюють оповіщення населення про загрозу виникнення НС;
- формують оперативні групи для виявлення причин погіршення обстановки і готують пропозиції відносно її нормалізації;
- вводять цілодобове чергування членів комісії з питань техногенно-екологічної безпеки і НС;
- посилюють спостереження і контроль за ситуацією на об'єктах підвищеної небезпеки і прилеглих до них територіях, здійснюють постійне прогнозування можливості виникнення НС і їх масштабів;
- здійснюють заходи по запобіганню виникненню НС;
- уточнюють, розробляють і здійснюють заходи відносно захисту населення і територій від можливої надзвичайної ситуації;

- приводять в стан готовності наявні сили і засоби реагування.

Режим надзвичайної ситуації ЕДСЦЗ встановлюється у разі виникнення НС, залежно від її масштабу, в межах конкретної території. У режимі надзвичайної ситуації органи управління ЕДСЦЗ і сили ЦЗ :

- здійснюють оповіщення населення про надзвичайну ситуацію і про їх дії в умовах цієї ситуації;
- призначають спеціальну комісію і/або керівника робіт по ліквідації НС, які створюють Штаб по ліквідації НС;
- визначають межі території, на якій виникла НС;
- здійснюють постійне прогнозування зони можливого поширення НС і масштабів можливих наслідків;
- організовують роботи по локалізації і ліквідації НС і її наслідків, притягають для цього необхідні сили і засоби;
- організовують і здійснюють заходи по життєзабезпеченню постраждалого населення;
- організовують захист населення і територій в умовах НС;
- здійснюють безперервний контроль за розвитком НС і обстановкою на аварійних об'єктах і прилеглих до них територіях.

Режим надзвичайного стану для єдиної державної системи цивільного захисту у повному обсязі або частково для окремих її територіальних підсистем тимчасово встановлюється у межах території, на якій введено правовий режим надзвичайного стану відповідно до Закону України "Про правовий режим надзвичайного стану".

ВИСНОВКИ

В квазістатичному квадрупольному наближенні розв'язано електростатичну задачу про визначення потенціалу в системі «напівсферична металева наночастинка – діелектрична підкладка». Отримано частотні залежності поперечної компоненти тензора поляризованості та вирази для частот невидимості і поверхневого плазмонного резонансу.

Встановлено, що зі збільшенням радіуса наночастинки плазмонні резонанси стають більш вираженими, а другий резонанс з'являється при $R \approx 20$ нм. Наявність двох резонансів пояснюється просторовою анізотропією.

Внаслідок відмінності частот об'ємних плазмонів та швидкостей релаксації другий максимум уявної частини поляризованості для острівців Pd і Pt є більш вираженими, ніж у острівців Au і Cu.

Піки частотних залежностей уявної частини поляризованості для острівців Al є гострими, а їх уширення мале внаслідок великого значення γ_{bulk} та малого значення τ^∞ , що, в свою чергу, призводить до значної величини розщеплення поверхневого плазмонного резонансу.

Для утворення «смуги невидимості» частини простору в околі металевого наноострівця бажано використовувати підкладки з матеріалів з якомога меншими значеннями діелектричної проникності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. **Hao, E.** Electromagnetic fields around silver nanoparticles and dimers [Text] / E. Hao, G.C. Schatz // *J. Chem. Phys.* – 2004. – V. 120/ – P. 357–366.
2. **Prabowo, B.** Surface Plasmon Resonance Optical Sensor: A Review on Light Source Technology [Text] / B. Prabowo, A. Purwidyantri, K.-C. Liu // *Biosensors.* – 2018. – V. 8. – № 3. – P. 80.
3. **Kim, S.** High-harmonic generation by resonant plasmon field enhancement [Text] / S. Kim, J. Jin, YJ. Kim et al. // *Nature.* – 2008. – V. 453. – P. 757–760.
4. **Moskovits, M.** Surface-enhanced spectroscopy [Text] / M. Moskovits // *Reviews of modern physics.* – 1985. – Vol. 57. – № 3. – P. 783-826.
5. **Noginov, M.** Demonstration of a spaser-based nanolaser [Text] / M. Noginov, G. Zhu, A. Belgrave et al. // *Nature.* – 2009. – V. 460. – № 27. – P. 1110-1112.
6. **Linic, S.** Plasmonic-metal nanostructures for efficient conversion of solar to chemical energy [Text] / S. Linic, P. Christopher, D.B. Ingram // *Nature Publishing Group.* – 2011. – Vol. 10. – № 12. – P. 911-921.
7. **Hutter, E.** Exploitation of Localized Surface Plasmon Resonance [Text] / E. Hutter, J.H. Fendler // *Advanced Materials.* – 2004. – Vol. 16. – №19. – P. 1685-1706.
8. **Willems, K.A.** Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing [Text] / K.A. Willems, R.P. Van Duyne // *The Annual Review of Physical Chemistry.* – 2007. – Vol. 58. – P. 267-297.
9. **Amendola, V.** Surface plasmon resonance in gold nanoparticles: a review [Text] / V. Amendola, R. Pilot, M. Frasconi, O.M. Maragò et al. // *J. Phys: Cond Matter.* – 2017. – V. 29. – No. 20. – id. 203002.
10. **Петров, В. В.** Multi-Photon Microscopy and Optical Recording [Текст] / В.В. Петров, А.А. Крючин, Є.В. Беляк, А.С. Лапчук. – К.: Академперіодика, 2016. – 156 с.

11. **Chang, R. K.** Surface enhanced Raman scattering [Text] / R.K. Chang, T.E. Furtak. – New York: Plenum Press, 1982. – 379 p.
12. **Петров, В.В.** Методи нанолітографії [Текст] / В.В. Петров, А.А. Крючин, Ю.А. Куницький та ін. – К.: Наукова думка, 2015. – 262 с.
13. **Trunov, M. L.** Light-induced mass transport in amorphous chalcogenides/gold nanoparticles composites [Text] / M.L. Trunov, P.M. Lytvyn, P.M. Nagy et. al. // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2013. – V.16. – No.4. – P. 354-361.
14. **Дуркот, М.О.** Формування масивів наночастинок срібла різної морфології та їх оптичні характеристики [Текст] / М.О. Дуркот, В.К. Кириленко, П.М. Литвин та ін. // Тези VIII Укр. наук. конф. з фізики напівпровідників (УНКФН-8). – Ужгород, Україна, 2018. – Т.1. – С. 194-195.
15. **Набиев, И.Р.** Гигантское комбинационное рассеяние и его применение к изучению биологических молекул [Текст] / И.Р. Набиев, Р.Г. Ефремов, Г.Д. Чуманов // УФН, 1988. – Т.154, №3. – С.459-496.
16. **Moskovits, M.** Surface-enhanced spectroscopy [Text] / M. Moskovits // Rev. Modern Phys., 1985. – V.57. – P.783-826.
17. **Meier, M.** Enhanced fields on rough surfaces: dipolar interactions among particles of sizes exceeding the Rayleigh limit [Text] / M. Meier, A. Wokaun, P.F. Liao // J. Opt. Soc. of America B, 1985. – P.931-949.
18. **Kuncicky, D.M.** Role of the micro- and nanostructure in the performance of surface-enhanced Raman scattering substrates assembled from gold nanoparticles [Text] / D.M. Kuncicky, S.D. Christesen, O.D. Velev // Appl. Spectroscopy, 2005. – V.59, No.4. – P.401-409.
19. **Hulteen, J.C.** Nanosphere lithography: A materials general fabrication process for periodic particle array surfaces [Text] / J.C. Hulteen, R.P. VanDuyne // J. Vac. Sci. & Technology, 1995. – V. 13. – P.1553.
20. **Curtis, K.** Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems [Text] / K. Curtis, L. Dhar, A. Hill et. al. // John Wiley & Sons, 2010

21. **Трунов, М. Л.** Розробка та виготовлення плазмон-активних структур за допомогою наносферної літографії / М.Л. Трунов, М.О. Дуркот// Реєстрація, зберігання і обробка даних: зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової наукової конференції. – К.:ІПІ НАН України, 2017. – С.39-42.
22. **Trunov, M.L.** Formation of nanostructures upon photoexcitation of surface plasmon resonance in nanocomposites derived from textured gold films and chalcogenide glass [Text] / M.L. Trunov, P.M. Lytvyn, V.A. Sterligov et. al. //Theoretical and Experimental Chemistry, 2018. – V.54. – No.2. – P. 107–113.
23. **Rubish, V.M.** Newtype recording media based on “noble metal nanoparticles/ChVS films” composites [Text] / V.M. Rubish, M.L. Trunov, P.M. Lytvyn // Mat. Intern. Meeting “Clusters and nanostructured materials (CNM-5)”. – Uzhgorod, Ukraine, 2018. – P. 40-41.
24. **Ebbesen, T.W.** Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [Text] / T.W. Ebbesen, H.J. Lezec, H.F. Ghaemi, Thio et. al. //Nature, 1998. – V.391. – P. 667-669.
25. **Kim, J.** Near-field imaging of surface Plasmon on gold nano-dots fabricated by scanning probe lithography [Text] / J. Kim, S.O. Song et. al. // J. of Microscopy, 2003. – V.209. – P.236-240.
26. **Maas, H.J.** Photonic nanopatterns of gold nanostructures indicate the excitation of surface plasmon modes of a wavelength of 50-100 nm by scanning near-field optical microscopy [Text] / H.J. Maas, J. Heimeel, H. Fuchs et. al. // J. Microscopy-Oxford, 2003. – V.209. – P.241-248.
27. **Kuang-Li, Lee.** Sensitive label-free biosensors by using gap plasmons in gold nanoslits [Text] / Lee Kuang-Li, Wanga Way-Seen, Wei Pei-Kuen //Biosensors and Bioelectronics, 2008 – V.24. – P.210–215.
28. **Hillenbrand, R.** Coherent imaging of nanoscale plasmon patterns with a carbon nanotube optical probe [Text] / R. Hillenbrand, F. Keilmann, P. Hanarp et. al. // Appl. Phys. Lett., 2003. – V.83. – No.2. – P.368-370.

29. **Kim, Y.** Machining oxide thin films with an atomic force microscope: pattern and object formation on the nanometer scale [Text] / Y. Kim, M. Lieber // *Science*, 1992. – V.257, No.5068. – P. 375-377.
30. **König, T.** Atomic force microscopy nanolithography: fabrication of metallic nano-slits using silicon nitride tips [Text] / T. König, Th. Papke, A. Kopyshov, S. Santer // *J Mater. Sci.*, 2013. – V.48. – P.3863–3869.
31. **Rubish, V.M.** New type of recording media based on the gold nanoparticles integrated into the film/substrate interlayer for plasmon nanolithography [Text] / V.M. Rubish, P.M. Lytvyn, M.O. Durkot et. al. // Тез. V Міжнар. наук. конф. «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології». – Київ, 2016. – С. 125.
32. Ultrathin nanostructured metals double plasmonic color filter transmission.
Режим доступу:
<https://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-50/issue-04>.
33. **Durkot, M.O.** Formation of Ag nanoparticles arrays and their optical transmittance spectra [Text] / M.O. Durkot, V.K. Kyrylenko, P.M. Lytvyn et. al. // *Mat. Intern. Meeting “Clusters and nanostructured materials (CNM-5)”*. – Uzhgorod, Ukraine, 2018. – P. 163-164.
34. **Sellmyer, D.J.** Magnetism of Fe, Co and Ni nanowires in self-assembled arrays [Text] / D.J. Sellmyer, M. Zheng, R. Skomski // *J. Phys.:Condens. Matter*, 2001. – V.13. – P. R433–R460.
35. **He, H.X.** Electrochemical fabrication of metal nanowires [Text] / H.X. He, N.J. Tao // *Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology* edited by H. S. Nalwa, 2003. – V.X. – P. 1–18.
36. **Dickson, W.** Dielectric-loaded plasmonic nanoantenna arrays: A metamaterial with tuneable optical properties [Text] / W. Dickson, G.A. Wurtz, P. Evans et. al. // *Phys. Rev. B*, 2007. – V.76. – P. 115411-1-115411-6.
37. **Влайков, Г.Г.** Формування наноструктур темплатним синтезом [Текст] / Г.Г. Влайков, М.Ю. Барабаш, М.А. Заболотний та ін. // К.: ІМФ НАНУ, 2010. – 226 с.

38. **Zhu, Z.** Size-tunable porous anodic alumina nano-structure for biosensing [Text] / Zh. Zhu, L. Garcia-Gancedo, Q.Liu et. al. // *Soft Nanosci. Lett.*, 2011. – V.1. – P. 55-60.
39. **Hildebrant, P.** Surface-enhanced resonance Raman spectroscopy of rhodamine 6G adsorbed on colloidal silver [Text] / P. Hildebrant, M. Stockburger // *J. Phys. Chem.*, 1984. – V.88. – P. 5935-5944.
40. **Nie, S.** Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering [Text] / S. Nie, S.R. Emory // *Science*, 1997. – V.275, No.5303. – P.1102-1106.
41. **Kahl, M.** Analysis of plasmon resonance and surface-enhanced Raman scattering on periodic silver structures [Text] / M. Kahl, E. Voges / *Phys. Rev. B*, 2000. – V.61, No.20. – P. 14 078- 14 088.
42. **Félidj, N.** Optimized surface-enhanced Raman scattering on gold nanoparticle arrays [Text] / N. Félidj, J. Aubard, G. Lévi et.al. // *Appl. Phys. Lett.*, 2003. – V.82, No.18. – P 3095-3097.
43. **Abdelsalam, M.E.** Electrochemical SERS at a structured gold surface [Text] / M.E. Abdelsalam, P.N. Bartlett, J.J. Baumberg et. al. // *Electrochem. Commun.*, 2005. – V.7, No.7. – P.740-744.
44. **Su, Lei.** Nanostructures fabricated in chalcogenide glass for use as surface-enhanced Raman scattering substrates /L. Su, C.J. Rowlands, S.R. Elliott // *Opt. Lett.*, 2009. – V.34, No.11. – P. 1645-1647.
45. **Ding, S.Y.** Electromagnetic theories of surface-enhanced Raman spectroscopy [Text] / S.Y. Ding, E.M. You, Z.Q. Tian, M. Moskovits // *Chem. Soc. Reviews.* – 2017. – V.46, No.13. – P. 4042-4076.
46. **Yukhymchuk, V.O.** Design and characterization of nanostructured SERS substrates based on gold nanostars [Text] / V.O. Yukhymchuk, O.M. Hreshchuk, M.Ya. Valakh et.al. // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.* – 2017. – V.20, No.1. – P. 41-47.
47. **Грещук, О.М.** Ефективні підсилюючі КРС підкладки на основі плазмонного резонансу в нанозірках [Текст] / О.М. Грещук, В.О. Юхимчук, М.Я. Валах та

- ін. // Тези VIII Укр. наук. конф. з фізики напівпровідників (УНКФН-8). – Ужгород, Україна, 2018. – Т.1. – С.245-246.
48. **Yukhymchuk, V.O.** Experimental studies and modeling of “starlike” plasmonic nanostructures for SERS application [Text] / V.O. Yukhymchuk, O.M. Hreshchuk, V.M. Dzhagan et.al. // Phys. Stat. Solidi B, 2018. – P. 1800280 (1-8).
49. **Grigorchuk, N. I.** Optical and transport properties of spheroidal metal nanoparticles with account for the surface effect [Текст] / N.I. Grigorchuk, P. M. Tomchuk // Phys. Rev. –2011. – В 84, 085448.
50. **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.