

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій  
(повне найменування факультету)

Кафедра інформаційної безпеки та наноелектроніки  
(повне найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Дослідження процесів генерації яскравих і насичених кольорів у масиві металевих наночастинок на підкладці

(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) IIм курсу,  
групи БК-412м

Спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Якість, стандартизація та сертифікація

ОЛІФІР К.А.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник РЕВА В.І.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент БИСТРОВ Я.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій

Кафедра інформаційної безпеки та наноелектроніки

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Якість стандартизація та сертифікація

(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**В.о. завідувача кафедри ІБтаН**

Андрій КОРОТУН

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)**

ОЛІФІРА Костянтина Андрійовича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження процесів генерації яскравих і насичених кольорів у масиві металевих наночастинок на підкладці

Study of the processes of generating bright and saturated colors in an array of metal nanoparticles on a substrate

керівник проєкту (роботи) к.ф.-м.н., РЕВА Віталій Ігорович,

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «28» листопада 2023 року №471

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 11.12.2023

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) напівсферичні металеві частинки на діелектричній підкладці, параметри частинок і підкладки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Колірні властивості ансамблів металевих наночастинок на діелектричній підкладці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Презентація доповіді (в MS PowerPoint), 13 слайдів.

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1 – 2	РЕВА В.І, доцент кафедри ІБтаН	04.09.2023	05.12.2023
Нормоконтроль	КОРОЛЬКОВ Р. Ю., доцент кафедри ІБтаН		08.12.2023

7. Дата видачі завдання «04» вересня 2023 року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1.	Збір та аналіз інформації про оптичні властивості ансамблів металевих наночастинок на діелектричній підкладці	04.09.23 – 18.09.23	виконано
2.	Систематизація літературних даних	19.09.23 – 24.09.23	виконано
3.	Складання і затвердження наукового завдання	25.09.23 – 27.09.23	виконано
4.	Формування та уточнення наукового завдання	27.09.23 – 28.09.23	виконано
5.	Одержання залежностей коефіцієнтів поглинання, розсіювання і відбиття від довжини хвилі падаючого випромінювання	29.09.23 – 15.10.23	виконано
6.	Складання процедури розрахунку	16.10.23 – 31.10.23	виконано
7.	Одержання чисельних розрахунків та їх аналіз	01.11.23 – 13.11.23	виконано
8.	Оформлення графічної частини	14.11.23 – 19.11.23	виконано
9.	Оформлення ПЗ	20.11.23 – 30.11.23	виконано

Студент(ка)

\_\_\_\_\_ **Костянтин ОЛІФІР**  
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

  
 \_\_\_\_\_ **Віталій РЕВА**  
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 61 с., 4 табл., 25 рис., 109 джерел.

ДІЕЛЕКТРИЧНА ПІДКЛАДКА, КОЛІР, КОЛОРИМЕТРІЯ, КОЕФІЦІЄНТ ВІДБИВАННЯ, НАПІВСФЕРИЧНІ НАНОЧАСТИНКИ, ЯСКРАВІСТЬ

**Мета роботи:** дослідження залежності колірних характеристик ансамблів наночастинок на підкладці від довжини хвилі.

**Об'єкт та предмет дослідження:** об'єктом дослідження є ансамблі напівсферичних металевих частинок на діелектричній підкладці; предметом дослідження є їх колірні характеристики.

**Методи дослідження:** розрахунково-аналітичний.

**Результати:** результатом дослідження є аналітичні вирази для коефіцієнта відбивання ансамблю наночастинок на підкладці.

**Рекомендації щодо впровадження:** робота носить фундаментальний характер, проте деякі її результати можуть бути використані в такій прикладній галузі як колориметрія.

**Практична цінність:** досліджено вплив розміру і матеріалу наночастинок на підкладці на колірні характеристики ансамблю наночастинок.

**Апробація результатів роботи:** Основні положення та результати роботи були представлені на наукових конференціях та опубліковані в матеріалах:

1. **Оліфір, К.** Властивості резонансних наноструктур для створення яскравих кольорів [Текст] / К. Оліфір, А. Коротун // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЕВРИКА-2023. Тези доповідей. (Травень, 16–18, 2023). – Львів. – 2023. – С. 5.

## ABSTRACT

Explanatory note to the master's thesis: 61 p., 4 table, 25 figure, 109 sources.

DIELECTRIC SUBSTRATE, COLOR, COLORIMETRY, REFLECTANCE COEFFICIENT, HEMISPHERICAL NANOPARTICLES, BRIGHTNESS

**The purpose of the work:** to study the dependence of the color characteristics of ensembles of nanoparticles on the substrate on the wavelength. Object and subject of research: the object of research is ensembles of hemispherical metal particles on a dielectric substrate; the subject of research is their color characteristics.

**Research methods:** computational and analytical.

**Results:** the result of the research are analytical expressions for the reflection coefficient of the ensemble of nanoparticles on the substrate.

**Recommendations for implementation:** the work is of a fundamental nature, but some of its results can be used in such an applied field as colorimetry.

**Practical value:** the influence of the size and material of nanoparticles on the substrate on the color characteristics of the ensemble of nanoparticles was investigated.

**Approbation of work results:** The main provisions and results of the work were presented at scientific conferences and published in materials:

1. **Olifir, K.** Properties of resonant nanostructures for creating bright colors [Text] / K. Olifir, A. Korotun // International conference of students and young scientists in theoretical and experimental physics EUREKA-2023. Abstracts of reports. (May, 16–18, 2023). - Lviv. – 2023. – P. 5.

## ЗМІСТ

	С.
Вступ. . . . .	7
1 Локалізовані поверхневі плазмони в ансамблях металевих наночастинок. . . . .	8
1.1 Методи одержання масивів наночастинок. . . . .	8
1.1.1 Методи формування потоків аерозольних наночастинок. . . . .	8
1.1.2 Особливості аерозольних металевих наночастинок, одержуваних у імпульсно-періодичному газовому розряді. . . . .	14
1.1.3 Формування масивів наночастинок на підкладках методами чорнильного друку. . . . .	20
1.1.4 Формування масивів металевих наночастинок методом сухого аерозольного друку. . . . .	23
1.2 Дослідження оптичних властивостей суспензій із наночастинками та частинок на підкладці. . . . .	27
1.2.1 Оптичні властивостей ізольованих металевих наночастинок. . . . .	27
1.2.2 Особливості оптичних властивостей неконтактуючих наночастинок та їх агломератів на поверхні підкладок. . . . .	30
1.2.3 Дослідження наночастинок у складі щільних масивів на підкладках. . . . .	34
1.3 Методи визначення кольорів за оптичними спектрами. . . . .	
2 Спектральні характеристики ансамблю металевих наноострівців на діелектричній підкладці. . . . .	36
2.1 Методи визначення кольорів за оптичними спектрами. . . . .	36
2.2 Оптичні властивості ансамблю металевих напівсфер на діелектричній підкладці. . . . .	37
2.3 Результати розрахунків та їх обговорення. . . . .	40
Висновки. . . . .	49
Перелік джерел посилань. . . . .	50

## ВСТУП

Оптичні властивості малих металевих наночастинок інтенсивно досліджувалися як експериментально, так і теоретично вже впродовж багатьох десятиріч. Цей інтерес пов'язаний із тим, що вони суттєво відрізняються від оптичних властивостей об'ємних матеріалів. Так, спектри розсіяння і поглинання наночастинок містять максимуми, які відповідають поверхневим плазмонним резонансом.

Історично першим теоретичним підходом до опису перерізів екстинкції, розсіяння та поглинання світла ізольованою наночастиною була теорія Г. Мі. Пізніше було встановлено, що ця теорія застосовна й у випадку будь-яких ансамблів частинок. Література, де описані оптичні властивості малих металевих наночастинок сферичної, еліпсоїдальної та інших форм нараховує багато статей і монографій. Проте, деякі питання до цих пір залишаються малозрозумілими. Зокрема, це стосується вивчення кольірних характеристик різного роду ансамблів наночастинок.

Відомо, що металеві острівцеві плівки представляють значний практичний інтерес, зокрема, для розробки спектрально-селективних поглинаючих покриттів, поляризаторів і спектральних фільтрів, дисплеїв, що можуть передавати яскраву гаму кольорів.

Проте, питання генерації яскравих і насичених кольорів ансамблем металевих острівців на діелектричній підкладці є маловивченим, а тому актуальним.

# 1 ЛОКАЛІЗОВАНІ ПОВЕРХНЕВІ ПЛАЗМОНИ В АНСАМБЛЯХ МЕТАЛЕВИХ НАНОЧАСТИНОК

## 1.1 Методи одержання масивів наночастинок

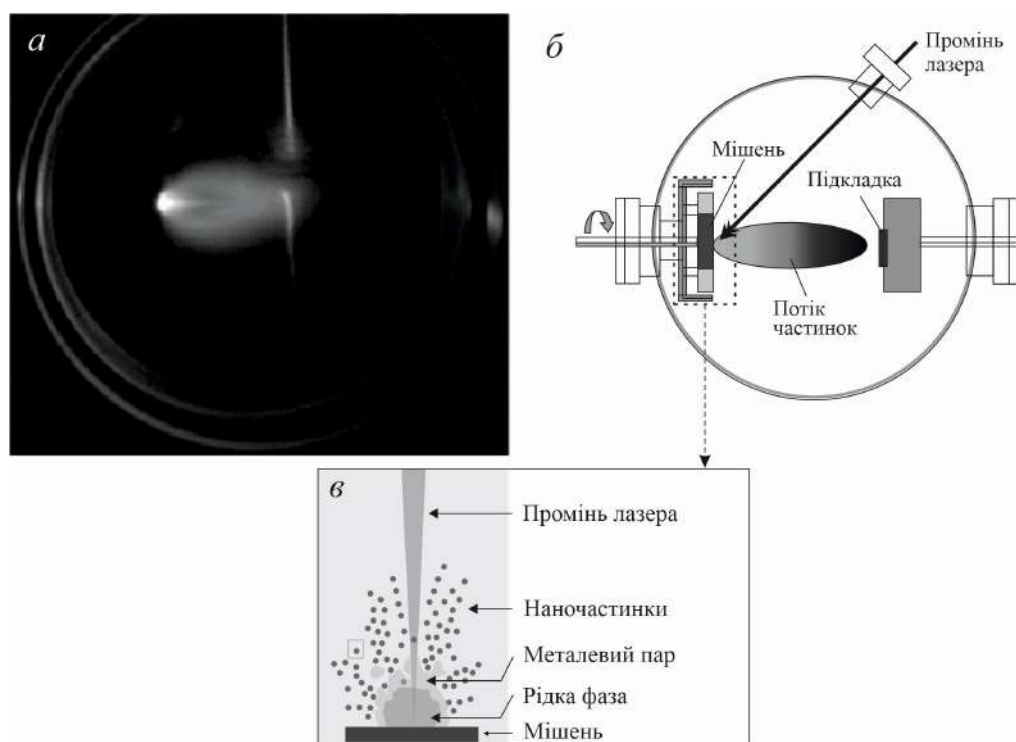
### 1.1.1 Методи формування потоків аерозольних наночастинок

В теперішній час розроблено багато методів синтезу металевих наночастинок, їх оксидів, нітридів та інших сполук як для наукового, так і промислового використання. Існуючі методи можна розділити на дві групи залежно від середовища, в якому здійснюється синтез: у рідких та газових середовищах. Для синтезу в рідких середовищах вже розроблені підходи, що дозволяють контролювати розміри наночастинок, обмежувати їх агломерацію та отримувати стійкі розчини із застосуванням ПАР та дисперсантів у складі розчинника. Формування наночастинок для певних застосувань доцільно проводити саме у рідких середовищах з використанням колоїдних розчинів. У цьому випадку синтез відбувається в результаті протікання хімічних реакцій окислення-відновлення, приєднання, обміну, гідролізу та інших [1,2]. Такі методи синтезу добре зарекомендували себе – сьогодні вони знаходять застосування у різних наукових сферах, наприклад, отримання частинок неорганічного барвника та квантових точок, що актуально для задач біофотоніки та наноплазмоніки, а отримання магнітних наночастинок – у дослідженнях із магнітооптики та медицини.

Отримання наночастинок у газових середовищах передбачає використання фізичних методів синтезу. Такі методи засновані на випаровуванні та конденсації речовини та принципово відрізняються між собою способами введення енергії в матеріал мішеней. Наприклад, лазерна абляція – один із найбільш поширених фізичних методів генерації наночастинок та їх агрегатів [3]. Високоенергетичне імпульсне лазерне випромінювання, сфокусоване на поверхні мішені з необхідного матеріалу,



провокує мікроривбух, який супроводжується викидом частинок у навколишній простір (рис. 1.1).



*a* – знімок вакуумної камери із зображенням потоку частинок, одержаних методом лазерної абляції;

*б* – схема встановлення генератора наночастинок методом лазерної абляції;

*в* – схематичне зображення області синтезу наночастинок методом лазерної абляції.

Рисунок 1.1 – Схема проведення лазерної абляції [4]

Рівень хімічної чистоти цього методу залежить як від матеріалу мішені, так і від матеріалу середовища, в якому відбувається синтез. Так, у процесі можна отримувати наночастинки, що складаються із суміші матеріалів, використовуючи мішені з різних сплавів та хімічних сполук (оксиди, карбіди, сульфіді).

Лазерна абляція дозволяє точно контролювати розміри окремих наночастинок та масову продуктивність синтезу за допомогою тонкого налаштування параметрів випромінювання: енергії лазерного імпульсу,

частоти їхнього прямування та довжини хвилі (рис. 1.2). Сьогодні цей метод активно використовується для нанесення тонких плівок та виготовлення мікроструктур [1,4,5].

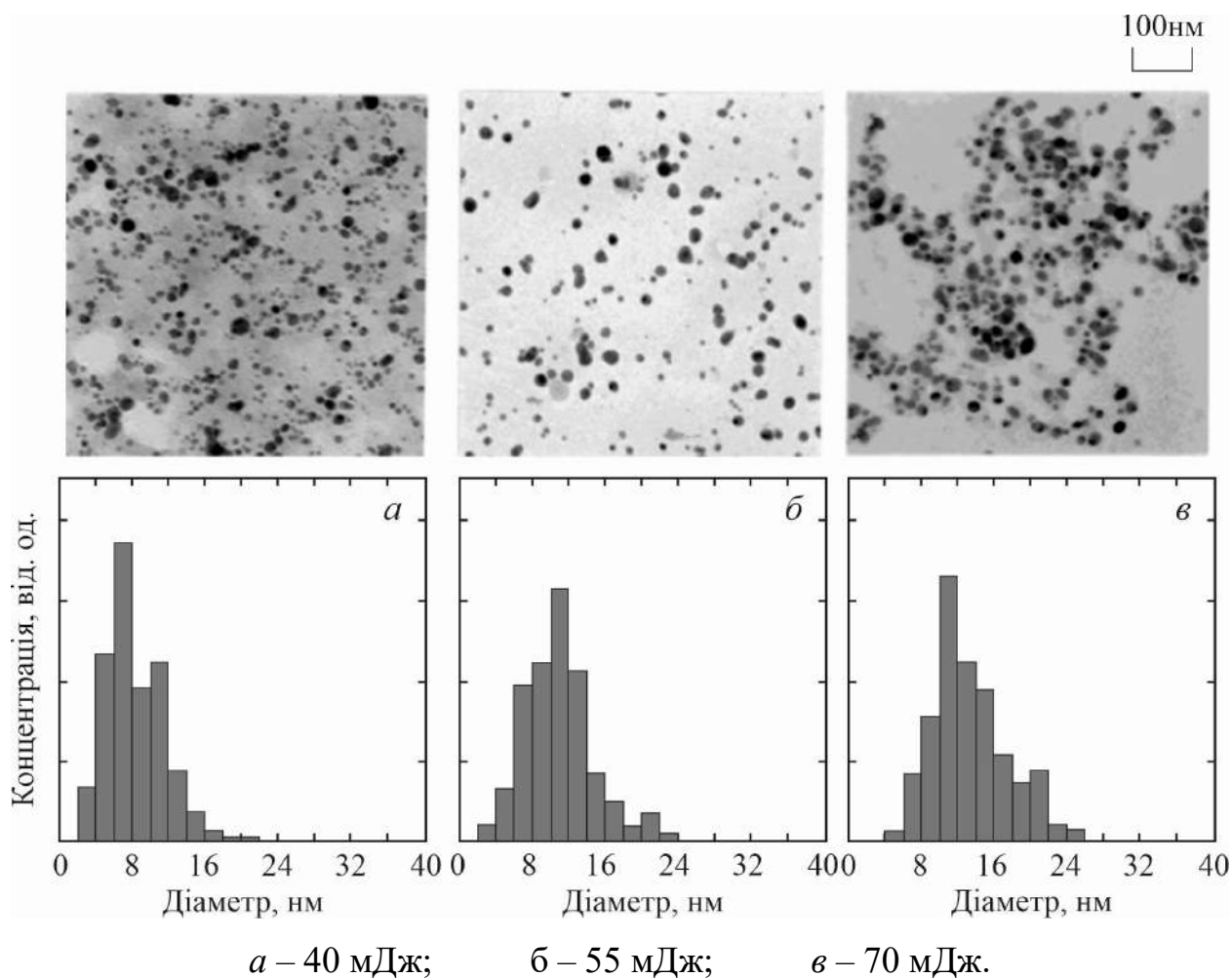


Рисунок 1.2 – Мікроскопічні зображення та гістограми розподілів за розмірами наночастинок, отриманих лазерною абляцією за різних енергій лазерного імпульсу [6]

Метод електричного вибуху провідників дозволяє отримувати частинки в діапазоні розмірів до 1 мкм і полягає в швидкому ( $10^{-5} - 10^{-8}$  с) виділенні енергії в результаті протікання електричного струму великої густини через дріт, розділений зазором із масивним електродом. В результаті виділення великої потужності у провіднику відбувається вибухоподібний розліт його матеріалу з утворенням пари та дисперсної фази. Густина електричного струму в цьому методі досягає величин  $10^4 - 10^6$  А / мм<sup>2</sup> [7]. В результаті

подальшого швидкого розширення щільної паро-крапельної суміші в навколишній газ відбувається її охолодження та конденсація, що супроводжується формуванням субмікронних частинок [8]. Представлений метод відрізняється високою масовою продуктивністю ( $> 200$  г/год) та низькими питомими енергетичними витратами ( $25 - 50$  кВт·год/кг) [9, 10]. Проте, електричний вибух провідників обмежений у діапазоні матеріалів, що використовуються за параметрами їх електропровідності і можливості виготовлення пластичного дроту.

Принципову схему установки для синтезу частинок методом електричного вибуху провідників наведено на рис. 1.3. Процес одержання повністю автоматизований, включаючи імпульсно-періодичні вибухи відрізків провідника, створювані генератором імпульсних струмів великої потужності, неперервні подачі провідника в камеру синтезу, відведення аерозолі та підведення чистого газу [10].

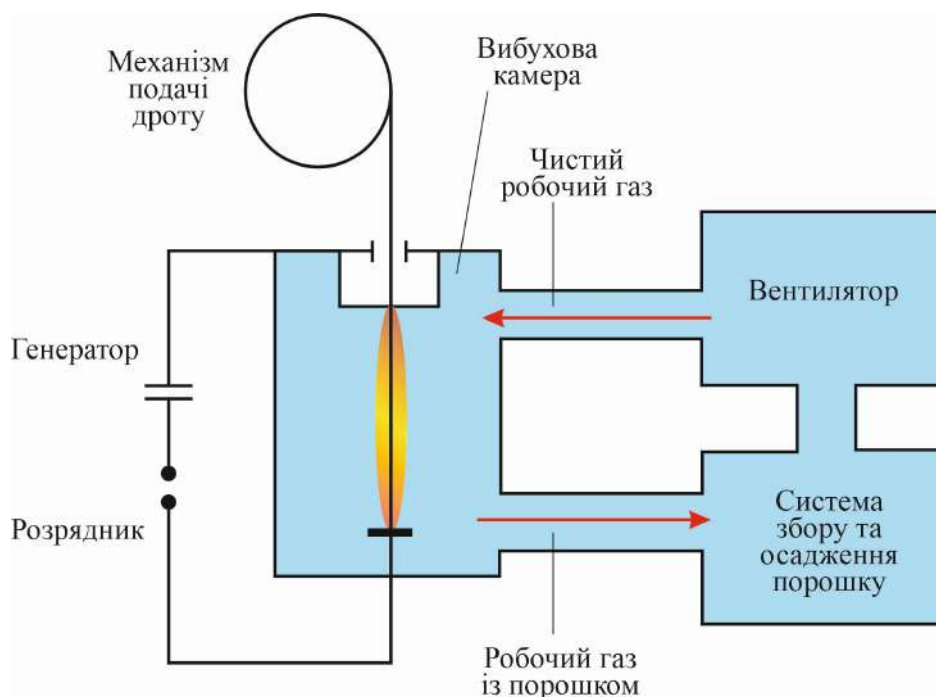


Рисунок 1.3 – Принципова схема установки для синтезу наночастинок методом електричного вибуху провідників [7]

Управління розміром і концентрацією одержуваних частинок здійснюється варіюванням густини введеної енергії, діаметра дроту та швидкості прокачування робочого газу.

Імпульсне електронно-променеве випаровування – перспективний метод отримання наночастинок, який можна порівняти за характеристиками синтезованих наночастинок із методом лазерної абляції. Основний принцип дії даного методу полягає в локальному розігріванні матеріалу мішені сфокусованим електронним променем, густина енергії якого досягає величин близько  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> [11]. Реалізація цього методу дуже залежить від умов синтезу, наприклад, при синтезі в газі низького тиску (0,1–50 Па) потрібні електронні гармати з енергіями пучка до 50 кеВ [9].

При використанні електронних гармат з енергіями пучка порядку 1 МеВ [10,11] вдається здійснювати випаровування матеріалу мішені за великих тисків, що може бути використане для формування потоків аерозолів. До переваг методу електронно-променевого випаровування слід віднести відносно високу енергетичну ефективність одержання наночастинок (близько 100 кВт·год/кг) та можливість синтезу матеріалів, незалежно від їхньої електропровідності [11-13].

Переваги та недоліки методів отримання наночастинок для застосування в аерозольному друку наведено в табл. 1.1 і 1.2.

Таблиця 1.1 – Фізичні методи одержання наночастинок

Метод	Переваги	Недоліки
Лазерна абляція	– робота з різними матеріалами (у тому числі з багатоконпонентними сплавами та сполуками), за винятком оптично прозорих; - висока чистота; - контроль процесів синтезу параметрами лазерного випромінювання.	- низька продуктивність у порівнянні з хімічними методами; - велика дисперсія розмірів та форм одержуваних частинок (від 1 нм до 150 нм); - необхідність підлаштування довжини хвилі лазера під матеріал мішені; - висока вартість обладнання.
Електричний вибух	- висока чистота; - висока масова продуктивність (до 800 г/год); - простота використання в порівнянні з іншими фізичними методами.	- велика дисперсія розмірів та форм одержуваних частинок (від 10 нм до 300 нм); - можливість роботи тільки зі струмопровідними матеріалами, з яких можна виготовити дріт.
Імпульсне електронно-променеве випаровування	- висока енергетична ефективність синтезу (100 – 200 кВт·год /кг); - можливість синтезу струмопровідних та непровідних матеріалів.	- складність реалізації установки, що включає вакуумну камеру, складність конструкції - необхідність забезпечення радіаційного захисту від гальмівного рентгенівського випромінювання.

Таблиця 1.2 – Хімічні способи отримання наночастинок

Метод	Переваги	Недоліки
Гідроліз «Золь-гель»	- низька дисперсія наночастинок; - Отримання наночастинок з різних матеріалів; - відсутність агломерації.	- складність апаратного оформлення; - присутність ПАР та дисперсантів .
Кріозоль		

### 1.1.2 Особливості аерозольних металевих наночастинок, одержуваних у імпульсно-періодичному газовому розряді

Серед перспективних методів синтезу наночастинок виділяється імпульсно-періодичний газовий розряд [2,8,13]. Це відомий спосіб отримання наночастинок з матеріалу електродів [14], що піддається контролю зі швидким відгуком внаслідок миттєвої зміни параметрів електричної схеми розрядного контуру [15]. У цьому методі синтезу потоки наночастинок формуються електричною ерозією електродів шляхом виникнення розряду між катодом і анодом (рис. 1.4). Розряд триває декілька мікросекунд і, досягаючи температури близько  $10^4$  К [16], випаровує поверхні електродів локальними вибухами мікрівістрів, формуючи хмару наночастинок. Далі утворена паро-краплинна дисперсія швидко охолоджується, конденсується у вигляді сферичних наночастинок і транспортується в потоці газу або рідини. При цьому в процесі транспортування частинки, що синтезуються, можуть утворювати дендритоподібні агломерати, форма і розмір яких істотно залежать від параметрів розряду.

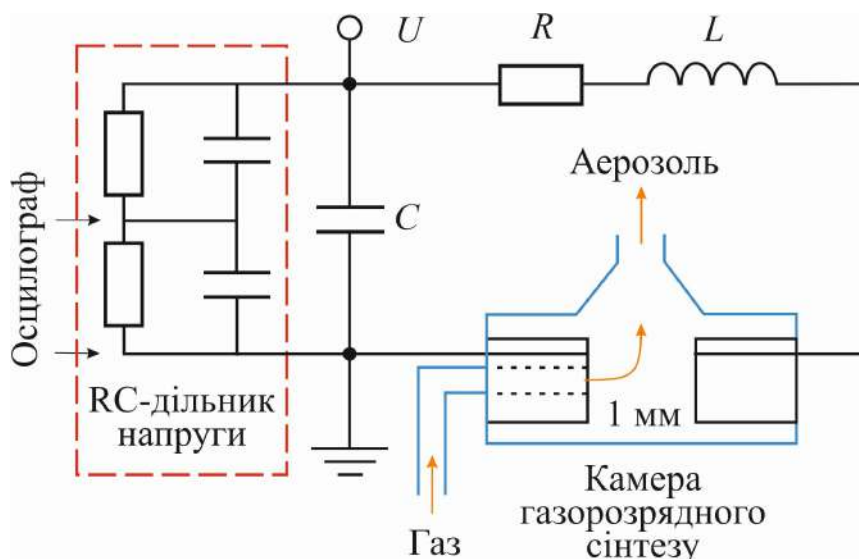


Рисунок 1.4 – Схема установки генератора наночастинок у імпульсному газовому розряді

Метод дозволяє отримувати наночастинки менші за 20 нм у діаметрі [3–6], що є порівняним із характерними розмірами наночастинок, одержуваними лазерною абляцією мішеней [5] та істотно менше за характерні розміри частинок, одержуваних іншими методами газофазного синтезу, такими як електричний вибух провідників [6] та плазмовий синтез [7]. Даним методом можна синтезувати наночастинки для задач формування та допування багатокомпонентних структур: металевих сплавів [17,18], напівпровідникових квантових точок [19–22], оптичних та магнітних матеріалів [23], високотемпературних надпровідників [24,25]. Крім того, цей метод є зручним для виготовлення пристроїв мікроелектроніки та фотоніки [26], а також газових [17,18] та біологічних сенсорів [19] на основі наночастинок, мікропровідників, резисторів [24,25] та ємнісних елементів [28].

Розмір і форма наночастинок, що синтезуються, істотно залежать від енергії імпульсного розряду конденсатора, частоти повторення розрядів [15,22] і параметрів несучого газу таких, як склад, витрата, тиск і температура газового середовища [23–25]. Наприклад, енергія, що виділяється в розряді, і частота повторення імпульсів є ключовими параметрами і сильно впливають на морфологію та концентрацію наночастинок, що синтезуються [29]. Визначення точного значення енергії в розряді є складною експериментальною задачею, що вирішується вимірюванням сили струму та напруги в міжелектродному проміжку для імпульсного розряду при синтезі наночастинок [35] та для процесів мікроелектроерозійної обробки [36]. Більш простий підхід полягає в оцінці енергії, що виділяється в проміжку, за допомогою апроксимації активного імпедансу розрядного проміжку еквівалентним постійним електроопіром [21,37].

В теперішній час за допомогою даного методу отримують наночастинки металів [33] та сплавів [27,38], їх оксидів [29,30,32], вуглецевих матеріалів [31,32]. Істотним недоліком імпульсно-періодичного

розряду в порівнянні з іншими методами впродовж тривалого часу залишалася його низька продуктивність при генерації частинок малих розмірів, що становить близько 10-100 нг за один розрядний імпульс у міжелектродному проміжку. При цьому спосіб підвищення енергії розряду [33-37] з метою збільшення продуктивності виявляється непродуктивним, оскільки призводить до значного збільшення середнього розміру одержуваних частинок [38-42]. В останні роки для збільшення продуктивності був запропонований підхід, що полягає у збільшенні частоти проходження розрядних імпульсів у міжелектродному проміжку, що обдувається високошвидкісним потоком газу для швидкого відновлення електричної міцності проміжку. Спочатку для цього розрядний імпульс запускається в режимі самопробою міжелектродного проміжку [43,44]. Також було запропоновано інший підхід для підвищення продуктивності синтезу наночастинок шляхом збільшення числа міжелектродних проміжків, що включаються послідовно до єдиного розрядного контуру [46–48].

Останнім часом активно ведуться роботи з оптимізації енергетичної ефективності синтезу наночастинок у імпульсному газовому розряді. Наприклад, відомо, що даний параметр залежить від газового середовища, в якому розміщено електроди. За інших рівних умов різні гази мають різну енергію іонізації, через що процес виникнення розряду для цих середовищ може відрізнятися (рис. 1.5).

Залежність напруги пробою ( $V_b$ ) від параметрів газу задається законом Пашена:

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{1 + \gamma}}, \quad (1.1)$$



де  $A$ ,  $B$  – сталі величини,  $p$  – тиск газу,  $d$  – відстань між електродами,  $\gamma$  – коефіцієнт Таунсенда [69], величини  $A$ ,  $B$ ,  $\gamma$  залежать від аналізованого газового середовища. Графічно закон Пашена зображено на рис. 1.6.

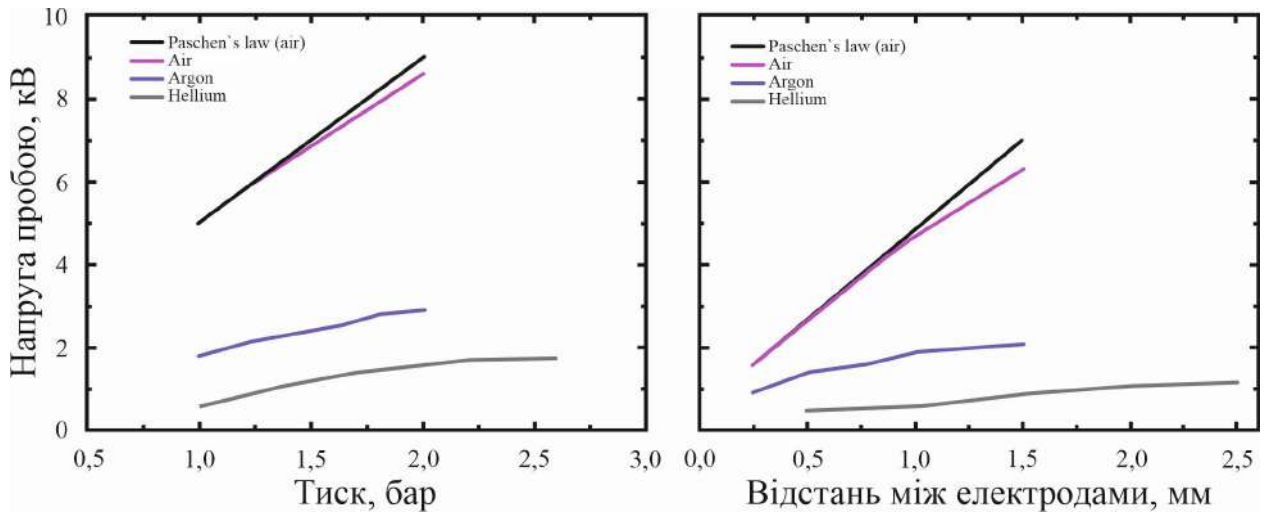


Рисунок 1.5 – Експериментальні та теоретичні залежності напруги пробую від тиску газу та відстані між електродами [44]

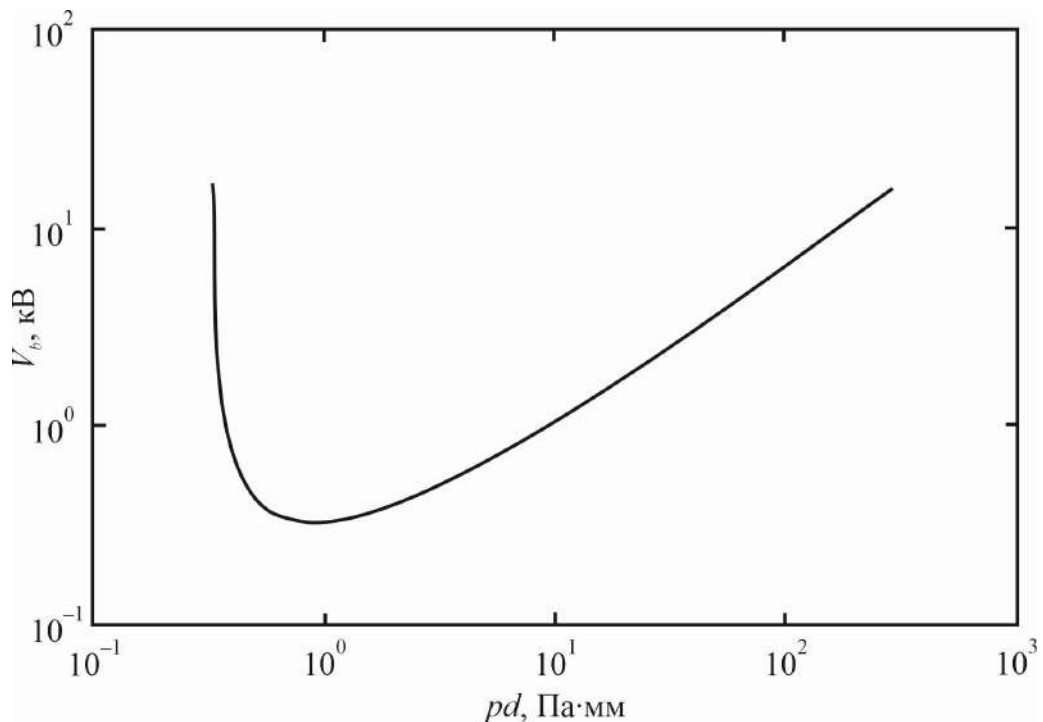


Рисунок 1.6 – Крива Пашена для пробую у повітрі ( $A=12$ ,  $B=365$ ,  $\gamma=0.02$ ) [44]

З позиції енергетичної ефективності метод газорозрядного синтезу значно поступається іншим газофазним методам, виявляючись майже на порядок величини менш ефективним у порівнянні з лазерною абляцією. Цей недолік пов'язаний із фізичною природою передачі енергії з газового розряду електродного матеріалу. Проте, енергетичну ефективність розрядного синтезу можна підвищити шляхом оптимізації розрядних процесів.

Крім енергетичних параметрів значний інтерес представляє вплив геометрії відносного розташування електродів і газового потоку, що їх обдуває, на синтез частинок. Існує безліч конфігурацій розташування електродів для іскрових розрядних генераторів (рис. 1.7): «rod-to-rod», «rod-to-tube», «pin-to-plate», «wire-in-hole», «wire-to-hole» та інші [50,51]. Кожна з наведених геометрій потребує точного підлаштування та контролю за положенням електродів. Наприклад, у геометріях «wire-in-hole» і «wire-to-hole» з товщиною дроту близько 0,5 мм складно стабілізувати положення електрода в потоці газу. У даний час найбільш поширеною є конфігурація «rod-to-rod», в якій використовується пара циліндричних електродів, зафіксованих у патронах, що обтискають, і розділених зазором [52]. Ця конфігурація є менш вимогливою до точності позиціонування електродів для відтворюваності результату синтезу наночастинок. Вплив положення електродів відносно геометрії газового потоку на розмір та форму наночастинок було досліджено експериментально та методами комп'ютерного моделювання авторами [53]. Також було встановлено суттєвий вплив діаметра електродів у формі стрижнів на енергетичну ефективність синтезу наночастинок [54].

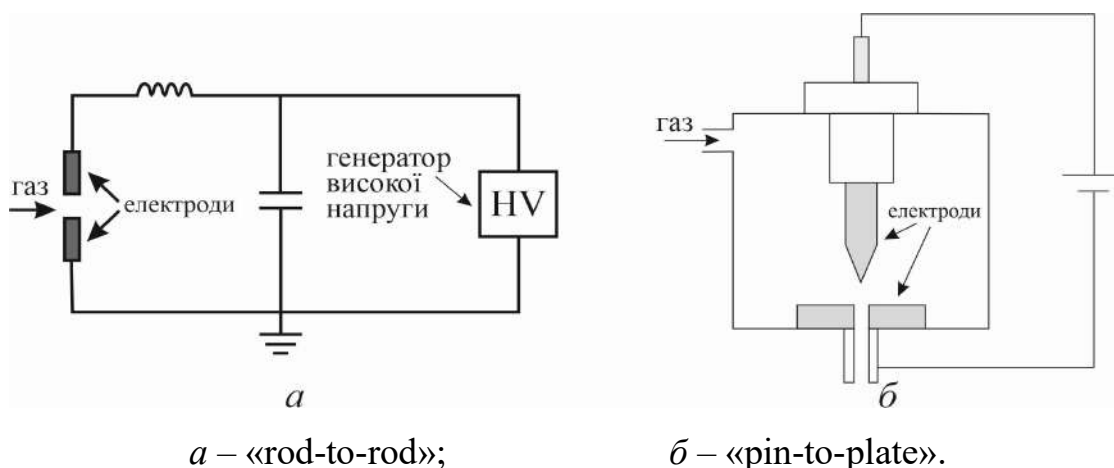


Рисунок 1.7 – Конфігурації розташування електродів для іскрових розрядних генераторів [58]

Саме метод синтезу наночастинок в імпульсно-періодичному газовому розряді є найбільш цікавим для задач аерозольного друку наночастинками завдяки його простоті реалізації та можливості мультиплікації розрядних проміжків. Саме цей метод зі своїми перевагами та недоліками (табл. 1.3) найчастіше і використовується для синтезу наночастинок.

Таблиця 1.3 – Переваги та недоліки методу синтезу наночастинок в імпульсно-періодичному газовому розряді

Метод	Переваги	Недоліки
Імпульсно-періодичний газовий	<ul style="list-style-type: none"> <li>- висока чистота матеріалу;</li> <li>- контроль процесів синтезу параметрами струму;</li> <li>- висока енергетична ефективність синтезу;</li> <li>- простота використання в порівнянні з альтернативними фізичними методами.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- низька продуктивність у порівнянні з хімічними методами;</li> <li>- можливість роботи тільки з провідними матеріалами (метали, сплави, напівпровідники, вуглецеві сполуки та інші).</li> </ul>

### 1.1.3 Формування масивів наночастинок на підкладках методами чорнильного друку

Одним із найбільш використовуваних методів формування масивів наночастинок у даний час є аерозольний друк спеціально виготовленими мікрокраплями чорнила, що містять нанорозмірні об'єкти. Цей метод виділяється можливістю формування як планарних структур, так і просторових міжз'єднань (рис. 1.8).

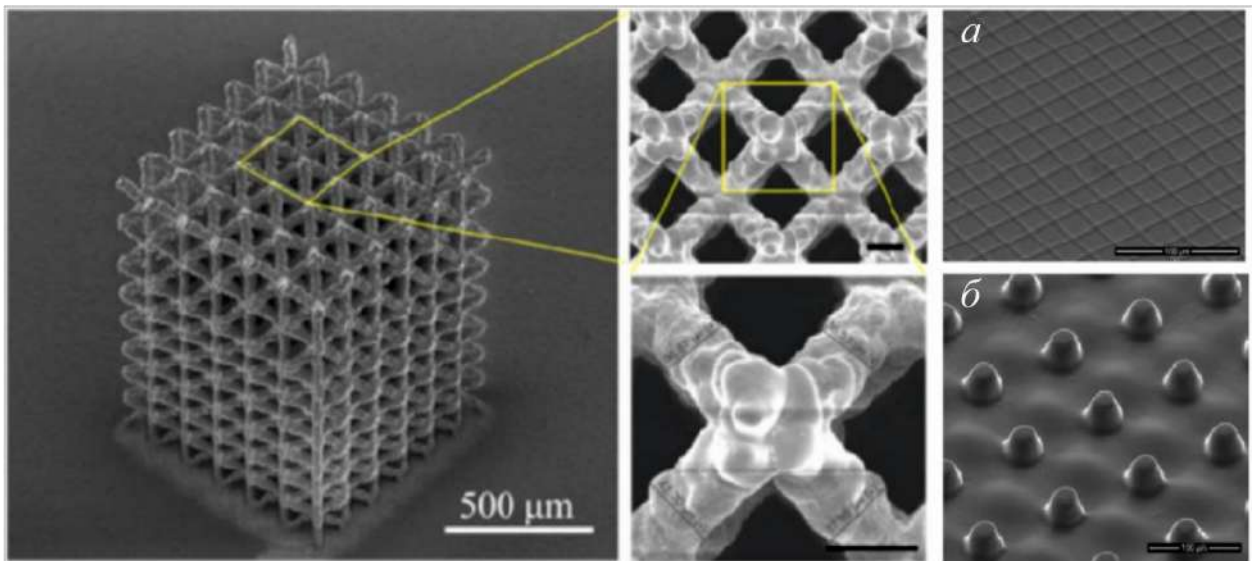


Рисунок 1.8 – Приклади структур, що виготовляються за допомогою аерозольного друку мікрокраплями [55,56]

Основна ідея цього методу полягає у формуванні мікрокрапель розчину (атомізації), їх транспорту в направленому потоці аерозолі, фокусуванні аерозольного потоку сопловим елементом, осадженні крапель на поверхню підкладки і видаленні розчинника. Рисунок друкованої структури задається рухомим координатним столом, що переміщує підкладку під безперервним потоком аерозолі. Схематичне зображення установки для формування масивів наночастинок наведено на рис. 1.9. Цей підхід дозволяє наносити групи наночастинок на складні поверхні за можливості віддалення сопла відносно підкладки на відстань до 5 мм [57].

Практично будь-який матеріал, на основі якого можна створити колоїдний розчин, сумісний із технологією аерозольного друку мікрокраплинами. Поверхневий натяг, в'язкість, летючість та густина матеріалів є ключовими параметрами для прогнозування стійкості дисперсних середовищ. Використання широкого спектру матеріалів відкриває можливості, що виходять за рамки конкуруючих струминних технологій, основним обмеженням яких часто виступає в'язкість чорнила при значеннях не нижче 20 сП. Приклади чорнил, що використовуються в аерозольному друці, варіюються від розчинів срібних наночастинок [59] і кераміки [60] до біологічних матеріалів, білків або ланцюжків ДНК [61].

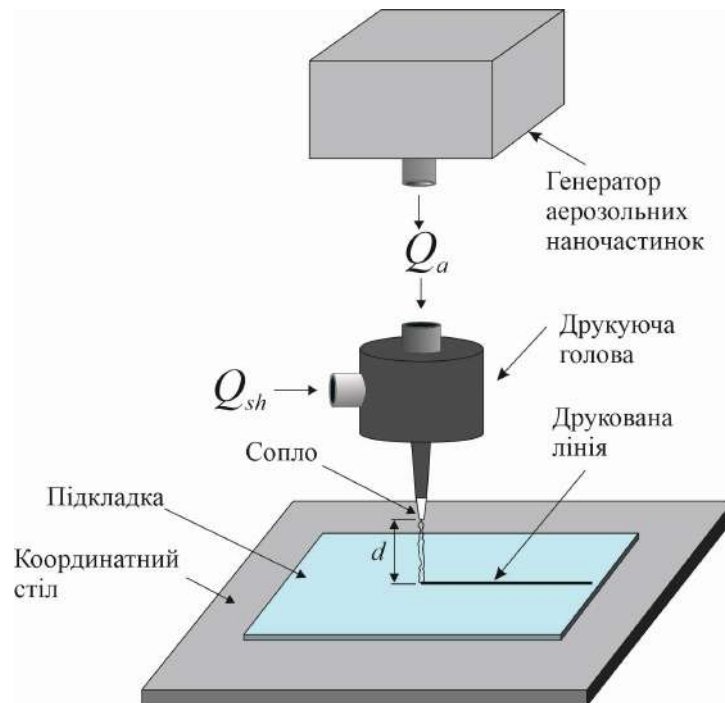


Рисунок 1.9 – Схематичне зображення установки для нанесення масивів наночастинок методом аерозольного друку мікрокраплинами [68]

Способи атомізації найбільш широко представлені у вигляді ультразвукового та пневматичного розпилення. Ультразвуковий розпилювач виробляє однорідні аерозолі, проте він обмежений параметром в'язкості чорнила, що використовується в діапазоні 1-10 сП. Пневматичний підхід, навпаки, дозволяє розпоршувати матеріали з в'язкістю 10-1000 сП, але

сильно збільшує ступінь дисперсності аерозолю, що отримується, і вимагає додаткових етапів очищення потоку перед осадженням.

Доставка сформованого аерозолю здійснюється в газовому тракті, довжина якого має бути мінімізована для зменшення втрат на стінках трубок. З трубок аерозоль надходить у сопло спеціальної форми, що звужується, необхідне для нанесення вузької лінії на поверхні підкладок (рис. 1.10). Пристрій сопла передбачає введення додаткового потоку, що стискає та обмежує аерозоль. Формування газового шару між потоком аерозолу та стінками сопла зменшує ризик його засмічення. Також застосування захисного газу призводить до колімації потоку аерозолу, що дозволяє друкувати на відстані до 5 мм від підкладки і керувати геометричними розмірами структури, що наноситься на її поверхню. Найкраще досягнуте латеральне розрізнення друку в теперішній час складає 10 мкм.

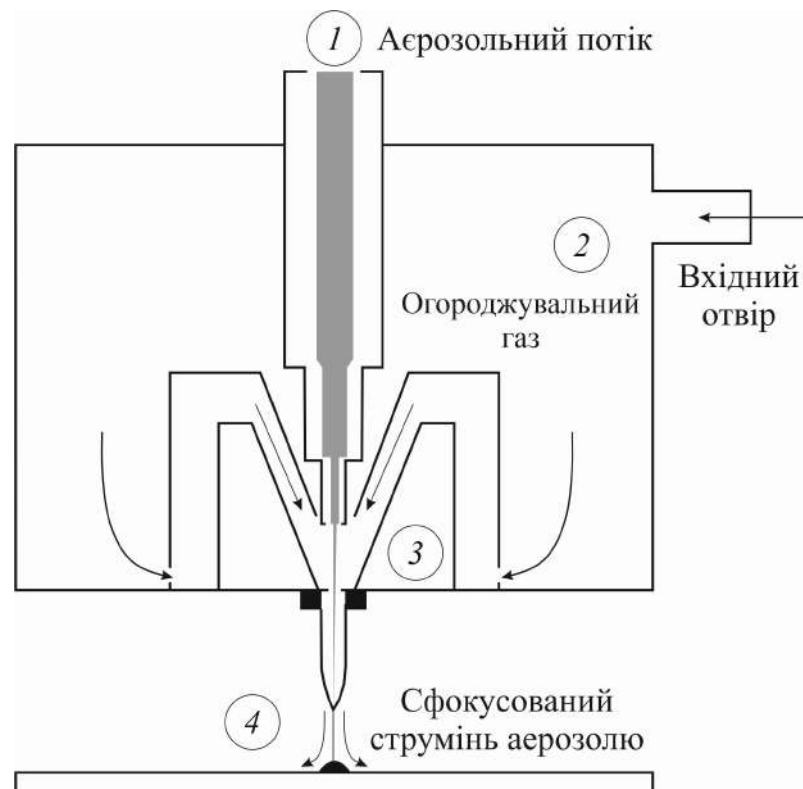


Рисунок 1.10 – Схематичне зображення сопла для аерозольного друку мікрокраплями [62]

При зіткненні з підкладкою найбільшу ефективність осадження мають монодисперсні і щільні краплі, що мають достатню інерцію для прилипання

до підкладки. Їх розмір також повинен бути в допустимому діапазоні, з одного боку, для забезпечення формування елемента мінімального розміру, і з іншого боку, запобігаючи засміченню сопла.

Подальше сушіння нанесених на підкладку чорнил, що супроводжується видаленням розчинника, проводиться температурним впливом на нанесені структури. Час сушіння чорнила при температурах 60–80 °С може змінюватись від 1 до 24 годин, в залежності від складу розчинника та умов навколишнього середовища. Принципово новим кроком у цьому напрямку стало використання чорнил із високою масовою часткою колоїдних наночастинок (70–75 мас. %), що дозволило випаровувати розчинники та летючі домішки за кімнатної температури за 1 год [63]. Проте, проблема необхідності висушування нанесених на підкладку чорнил залишається актуальною.

#### 1.1.4 Формування масивів металевих наночастинок методом сухого аерозольного друку

В роботах [36,44,45] було запропоновано новий підхід в аерозольному друці без використання чорнила, що базується на застосуванні в якості джерела наночастинок газорозрядного генератора аерозолів. Наночастинки у цьому підході синтезуються безпосередньо перед використанням у процесах імпульсно-періодичного газового розряду в проточному газі між електродами з необхідного матеріалу [21]. Аерозольний потік наночастинок фокусується коаксіальним соплом на поверхню, що обробляється, осаджуючи частинки в сухій формі без використання розчинника.

Відомо, що при виході аерозолію з аеродинамічного сопла у вакуум потік наночастинок починає сходитися [66]. Ґрунтуючись на цих даних, теоретично та експериментально було показано [67–69], що при певних

параметрах аерозольного потоку, що рухається через мікрокапілярне сопло, на аерозольні наночастинки в потоці газу діє поперечна сила Саффмана, що викликає помітне зміщення наночастинок до осі капіляру (рис. 1.11). Фізичний механізм цієї сили пов'язаний із в'язким характером руху газу, що характеризується градієнтом поздовжньої швидкості потоку у бік осьової лінії. Цей висновок відкриває можливості для фокусування потоку аерозолі в струмінь діаметром до 5 мкм.

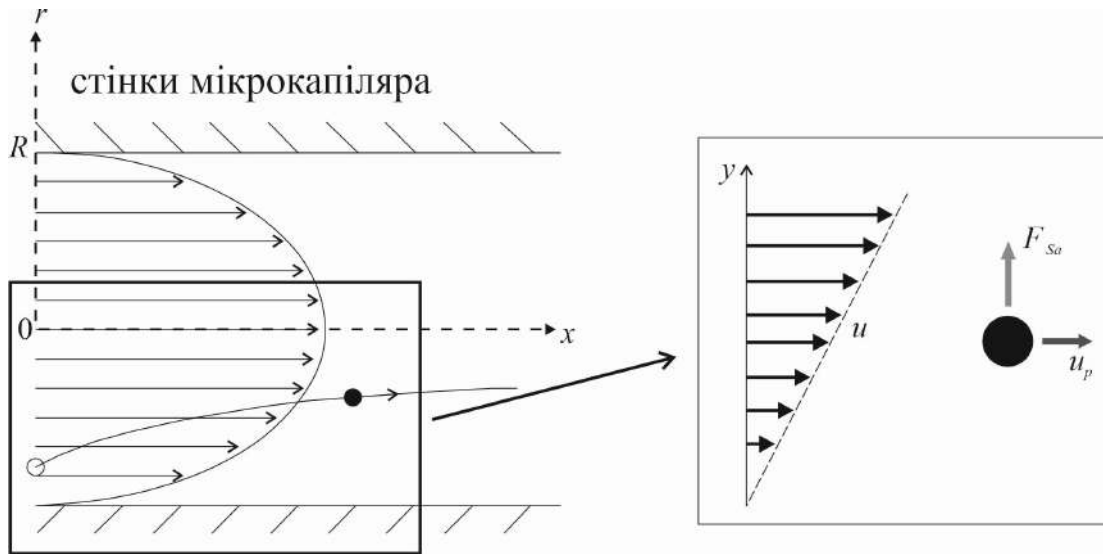


Рисунок 1.11 – Дія сили Саффмана на частинку потоку газу всередині мікрокапіляра [67]

Грунтуючись на розумінні процесів руху наночастинок у складі аерозолі, головний підхід щодо реалізації фокусувальної системи передбачає використання аеродинамічних сопел коаксіального типу. Даний спосіб фокусування дозволяє отримувати струмінь аерозолі шириною до 100 мкм на відстані до 5 мм [69] від поверхні підкладки і формувати на ній лінію з наночастинок шириною близько 10 мкм. Сопло являє собою дві трубки, що коаксіально сходяться (рис. 1.12). Всередині внутрішньої трубки рухається аерозоль із частинками  $Q_a$ , а у зовнішній – чистий газ  $Q_{sh}$ , що виконує функцію огорожувального потоку і запобігає прилипанню наночастинок до стінок сопла. Внутрішній канал сопла характеризується гладкою стінкою та поступовим зменшенням діаметра каналу. На кінці сопла виконано отвір з



діаметром  $D_n$ , що формує аеродинамічно сфокусований струмінь аерозолію з діаметром  $D_b$ , на величину якого можна впливати зміною витрати потоку, що огорджує [70, 71]. Це досягається завдяки ламінарному руху газу, який разом із потоками наночастинок утворює циліндрично-симетричну систему. При цьому внутрішній діаметр вихідного отвору сопла може бути досить малим, і наночастинок не прилипатимуть до стінок, оскільки зовнішній потік газу обмежить поперечне переміщення наночастинок.

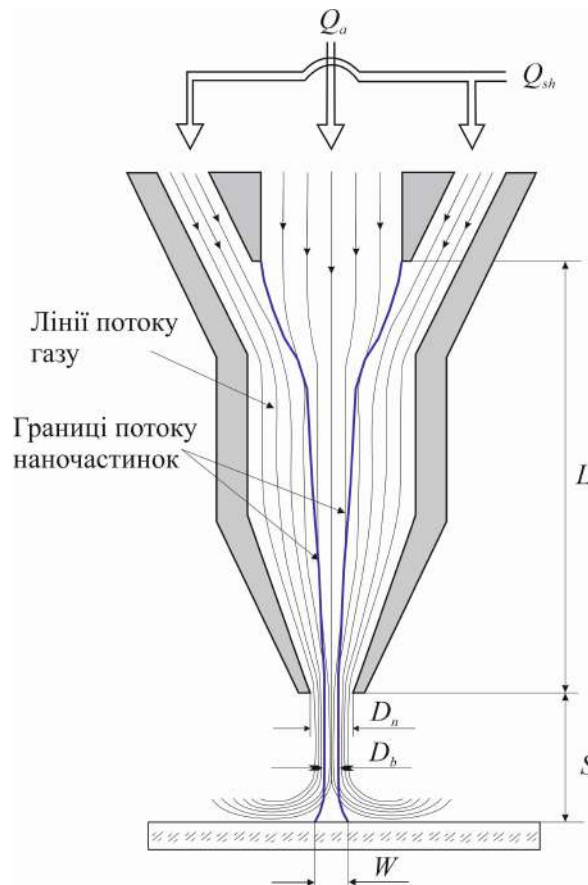


Рисунок 1.12 – Зображення перерізу коаксіального сопла, з лініями струму аерозолію [71]

Звуження діаметра вихідного потоку відбувається завдяки тиску газу і силі Саффмана. Звідси випливає, що збільшення швидкості зовнішнього потоку дозволяє зменшити вихідний діаметр потоку аерозолію [72]:

$$D_b = D_n \sqrt{1 - \sqrt{\frac{\chi}{1 + \chi}}}, \quad (1.2)$$

де  $\chi$  – відношення потоків газу  $Q_{sh}$  і  $Q_a$ , пропорційні їх швидкостям. Графік залежності вихідного діаметра потоку аерозолі від параметра  $\chi$  зображено на рис. 1.13. Цей спосіб фокусування використовується для отримання струменів аерозольних частинок, що розбризкуються із суспензій, і застосовується в розробці сухого аерозольного друку [72].

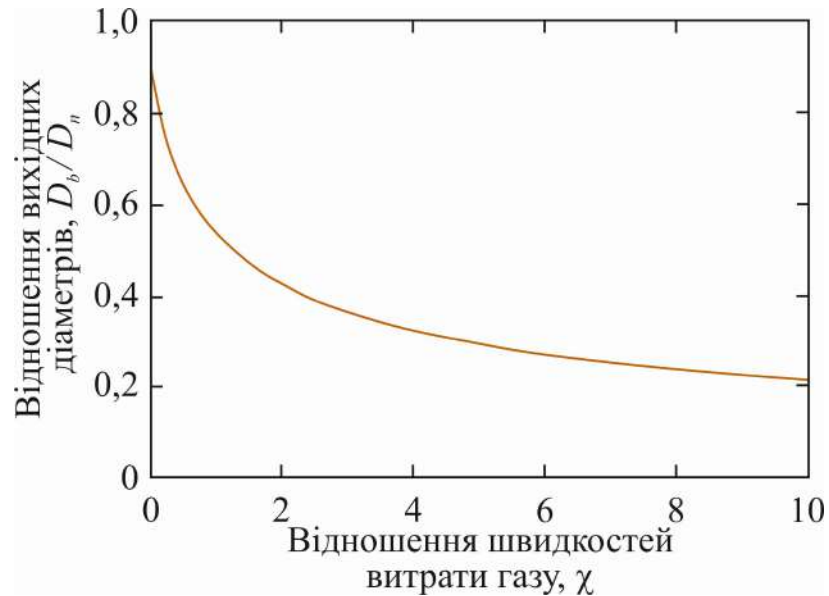


Рисунок 1.13 – Графік залежності вихідного діаметра потоку аерозолі від параметра  $\chi$  [72]

Дослідження розглянутого методу продемонстрували його високу ефективність та продуктивність перед іншими адитивними технологіями [64, 73–75]. Електродні матеріали, що використовуються в процесі сухого аерозольного друку, як джерела наночастинок, не обмежені за умовами та термінами зберігання. Наночастинки аерозолі, що синтезуються в потоці інертного газу, відрізняються високою чистотою матеріалу, що дозволяє формувати структури, вільні від домішок та ПАР [20]. Це відкриває можливості для формування масивів наночастинок на підкладках та швидкого їх спікання, наприклад, лазерним випромінюванням безпосередньо після осадження, що становить інтерес для масового виготовлення елементів мікроелектроніки та фотоніки, у тому числі на викривлених та термочутливих підкладках [76–78].

## 1.2 Дослідження оптичних властивостей суспензій із наночастинками та частинок на підкладці

### 1.2.1 Оптичні властивостей ізольованих металевих наночастинок

Дослідження оптичних властивостей ізольованих металевих наночастинок різних форм та розмірів є достатньо складною задачею [79,80]. Наночастинки у складі аерозолів та колоїдних розчинів являють собою системи відокремлених наночастинок, вільних від колективних взаємодій. Саме такі системи цікаві завдяки можливості дослідити оптичні властивості наночастинок певної форми та розмірів. У складі колоїдних розчинів можна зустріти наночастинки найрізноманітніших форм [81,82]. При цьому наночастинки у рідких дисперсіях, як і на підкладках, взаємодіють із конденсованим середовищем, яке може впливати на їх оптичні властивості і тепловий режим, що накладає певні обмеження на застосування експериментальних методів досліджень. Наприклад, при дослідженнях наночастинок у складі колоїдних розчинів [83,84], вони покриваються шаром ПАР або дисперсантів у складі розчинника [85,86], що сприяє додатковим втратам енергії та екрануванню частини випромінювання.

Подібних проблем позбавлені дослідження оптичних властивостей наночастинок у складі аерозолів, проте таких експериментальних досліджень практично немає, швидше за все, через складність реалізації експериментальної установки.

З іншого боку, оптичні властивості наночастинок у газових середовищах активно досліджувалися обчислювальними методами, проте переважно для простих форм, наприклад, для сфер, циліндрів і пірамід [90–92], а також для гібридних частинок типу ядро-оболонка [93,94]. Так, сферична форма наночастинок є найпростішою для розгляду процесів взаємодії з електромагнітним випромінюванням завдяки точковій просторовій симетрії, що робить їх головним об'єктом обговорень.

Наприклад, аналітичний розв'язок задачі про дифракцію плоскої хвилі вперше було запропоновано у роботі [95] для наночастинок у формі сфер. Застосування аналітичних методів до несиметричних невпорядкованих за своєю структурою частинок є більш складною задачею, яка вирішувалася в обмеженій кількості робіт, наприклад, [96].

Розглянемо коливання електронів провідності у металевих наночастинках. Резонанс даного типу коливань має назву локалізованого поверхневого плазмонного резонансу (ППР). Його характеристики залежать від матеріалу наночастинок та навколишнього діелектрика, а також від її розміру та форми [92]. Теорія Мі розсіювання на сферичних наночастинках визначає локалізований ППР наступним наближенням:

$$\epsilon'_m = -\epsilon'_d \frac{l+1}{l}, \quad l = 1, 2, 3, \dots \quad (1.3)$$

Ця умова задає нескінченну кількість мод, серед яких найнижча (рис. 1.14) буде реалізована при  $l = 1$ :

$$\epsilon'_m = -2\epsilon'_d, \quad (1.4)$$

де  $\epsilon'_m$  та  $\epsilon'_d$  – дійсні частини комплексної діелектричної проникності для металу та діелектрика, відповідно.

Зазначимо, що у формах наночастинок, відмінних від сферичної, в оптичних спектрах спостерігатиметься частотне розщеплення плазмонних мод [87,88]. На рис. 1.15 зображено залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі для золотих наночастинок різної форми. Максимуми на спектрах відповідають ППР.

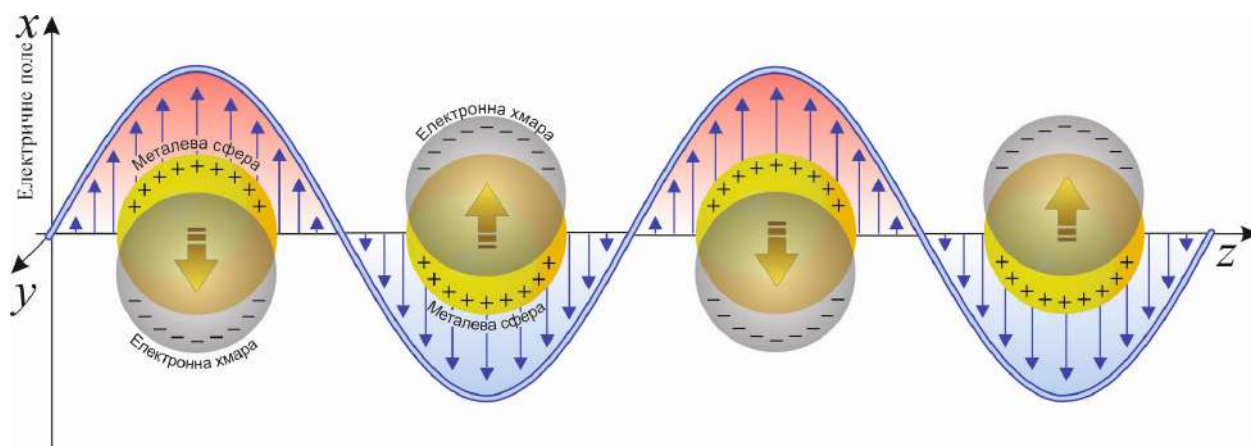


Рисунок 1.14 – Ілюстрація збудження плазмонної моди на ізольованій металевій наносфері [87]

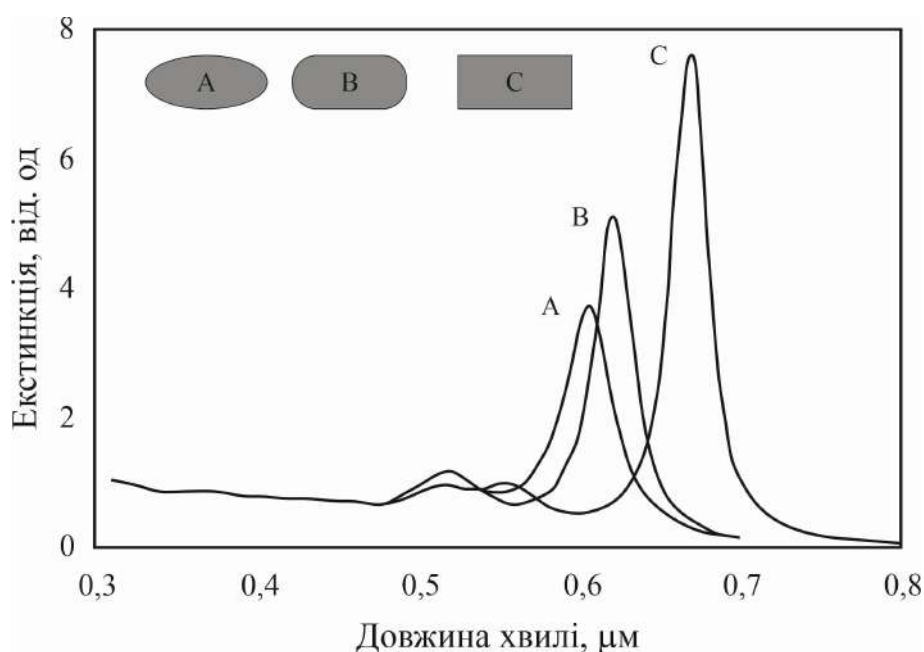
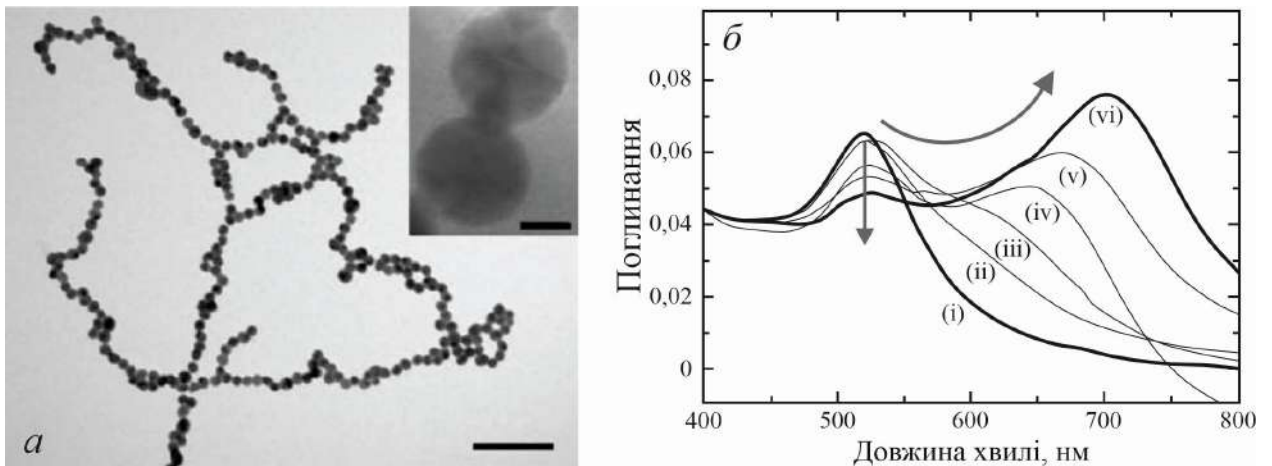


Рисунок 1.15 – Спектри поглинання золотих наночастинок різної форми [98]

Агломерати наночастинок є ланцюжками, що гілкуються. Ланцюжки складаються з наночастинок різних форм і розмірів (рис. 1.16, *a*), кожна з яких окремо здатна підтримувати коливання на фіксованій довжині хвилі. Проте, наявність щільного контакту між наночастинками, зумовленого молекулярними та електричними силами притягання, сприяє усупільненню електронної густини на весь агломерат цілком. Завдяки цьому вони здатні підтримувати коливання у широкому діапазоні частот [99].



*a* – мікроскопічне зображення ланцюжка золотих наночастинок;  
*б* – їх спектри поглинання зі збільшенням кількості наночастинок у ланцюжку.

Рисунок 1.16 – Дослідження ланцюжка золотих наночастинок [101,102]

У роботі [90] досліджувалися спектри поглинання ланцюжків золотих наночастинок у складі колоїдного розчину (рис. 1.16, *б*). Зі збільшенням числа наночастинок у складі ланцюжка у спектрі поглинання виявляється резонансний контур, що зміщується у бік великих довжин хвиль. У першому наближенні цей новий пік можна пояснити збудженням поздовжніх коливань, що виникають в результаті ефективної диполь-дипольної взаємодії поверхневих плазмонів сусідніх наночастинок [92].

### 1.2.2 Особливості оптичних властивостей неконтактуючих наночастинок та їх агломератів на поверхні підкладок

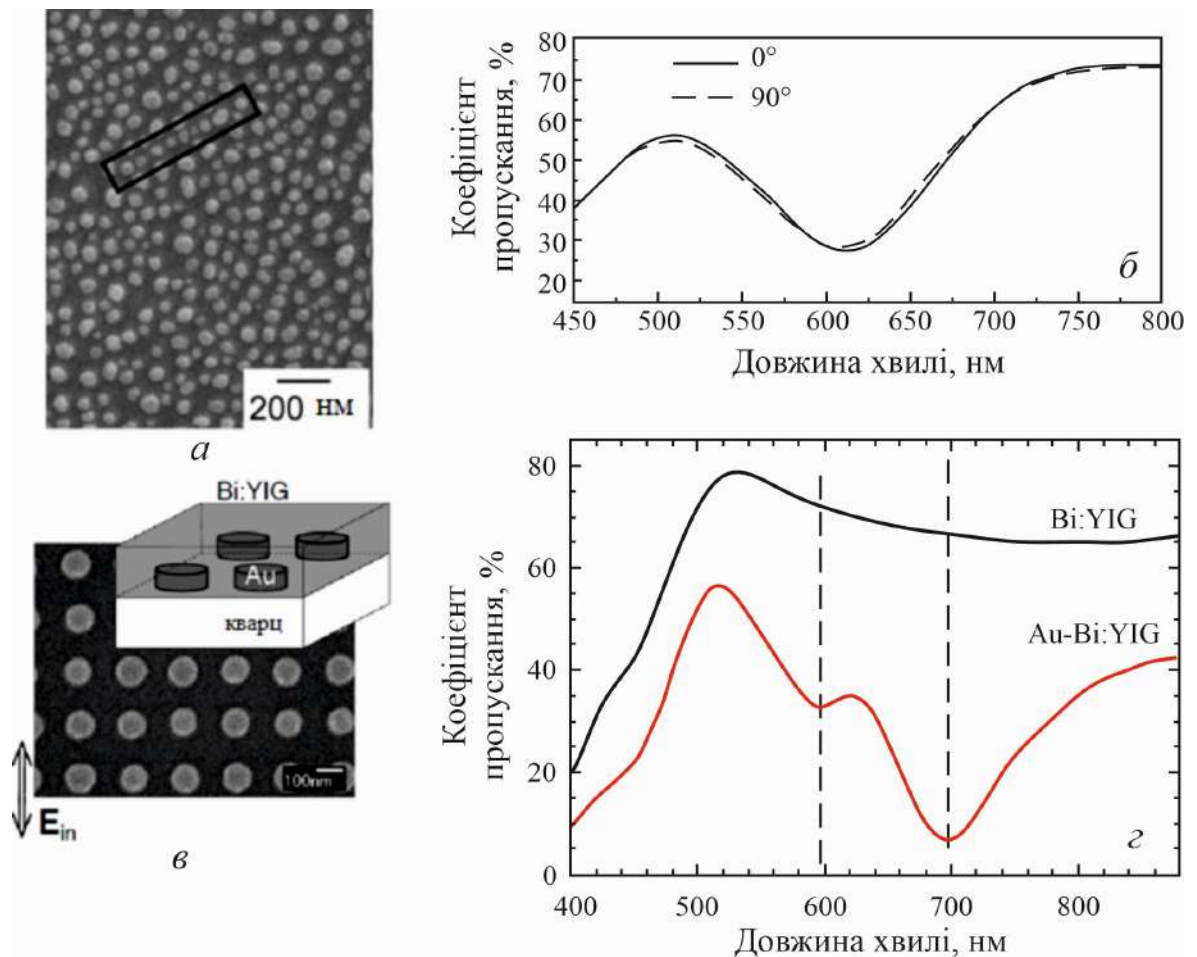
При дослідженнях наночастинок на підкладках, особливо цікавими є задачі лазерного спікання масивів наночастинок [67,98,99], та неминучого формування теплових і електричних контактів з поверхнею підкладки [51], що впливає на процеси розподілу внутрішньої енергії частинках. У таких задачах важливо враховувати можливі колективні взаємодії між сусідніми

наночастинками, що виникають за певної густини розподілу наночастинок на поверхні підкладки [94].

Дійсно, при хаотичному розподілі наночастинок, що не контактують одна з одною, на поверхні підкладки в оптичних спектрах не спостерігається інших особливостей, крім ППР (рис. 1.17, *а, б*) [101]. Зі зростанням двовимірної концентрації однакових наночастинок у площині структури, що вивчається, відбувається посилення їх взаємодії. Вже на відстані між елементами двовимірного масиву, порівнянному з їх розмірами, крім спектральної смуги, пов'язаної з ППР на відокремленій наночастиці, можуть спостерігатися додаткові спектральні смуги поглинання, зумовлені взаємодією між локалізованими модами на сусідніх елементах.

Виникнення додаткових спектральних смуг залежить від ступеня впорядкованості масиву, розміру його елементів, а також від відстані між ними. Змінюючи будь-який з цих параметрів, можна ефективно керувати плазмонними властивостями системи.

Варто відзначити, що дві локалізовані плазмові моди, збуджені на сусідніх в масиві елементах, можуть бути гібридизовані. Якщо взаємодія між ними здійснюється з однаковою фазою, то результатом взаємодії стане «світла» мода плазми, що виявляється в спектрах розсіювання. Плазмонні «темні» моди відповідають взаємодії локалізованих мод у протифазі. «Темні» моди є висвічуючими і переважно проявляються у спектрах поглинання [102].



*a* – мікроскопічне зображення масиву непорядкованих золотих наночастинок;

*б* – його спектри пропускання, отримані лінійно-поляризованим випромінюванням ортогональних поляризацій;

*в* – мікроскопічне зображення квадратної ґратки золотих наночастинок у матриці Bi:YIG;

*г* – спектри пропускання структури та шару Bi:YIG для лінійно-поляризованого випромінювання.

Рисунок 1.17 – Зображення масивів золотих наночастинок та їх спектри пропускання [100]

Перспективними об'єктами для досліджень виступають упорядковані структури з наночастинок шляхетних металів, які здатні підтримувати плазмонні резонанси різної природи. До таких резонансів відносяться резонанс  $M_i$ , що виявляється як власна мода коливань електронів провідності



в об'ємі відокремленої наночастинки, і гратковий поверхневий плазмонний резонанс (ГППР), що є наслідком колективної диполь-дипольної взаємодії наночастинок.

Для поляризаційно-незалежної періодичної структури спектральне положення ГППР у геометрії нормального падіння  $\lambda$  залежить від постійної ґратки та ефективного показника заломлення середовища [95,98]

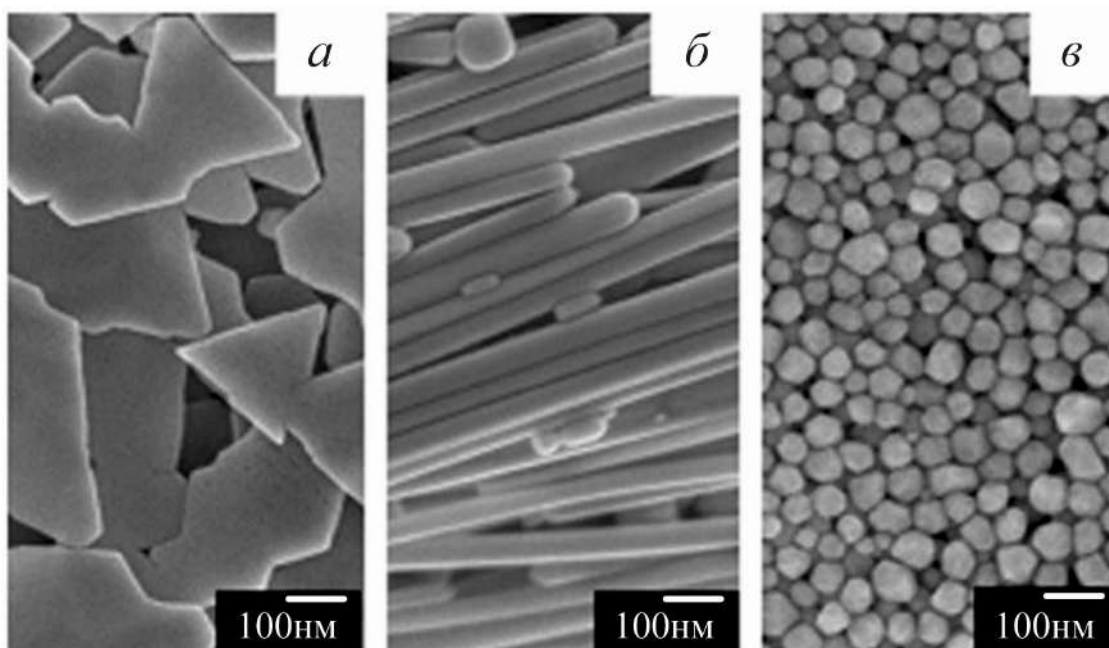
$$m\lambda = \bar{n}_{\text{eff}} D, \quad (1.6)$$

де  $D$  – постійна ґратки,  $\bar{n}_{\text{eff}}$  – ефективний показник заломлення для падаючої хвилі, який може бути обчислений за формулою Максвелла-Гарнетта [104,105],  $m$  – ціле число, що відповідає порядку розглянутого дифракційного максимуму.

У загальному випадку характеристики ППР також залежать від структурних властивостей досліджуваного зразка, від кута падіння та вибору поляризації падаючого випромінювання [103].

### 1.2.3 Дослідження наночастинок у складі щільних масивів на підкладках

Подальше збільшення концентрації наночастинок у складі структури призводить до утворення контактів між ними і, отже, усупільнення електронної густини. Ефективність поглинання подібної невпорядкованої структури стає подібною до оптичних властивостей ланцюжків і агломератів наночастинок. Більше того, оптичні властивості невпорядкованих масивів подібні незалежно від форми його наночастинок, з яких вони складаються (рис. 1.18) [107,108].



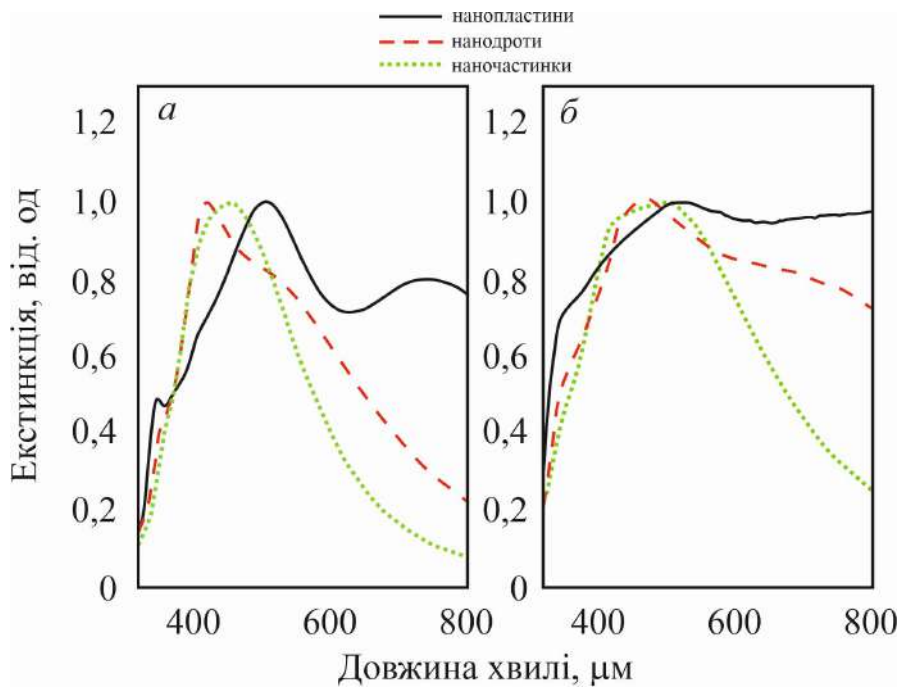
*a* – мікроскопічні зображення срібних нанопластинок;

*б* – мікроскопічні зображення срібних нанопроводів;

*в* – мікроскопічні зображення срібних наночастинок.

Рисунок 1.18 – Мікроскопічні зображення срібних наноструктур різної форми [108]

Зовнішній вигляд спектрів екстинкції зі збільшенням коефіцієнта заповнення масиву наноб'єктами стає все більше схожим на аналогічний спектр для кристалічного матеріалу (рис. 1.19). Проте, відмінною рисою подібної дисперсної системи залишається слабковиражений ППР [106,107], поява якого залежить тільки від форми та розмірів складових масив наноб'єктів. Цікаво відзначити, що обговорювані зразки масивів неупорядкованих наноб'єктів, поміщені в прозору матрицю силікагелю, виявляють нелінійні оптичні властивості, що було продемонстровано на довжинах хвиль 532 і 1064 нм у роботах [108].



*a* – спектри екстинкції наноб’єктів у складі колоїдного розчину;  
*б* – спектри екстинкції наноб’єктів на поверхні скляної підкладки у матриці  
 силікагелю.

Рисунок 1.19 – Спектри екстинкції наноб’єктів, зображених на рис. 1.18

[108]

## 2 СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНСАМБЛЮ МЕТАЛЕВИХ НАНООСТРІВЦІВ НА ДІЕЛЕКТРИЧНІЙ ПІДКЛАДЦІ

### 2.1 Методи визначення кольорів за оптичними спектрами

Відомо, що колір є здатністю ока людини розрізняти світлове випромінювання різних довжин хвиль. Експерименти, проведені у першій третині ХХ ст., дозволили розробити систему СІЕ  $XYZ$  (прийняту в 1931 році Міжнародною комісією з освітлення СІЕ). У вказаній системі кожен колір заданий набором відповідних чисел. Ця система базується на використанні трьох стимулів  $X, Y, Z$ , які однозначно описують відчуття кольору.

Проте на практиці в колориметрії використовують систему СІЕ  $xY$ , яка є похідною від СІЕ  $XYZ$ :

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{X + Y + Z}; \\y &= \frac{Y}{X + Y + Z}; \\Y &= Y,\end{aligned}\tag{2.1}$$

де  $x, y$  – координати колірності;  $Y$  – коефіцієнт яскравості, а стимули системи СІЕ  $XYZ$  розраховуються за формулами

$$\begin{aligned}X &= k \sum_{380}^{780} \phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda; \\Y &= k \sum_{380}^{780} \phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda; \\Z &= k \sum_{380}^{780} \phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda.\end{aligned}\tag{2.2}$$

У співвідношеннях (2.2)

$$k = \frac{100}{\sum_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda} \quad (2.3)$$

– коефіцієнт нормування;  $\phi(\lambda) = \mathcal{R}(\lambda) \mathcal{S}(\lambda)$ ;  $\mathcal{R}(\lambda)$  – коефіцієнт відбивання;  $\mathcal{S}(\lambda)$  – спектр випромінювання джерела;  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  – так звані функції відповідності кольорів.

Надалі використовуватимемо для розрахунків спектр стандартного джерела світла  $D_{65}$ , аналогічного денному світлу, а функції  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  і  $\mathcal{S}(\lambda)$  табулюються, як правило, з інтервалом 5 нм.

## 2.2 Оптичні властивості ансамблю металевих напівсфер на діелектричній підкладці

Таким чином, задача зводиться до визначення коефіцієнта відбивання  $\mathcal{R}(\lambda)$ , який буде різним для різних систем наночастинок.

Будемо виходити із загального співвідношення для коефіцієнта відбивання

$$\mathcal{R}(\lambda) = \frac{(1-b^2) \operatorname{sh} ad}{\operatorname{sh} ad + b^2 \operatorname{ch} ad}, \quad (2.4)$$

де  $d$  – товщина зразка (оскільки в роботі розглядаються напівсферичні металеві частинки на діелектричній підкладці, то  $d = R$ ,  $R$  – радіус напівсфери), а

$$\begin{aligned}
 a &= \sqrt{\mathcal{K}(\mathcal{K} + 2\mathcal{S})}, \\
 b &= \sqrt{\frac{\mathcal{K}}{\mathcal{K} + 2\mathcal{S}}}.
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

У формулах (2.5) коефіцієнти поглинання та розсіювання

$$\mathcal{K} = \frac{\langle C_{\text{abs}} \rangle}{V}, \quad \mathcal{S} = \frac{3}{8} \frac{\langle C_{\text{sca}} \rangle}{V} (1 - \overline{\cos\theta}),
 \tag{2.6}$$

де  $V = \frac{2}{3}\pi R^3$  – об'єм напівсферичної наночастинки;  $\overline{\cos\theta} = \frac{1}{2}$  – для ансамблю

наночастинок, що розглядаються.

Усереднені за ансамблем перерізи поглинання та розсіювання визначаються співвідношеннями

$$\langle C_{\text{abs}} \rangle = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_m} \langle \text{Im}\alpha \rangle, \quad \langle C_{\text{sca}} \rangle = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \epsilon_m^2 |\langle \alpha \rangle|^2,
 \tag{2.7}$$

а дійсна, уявна частини та модуль усередненої поляризованості мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 \langle \text{Re}\alpha \rangle &= \frac{1}{3} \text{Re}(2\alpha_{\perp} + \alpha_{\parallel}); \\
 \langle \text{Im}\alpha \rangle &= \frac{1}{3} \text{Im}(2\alpha_{\perp} + \alpha_{\parallel}); \\
 |\langle \alpha \rangle|^2 &= \frac{1}{3} (2|\alpha_{\perp}|^2 + |\alpha_{\parallel}|^2).
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

У формули (2.8) входять діагональні компоненти тензора поляризованості напівсферичної металевої наночастинки на діелектричній підкладці, які даються виразами [109]:

$$\alpha_{\perp(\parallel)} = \frac{3\kappa_{\perp(\parallel)}\epsilon_m V \bar{\alpha}_{\perp(\parallel)}}{\kappa_{\perp(\parallel)} - \frac{\epsilon_d - \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m} \bar{\alpha}_{\perp(\parallel)}}, \quad (2.9)$$

де  $\kappa_{\perp} = 4$ ,  $\kappa_{\parallel} = 8$ ;  $\epsilon_d$  і  $\epsilon_m$  – діелектричні проникності підкладки та оточуючого середовища, а діагональні компоненти тензора дипольної поляризованості напівсферичної наночастинки

$$\bar{\alpha}_{\perp(\parallel)}(\lambda) = \frac{\epsilon^{\perp(\parallel)}(\lambda) - \epsilon_m}{\epsilon_m + \mathcal{L}_{\perp(\parallel)}(\epsilon^{\perp(\parallel)}(\lambda) - \epsilon_m)}, \quad (2.10)$$

$$\text{а } \mathcal{L}_{\perp} = \frac{1}{4} \text{ і } \mathcal{L}_{\parallel} = \frac{1}{2}.$$

У формулі (2.10) компоненти діелектричного тензора за умови справедливості моделі Друде

$$\epsilon^{\perp(\parallel)}(\lambda) = \epsilon^{\infty} - \frac{\lambda}{\lambda_p^2 \left( 1 + i \frac{\lambda}{2\pi c} \gamma_{\text{eff}}^{\perp(\parallel)} \right)}, \quad (2.11)$$

де  $\lambda_p$  – довжина хвилі об'ємних плазмонів;  $\epsilon^{\infty}$  – внесок кристалічної ґратки в діелектричну функцію, а ефективна швидкість релаксації

$$\gamma_{\text{eff}}^{\perp(\parallel)} = \gamma_{\text{bulk}} + \gamma_s^{\perp(\parallel)} + \gamma_{\text{rad}}^{\perp(\parallel)}, \quad (2.12)$$

$\gamma_{\text{bulk}} = \text{const}$  – швидкість об'ємної релаксації, а швидкості поверхневої релаксації та радіаційного загасання

$$\gamma_s^{\perp(\parallel)} = \mathcal{L}_{\perp(\parallel)} \frac{v_F}{\ell_{\perp(\parallel)}}; \quad (2.13)$$

$$\gamma_{\text{rad}}^{\perp(\parallel)} = \frac{1}{24\pi} \frac{V}{\sqrt{\epsilon_m(2\epsilon_m + \epsilon^\infty)}} \left( \frac{2\pi}{\lambda_p} \right)^3 \left( \frac{\lambda}{\lambda_p} \right)^2 \frac{v_F}{\ell_{\perp(\parallel)}}, \quad (2.14)$$

а

$$\ell_{\perp} = 2R, \quad \ell_{\parallel} = R; \quad (2.15)$$

параметр втрати когерентності

$$\mathcal{L}_{\perp(\parallel)}(\lambda, R) = \frac{1}{4} \left( \frac{\lambda}{\lambda_p} \right)^2. \quad (2.16)$$

Надалі вирази (2.1), (2.4) і (2.6) з урахуванням (2.2), (2.3), (2.5), (2.7) – (2.16) використовуватимуться для одержання чисельних результатів.

### 2.3 Результати розрахунків та їх обговорення

Розрахунки проводилися для ансамблів напівсферичних наночастинок Au різного радіусу, що знаходяться на діелектричній підкладці з проникністю  $\epsilon_d = 2,25$  у середовищі з проникністю  $\epsilon_m = 2,3$ . Необхідні для розрахунку параметри Au наведено в табл. 2.1.



Таблиця 2.1 – Параметри Au для розрахунків

Метал	Параметр			
	$r_s / a_0$	$m^* / m_e$	$\epsilon^\infty$	$\gamma_{\text{bulk}}, 10^{13} \text{ c}^{-1}$
Au	3,01	0,99	9,84	3,45

На рис. 2.1 і 2.2 наведено частотні залежності дійсної та уявної частин, а також модулів діагональних компонент тензора поляризованості. Відмітимо якісну схожість відповідних кривих для  $\alpha_{\parallel}(\omega)$  і  $\alpha_{\perp}(\omega)$ , яка полягає в однаковій кількості екстремумів, знакозмінності дійсної частини та додатності уявної частини. Проте, між відповідними кривими є і кількісна різниця, яка, перш за все, полягає в тому, що екстремуми  $\text{Re}\alpha_{\parallel}$ ,  $\text{Im}\alpha_{\parallel}$  та  $|\alpha_{\parallel}|$  досягаються за менших частот, ніж екстремуми  $\text{Re}\alpha_{\perp}$ ,  $\text{Im}\alpha_{\perp}$  та  $|\alpha_{\perp}|$ . Оскільки  $\max\{\text{Im}\alpha_{\perp(\parallel)}\}$  відповідають частотам поперечного (поздовжнього) поверхневого плазмонного резонансу, то звідси випливає, що  $\omega_{sp}^{\parallel} < \omega_{sp}^{\perp}$ , тобто поздовжній поверхневий плазмонний резонанс збуджується на менших частотах, ніж поперечний.

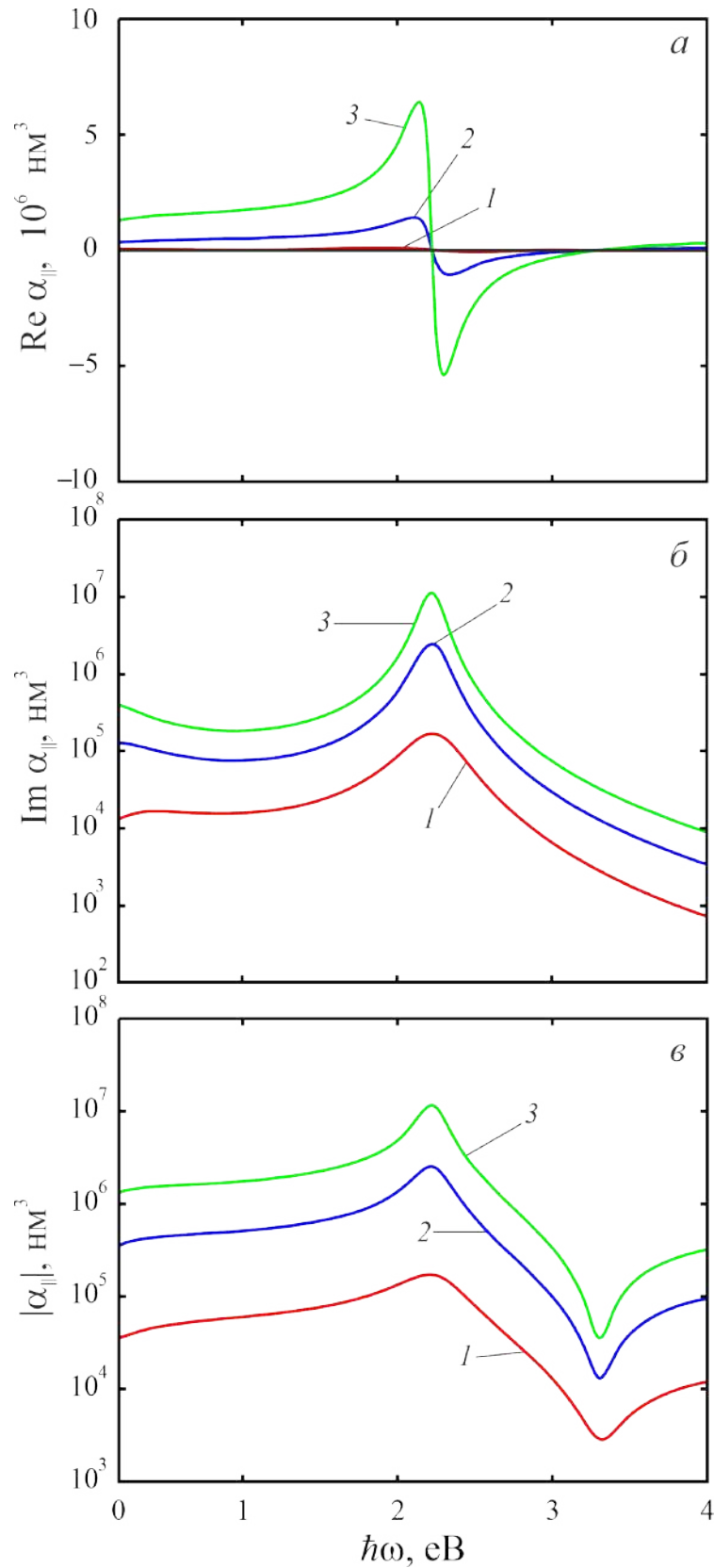
Вказаний факт підтверджується наведеними на рис. 2.3 кривими частотних залежностей дійсної, уявної частин, а також модуля усередненої поляризованості. Так, криві  $\text{Im}\langle\alpha\rangle$  мають два максимуми, які відповідають поздовжньому та поперечному поверхневим плазмонним резонансом у відповідності до співвідношення (2.8). Стосовно  $\max\{\text{Im}\langle\alpha\rangle\}$  також потрібно зазначити, що вони стають більш вираженими у випадку на півсфер більшого радіусу, тоді як розщеплення плазмонних резонансів ( $\Delta\omega_{sp} = \omega_{sp}^{\perp} - \omega_{sp}^{\parallel}$ ) практично не змінюється.

Оскільки згідно з (2.7)  $\langle C_{\text{abs}} \rangle \sim \text{Im}\langle\alpha\rangle$ , а  $\langle C_{\text{sca}} \rangle \sim |\langle\alpha\rangle|^2$ , то криві частотних залежностей усереднених перерізів поглинання і розсіювання (рис. 2.4) якісно схожі з відповідними кривими для  $\text{Im}\langle\alpha\rangle$  та  $|\langle\alpha\rangle|$ . В зв'язку з

тим, що за величиною  $\langle C_{\text{abs}} \rangle$  і  $\langle C_{\text{sca}} \rangle$  приблизно однакові, при дослідженнях необхідно враховувати як поглинання, так і розсіювання.

На рис. 2.5 зображено частотні залежності коефіцієнтів поглинання і розсіювання ансамблем металевих напівсфер на підкладці. Результати розрахунків свідчать про те, що поглинання переважає в ансамблі напівсфер із малим радіусом практично в усьому досліджуваному спектральному діапазоні, крім області максимумів, в той час як коефіцієнт розсіювання збільшується зі збільшенням радіусу напівсфер.

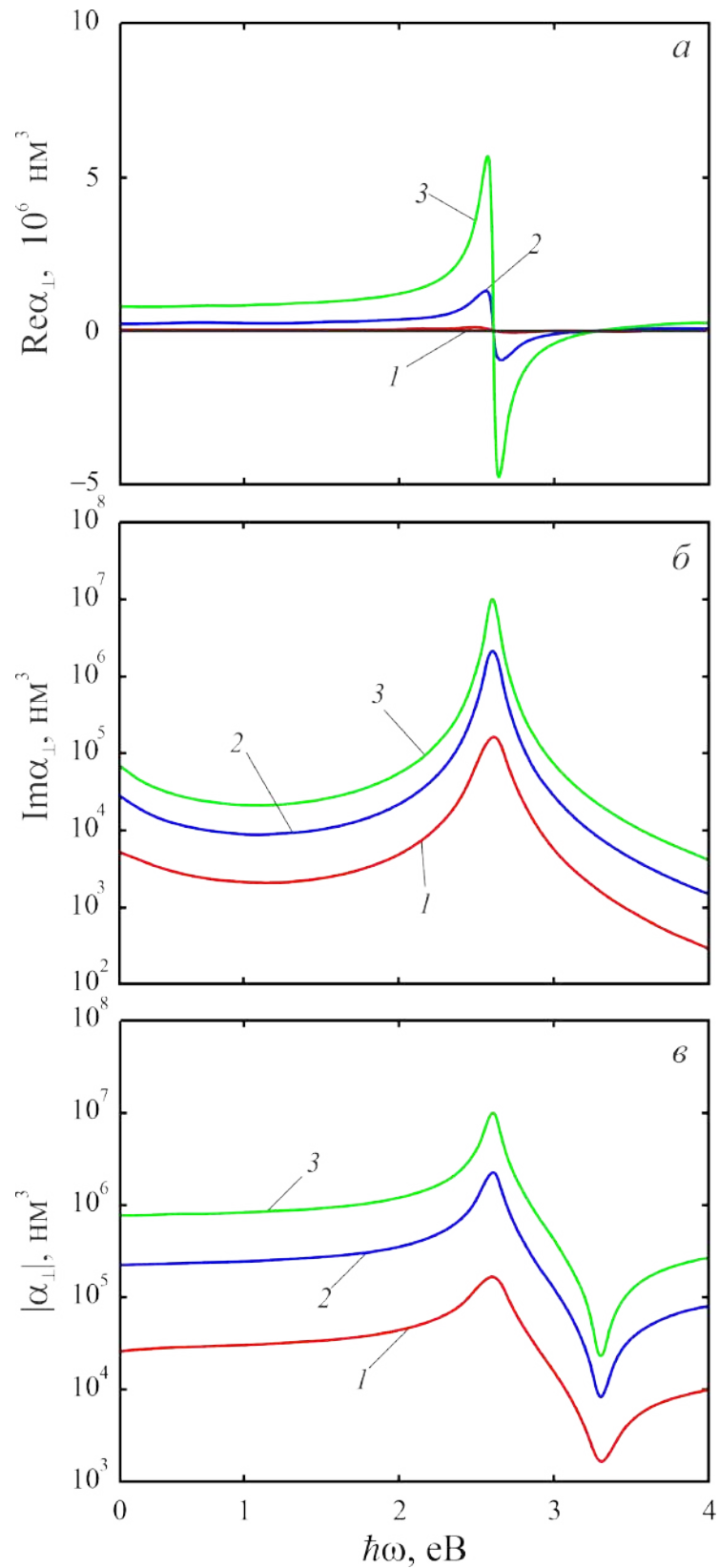
Частотні залежності коефіцієнта відбиття продемонстровано на рис. 2.6. Відмітимо, що  $\mathcal{R}(\omega)$  при однакових частотах більше для ансамблів із наносферами більшого радіусу. В зв'язку з цим для отримання яскравих і насичених кольорів доцільно використовувати ансамблі з достатньо великими напівсферами.



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

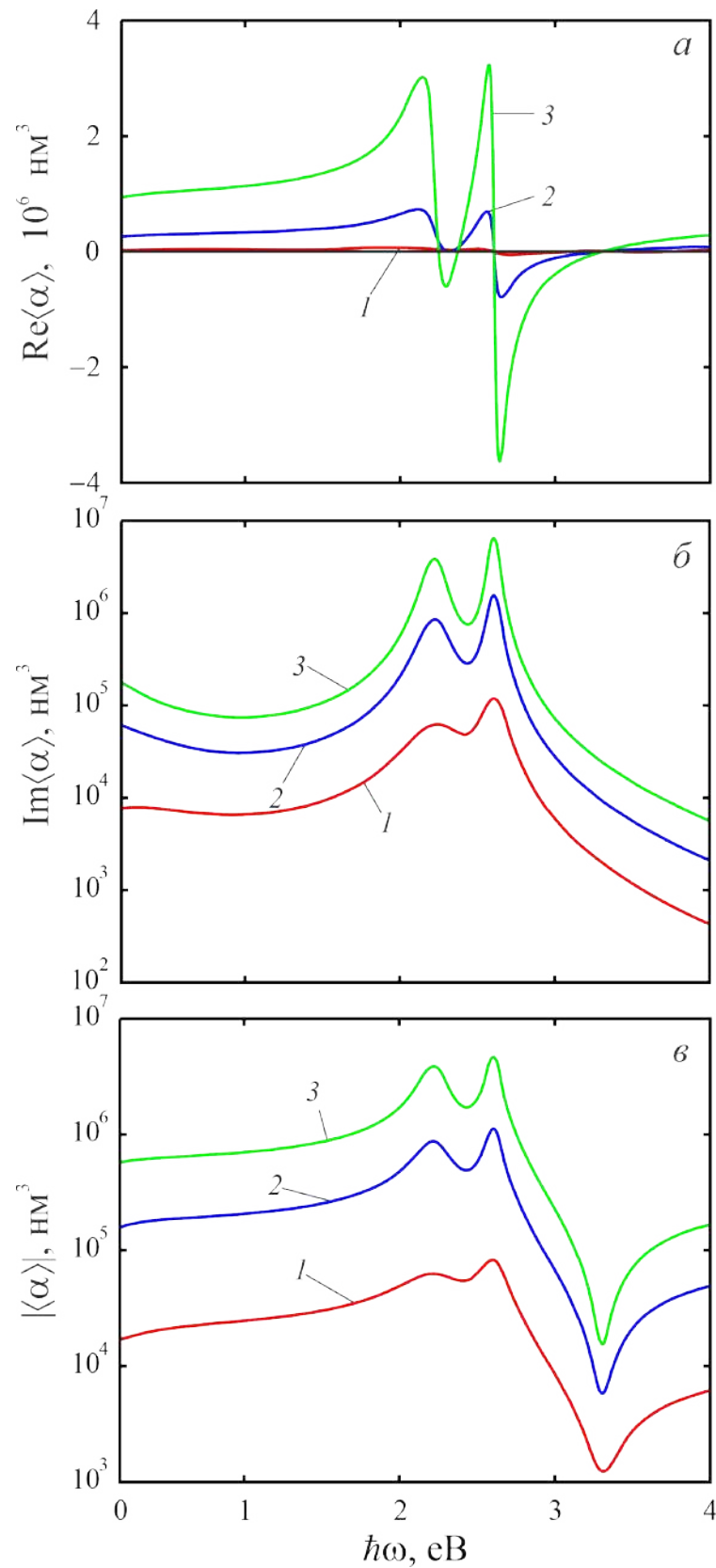
1 –  $R = 10$  нм;    2 –  $R = 20$  нм;    3 –  $R = 30$  нм.

Рисунок 2.1 – Частотні залежності поздовжньої компоненти тензора поляризованості наностріпців Au на скляній підкладці



$a$  – дійсна частина;     $б$  – уявна частина;     $в$  – модуль;  
 $1$  –  $R = 10$  нм;     $2$  –  $R = 20$  нм;     $3$  –  $R = 30$  нм.

Рисунок 2.2 – Частотні залежності поперечної компоненти тензора поляризованості наностріпців Au на скляній підкладці

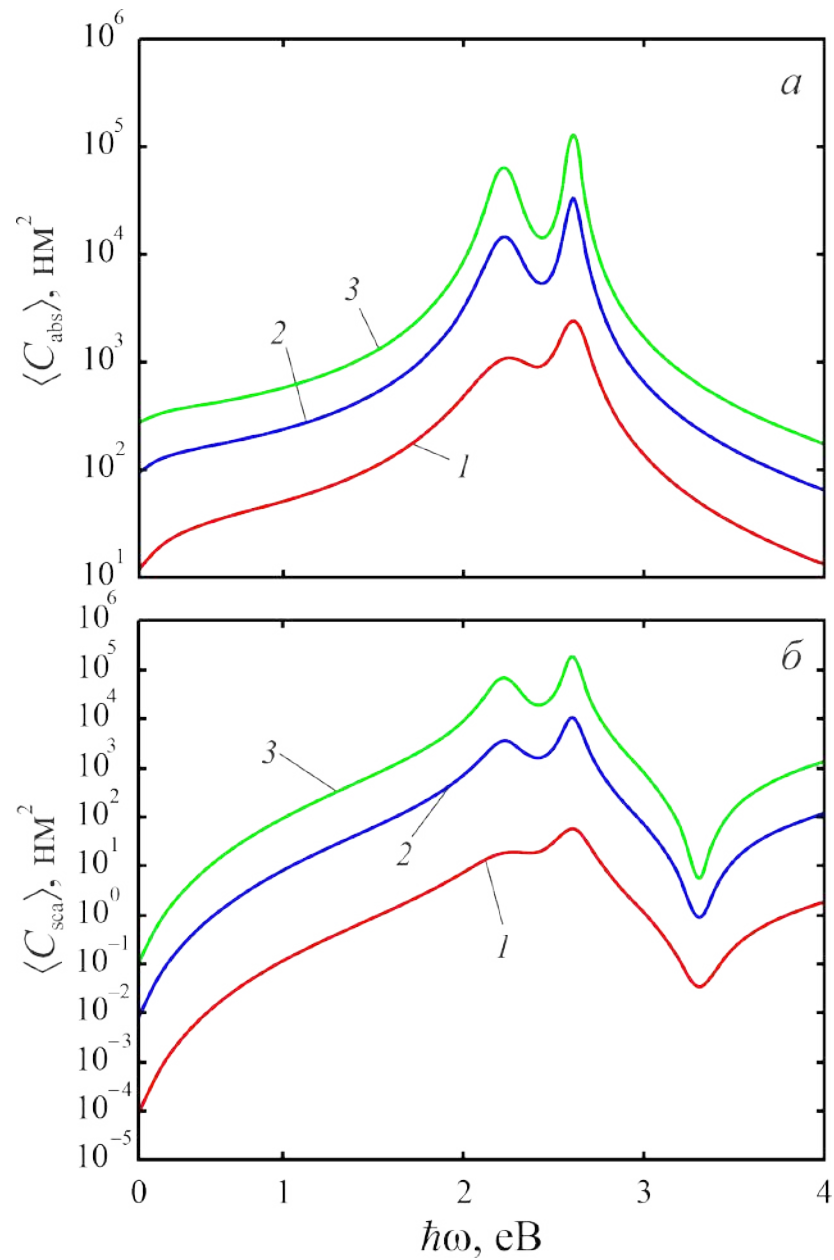


*a* – дійсна частина;    *б* – уявна частина;    *в* – модуль:

*1* –  $R = 10$  нм;    *2* –  $R = 20$  нм;    *3* –  $R = 30$  нм.

Рисунок 2.3 – Частотні залежності усередненої поляризованості нанострівців

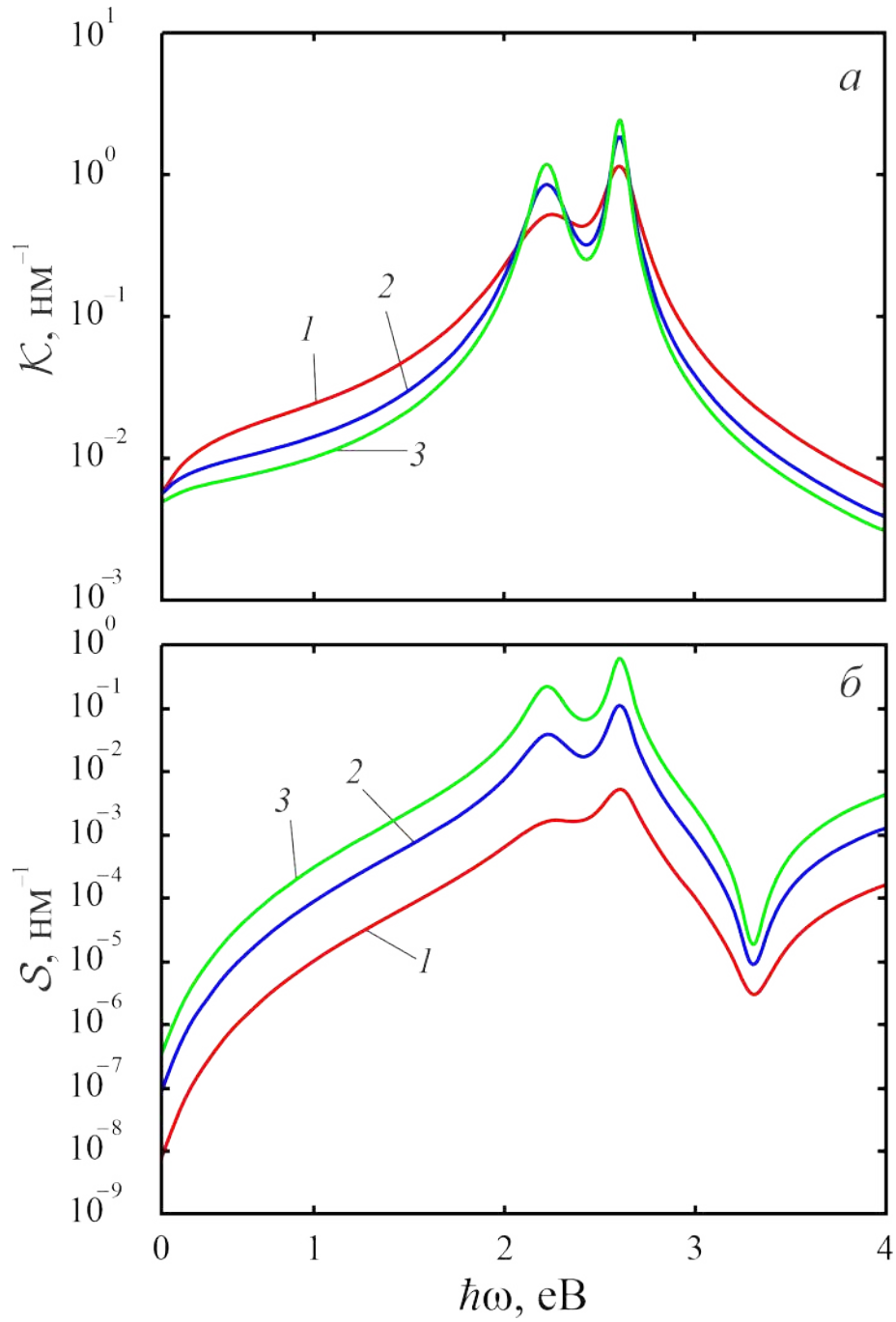
Au на скляній підкладці



*a* – переріз поглинання;      *б* – переріз розсіювання:

1 –  $R = 10$  нм;    2 –  $R = 20$  нм;    3 –  $R = 30$  нм.

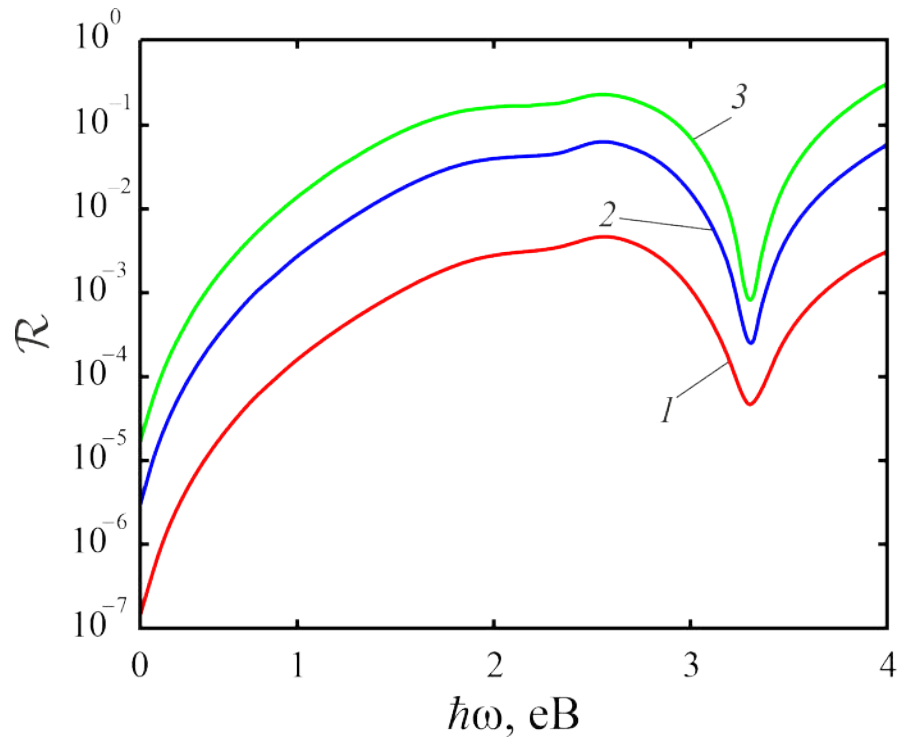
Рисунок 2.4 – Частотні залежності перерізів поглинання і розсіювання нанострівців Au на скляній підкладці



$a$  – коефіцієнт поглинання;       $б$  – коефіцієнт розсіювання:

$1$  –  $R = 10$  нм;     $2$  –  $R = 20$  нм;     $3$  –  $R = 30$  нм.

Рисунок 2.5 – Частотні залежності коефіцієнтів поглинання і розсіювання нанострівців Au на скляній підкладці



1 –  $R = 10$  нм;    2 –  $R = 20$  нм;    3 –  $R = 30$  нм.

Рисунок 2.6 – Частотні залежності коефіцієнта відбивання нанострівців Au на скляній підкладці



## ВИСНОВКИ

Одержано співвідношення для розрахунку коефіцієнтів поглинання, розсіювання та відбивання ансамблем золотих напівсферичних наночастинок різних розмірів на діелектричній підкладці.

Показано, що поздовжній поверхневий плазмонний резонанс збуджується за менших частот, ніж поперечний, а різниця частот цих резонансів практично не залежить від розміру напівсферичних наночастинок.

Встановлено, що оскільки величини перерізів поглинання і розсіювання мають однаковий порядок, то необхідно враховувати як поглинання, так і розсіювання.

Доведено, що для ансамблів із відносно малими напівсферами переважає поглинання, тоді як у випадку відносно великих наносфер домінує розсіювання.

Продемонстровано доцільність використання ансамблів із відносно великими наносферами для отримання яскравих кольорів, оскільки для вказаних ансамблів коефіцієнт відбивання максимальний.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. **Osipov, V.V.** Laser synthesis of nanopowders [Text] / Y.A. Kotov, M.G. Ivanov, O.M. Samatov, V.V. Lisenkov, V.V. Platonov, A.M. Murzakaev, A.I. Medvedev, E.I. Azarkevich // Laser Synthesis of Nanopowders. Laser Phys. – 2006. – V. 16. – P. 116–125.
2. **Kotov, Yu.A.** The Electrical Explosion of Wire: A Method for the Synthesis of Weakly Aggregated Nanopowders [Text] / Yu.A. Kotov // Nanotechnol Russia. – 2009. – V. 4, – P. 415–424.
3. **Vollath, D.** Plasma Synthesis of Nanopowders [Text] / D. Vollath // J Nanopart Res –2008. – V. 10. – P 39.
4. **Kruis, F.E.** Synthesis of Nanoparticles in the Gas Phase for Electronic, Optical and Magnetic Applications—a Review [Text] / H. Fissan, A. Peled, // Journal of Aerosol Science. – 1998. – V. 29. – P. 511–535.
5. **Zeng, H.** Nanomaterials via Laser Ablation/Irradiation in Liquid: A Review [Text] / X.-W. Du, S.C. Singh, S.A. Kulinich, S. Yang, J. He, W. Cai, // Advanced Functional Materials. – 2012. – V. 22. – P. 1333–1353.
6. **Miller, J.C.** Laser Ablation: Principles and Applications [Text] / J.C. Miller // Springer Science & Business Media. – 2013. – V. 1. – P. 33-75.
7. **Mafuné, F.** Formation and Size Control of Silver Nanoparticles by Laser Ablation in Aqueous Solution [Text] / J. Kohno, Y. Takeda, T. Kondow, H. Sawabe, // J. Phys. Chem. B. – 2000. – V. 104. – P. 9111–9117.
8. **Котов, Ю.А.** Электрический взрыв проволоки – метод получения слабоагрегированных нанопорошков [Текст] / Ю.А. Котов // Российские Нанотехнологии. – 2009. –Т. 4. – Н 1-2. – С. 40-49.
9. **Назаренко, О.Б.** Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение [Текст] / О.Б. Назаренко // Под Ред. А.П. Ильина издательство ТПУ, – 2005. – С. 35-36.
10. **Kotov, Y.A.** Electric Explosion of Wires as a Method for Preparation

of Nanopowders [Text] / Y.A. Kotov // Journal of Nanoparticle Research. – 2003. – V. 5. – P. 539–550.

11. **Kotov, Y.A.** Producing Al and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanopowders by Electrical Explosion of Wire [Text] / Y.A. Kotov, E.I. Azarkevich, I.V. Beketov, T.M. Demina, A.M. Murzakaev, O.M. Samatov // In Proceedings of the Key engineering materials. – 1997. – P. 173–176.

12. **Ilves, V.** The Use of a Pulsed Electron Beam for Production of Nanopowders of Oxides [Text] / V. Ilves, Yu.A. Kotov, S. Sokovnin, S.K. Rhee // Ross. Nanotekhnol. – 2007. – V. 2. – P. 96–101.

13. **Ramsay, J.D.F.** Ultrafine Oxide Powders Prepared by Electron Beam Evaporation [Text] / J.D.F. Ramsay, R.G. Avery // J Mater Sci. – 1974. – V. 9. – P. 1681–1688.

14. **Бардаханов, С.П.** Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении [Текст] / С.П. Бардаханов, А.И. Корчагин, Н.К. Куксанов, А.В. Лаврухин // Доклады Академии Наук. – 2006, – P. 409.

15. **Fadeev, S.N.** Technological Applications of BINP Industrial Electron Accelerators with Focused Beam Extracted into Atmosphere [Text] / S.N. Fadeev, M.G. Golkovski, A.I. Korchagin, N.K. Kuksanov, A.V. Lavruhin, S.E. Petrov, R.A. Salimov, A.F. Vaisman // Radiation Physics and Chemistry. – 2000. – V. 57. – P. 653–655.

16. **Sokovnin, S.Yu.** Production of Nanopowders Using Pulsed Electron Beam [Text] Ferroelectrics – 2012. – P. 43.

17. **Schmidt-Ott, A.** Spark Ablation: Building Blocks for Nanotechnology [Text] / A. Schmidt-Ott // CRC Press. – 2019. – V 1. – P. 18.

18. **Ремпель, А.А.** Валеева, А.А. Материалы и методы нанотехнологий: учебное пособие [Текст] / А.А. Ремпель, А.А. Валеева // Издательство Уральского университета. – 2015. ISBN 978-5-7996-1401-0.

19. **Sattler, K.D.** Handbook of Nanophysics: Nanoparticles and Quantum Dots [Text] / K.D. Sattler // CRC Press. – 2016. – V. 12.

20.**Scheeline, A.** Direct Solids Elemental Analysis: Pulsed Plasma Sources Available [Text] / A. Scheeline, D.M. Coleman // *Anal. Chem.* – 1987. – V. 19. – P 1185A-1196A.

21.**Mylnikov, D.** Measuring and Optimization of Energy Transfer to the Interelectrode Gaps during the Synthesis of Nanoparticles in a Spark Discharge [Text] / D. Mylnikov, A. Efimov, V. Ivanov // *Aerosol Science and Technology.* – 2019. – V. 53. – P. 1393–1403.

22.**Reinmann, R.** Temporal Investigation of a Fast Spark Discharge in Chemically Inert Gases [Text] / R. Reinmann, M. Akram // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1997. – V. 30. – P. 1125–1134.

23.**Evans, D.E.** The Generation and Characterisation of Elemental Carbon Aerosols for Human Challenge Studies [Text] / D.E. Evans, R.M. Harrison, J.G. Ayres // *Journal of Aerosol Science.* – 2003. – V. 34. – P. 1023–1041.

24.**Byeon, J.H.** Spark Generation of Monometallic and Bimetallic Aerosol Nanoparticles [Text] / J.H. Byeon, J.H. Park, J. Hwang // *Journal of Aerosol Science.* – 2008. – V. 39. – P. 888–896.

25.**Vons, V.A.** Silicon Nanoparticles Produced by Spark Discharge [Text] / V.A. Vons, L.C.P.M. de Smet, D. Munao, A. Evirgen, E.M. Kelder, A. Schmidt-Ott // *Nanopart Res.* – 2011. – V. 13. – P. 4867.

26.**Lizunova, A.A.** Synthesis of Ge and Si Nanoparticles by Spark Discharge [Text] / A.A. Lizunova, D.A. Mylnikov, A.A. Efimov, V.V. Ivanov // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2017. – V. 917. – P. 31-36.

27.**Mardanian, M.** Synthesis of Colloidal CuInSe<sub>2</sub> Nanoparticles by Electrical Spark Discharge in Liquid [Text] / M. Mardanian, A.A. Nevar, M. Nedel'ko, N.V. Tarasenko // *Eur. Phys. J. D.* – 2013. – V. 67. – P. 208.

28.**Lee Dong-joon** Highly Efficient Synthesis of Semiconductor Nanoparticles Using Spark Discharge [Text] / Lee Dong-joon // Thesis, Graduate School, Seoul National University. – 2018. – P. 45.

29.**Tseng, K.-H.** Fabricating TiO<sub>2</sub>nanocolloids by Electric Spark Discharge Method at Normal Temperature and Pressure [Text] / K.-H. Tseng,

T.S. Cheng // *Nanotechnology*. – 2017. – V. 28. – P. 465701.

30. **Takao, Y.** Preparation of Oxide Superconductive Composite by an Electrostatic Mixing Process [Text] / Y. Takao, M. Awano, Y. Kuwahara, Y. Murase // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 1996. – V. 31. – P. 131–133.

31. **Chadda, S.** Synthesis of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\gamma}$  and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$  by Aerosol Decomposition [Text] / S. Chadda, T.L. Ward, A. Carim, T.T. Kostas, K. Ott, D. Kroeger // *Journal of Aerosol Science*. – 1991. – V. 22. – P. 601–616.

32. **Efimov, A.A.** Controlled Focusing of Silver Nanoparticles Beam to Form the Microstructures on Substrates [Text] / A.A. Efimov, G.N. Potapov, A.V. Nisan, V.V. Ivanov // *Results in Physics*. – 2017. – V. 7. – P. 440–443.

33. **Volkening, F.A.** Characterization of Nanocrystalline Palladium for Solid State Gas Sensor Applications [Text] / F.A. Volkening, M.N. Naidoo, G.A. Candela, R.L. Holtz, V. Provenzano // *Nanostructured Materials*. – 1995. – V. 5. – P. 373–382.

34. **Ivanov, V.V.** Synthesis of Nanoparticles in a Pulsed- Periodic Gas Discharge and Their Potential Applications [Text] / V.V. Ivanov, A.A. Efimov, D.A. Myl'nikov, A.A. Lizunova // *Russ. J. Phys. Chem.* – 2018. – V. 92. – P. 607–612.

35. **Mohammed, A.M.** Fabrication and Characterization of Gold Nano Particles for DNA Biosensor Applications [Text] / A.M. Mohammed // *Chinese Chemical Letters*. – 2016. – V. 27. – P. 801–806.

36. **Khabarov, K.M.** Laser Sintering of Silver Nanoparticles Deposited by Dry Aerosol Printing [Text] / K.M. Khabarov, D.V. Korniyushin, B.I. Masnaviev, D.N. Tuzhilin, A.A. Efimov, D.L. Saprykin, V.V. Ivanov // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019. – P. 1410.

37. **Khabarov, K.** The Influence of Laser Sintering Modes on the Conductivity and Microstructure of Silver Nanoparticle Arrays Formed by Dry Aerosol Printing [Text] / K. Khabarov, D. Korniyushin, B. Masnaviev, D. Tuzhilin, D. Saprykin, A. Efimov, V. Ivanov // *Applied Sciences*. – 2020. – V. 10. – P. 246.

38. **Feng, J.** Toward Industrial Scale Synthesis of Ultrapure Singlet Nanoparticles with Controllable Sizes in a Continuous Gas-Phase Process [Text] / J. Feng, G. Biskos, A. Schmidt-Ott // *Scientific Reports*. – 2015. – V. 5. – P. 15788.

39. **Tabrizi, N.S.** Ullmann, M. Vons, V.A. Lafont, U. Schmidt-Ott, A. Generation of Nanoparticles by Spark Discharge [Text] / N.S. Tabrizi, M. Ullmann, V.A. Vons, U. Lafont, A. Schmidt-Ott // *J Nanopart Res*. – 2008. – V. 11. – P. 315.

40. **Ivanov, V.V.** High-Efficiency Synthesis of Nanoparticles in a Repetitive Multigap Spark Discharge Generator [Text] / V.V. Ivanov, A.A. Efimov, D.A. Mylnikov, A.A. Lizunova, A.V. Bagazeev, I.V. Beketov, S.V. Shcherbinin // *Tech. Phys. Lett.* – 2016. – V. 42. – P. 876–878.

41. **Lizunova, A.** Effects of Temperature on the Morphology and Optical Properties of Spark Discharge Germanium Nanoparticles [Text] / A. Lizunova, A. Mazharenko, B. Masnaviev, E. Khramov, A. Efimov, A. Ramanenka, I. Shuklov, V. Ivanov // *Materials*. – 2020. – V. 13. – P. 4431.

42. **Yang, F.** Experimental Analysis of Normal Spark Discharge Voltage and Current with a RC-Type Generator in Micro-EDM [Text] / F. Yang, M. Bellotti, H. Hua, J. Yang, J. Qian, D. Reynaerts, // *Int J Adv Manuf Technol*. – 2018. – V. 96. – P. 2963–2972.

43. **Kohut, A.** The Effect of Circuit Resistance on the Particle Output of a Spark Discharge Nanoparticle Generator [Text] / A. Kohut, L.P. Villy, T. Ajtai, Zs. Geretovszky, G. Galbács // *Journal of Aerosol Science*. – 2018, – V. 118, – P. 59–63.

44. **Lafont, U.** Synthesis of Nanoparticles of Cu, Sb, Sn, SnSb and Cu<sub>2</sub>Sb by Densification and Atomization Process [Text] / U. Lafont, L. Simonin, N.S. Tabrizi, A. Schmidt-Ott, E.M. Kelder // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2009. – V. 9. – P. 2546–2552.

45. **Ефимов, А.А.** Морфология и концентрация наночастиц, получаемых в газоразрядном генераторе аэрозолей, в зависимости от

материалов электродов [Текст] / А.А. Лизунова, М.Н. Уразов, С.В. Лисовский, В.В. Иванов // Естественные И Технические Науки. – 2013.

46. **Vons, V.A.** Low- Temperature Hydrogen Desorption and the Structural Properties of Spark Discharge Generated Mg Nanoparticles [Text] / V.A. Vons, A. Anastasopol, W.J. Legerstee, F.M. Mulder, S.W.H. Eijt, A. Schmidt-Ott, // Acta Materialia. – 2011. – V. 59. – P. 3070–3080.

47. **Horvath, H.** A Low-Voltage Spark Generator for Production of Carbon Particles [Text] / H. Horvath, M. Gangl // Journal of Aerosol Science. – 2003. – V. 34. – P. 1581–1588.

48. **Byeon, J.H.** Production of Carbonaceous Nanostructures from a Silver-Carbon Ambient Spark [Text] / J.H. Byeon, J.-W. Kim // Appl. Phys. Lett. – 2010. – V. 96. – P. 153102.

49. **Khabarov, K.** Influence of Ag Electrodes Asymmetry Arrangement on Their Erosion Wear and Nanoparticle Synthesis in Spark Discharge [Text] / K. Khabarov, M. Urazov, A. Lizunova, E. Kameneva, A. Efimov, V. Ivanov // Applied Sciences 2021. – V. 11. – P. 4147.

50. **Meuller, B. O.** Review of Spark Discharge Generators for Production of Nanoparticle Aerosols [Text] / M.E. Messing, D.L.J. Engberg, A.M. Jansson, L.I.M. Johansson, S.M. Norlén, N. Tureson, K. Deppert // Aerosol Science and Technology. – 2012. V 46. – P. 1256–1270.

51. **Mesyats, G. A.** Pulsed Power [Text] / G. A. Mesyats // Springer Science & Business Media. – 2007. – P. 174-188.

52. **Ефимов, А. А.** Получение аэрозольных наночастиц в многоазорном газоразрядном генераторе [Текст] / А.А. Ефимов, В.В. Иванов, А.В. Багазеев, И.В. Бекетов, И.А. Волков, С.В. Щербинин // Письма в ЖТФ. – 2013. – 39 с.

53. **Иванов, В.В.** Высокопроизводительное получение наноразмерных частиц в импульсно-периодическом многоазорном газоразрядном генераторе [Текст] / В. В. Иванов, А.А. Ефимов, Д.А. Мыльников, А.А. Лизунова, А.В. Багазеев, И.В. Бекетов, С.В. Щербинин // Письма в ЖТФ. –

2016. – 42 c.

54. **Ahmad, S.** Gas Phase Synthesis of Metallic and Bimetallic Catalyst Nanoparticles by Rod-to-Tube Type Spark Discharge Generator [Text] / S. Ahmad, P. Laiho // *Journal of Aerosol Science*. – 2018. – V 123. – P. 208–218.

55. **Han, K.** Study of Pin-to-Plate Type Spark Discharge Generator for Producing Unagglomerated Nanoaerosols [Text] / K. Han // *Journal of Aerosol Science*. – 2012. – V 52. – P. 80–88.

56. **Trad, M.** Nanoparticles by Nanosecond-Pulsed Discharge in Liquid Nitrogen. Front [Text] / M. Trad // *Chem. Sci. Eng.* – 2019. – V 13. – P. 360–368.

57. **Megyeri, D.** Effect of Flow Geometry on the Nanoparticle Output of a Spark Discharge Generator [Text] / D. Megyeri, A. Kohut, Z. Geretovszky // *Journal of Aerosol Science*. – 2021. – V 154. – P. 105-125.

58. **Domaschke, M.** A Model for the Particle Mass Yield in the Aerosol Synthesis of Ultrafine Monometallic Nanoparticles by Spark Ablation [Text] / M. Domaschke // *Journal of Aerosol Science*. – 2018. – V 126. – P. 133–142.

59. **Obata, K.** Hybrid Micro-Stereo-Lithography by Means of Aerosol Jet Printing Technology [Text] / K. Obata // *Journal of Aerosol Science*. – 2018. – V 15. – P. 112–126.

60. **Saleh, M. S.** Three-Dimensional Microarchitected Materials and Devices Using Nanoparticle Assembly by Pointwise Spatial Printing [Text] / M.S. Saleh // *Science Advances*. – 2019. – V 3. – P. 163-177.

61. **Tait, J.G.** Uniform Aerosol Jet Printed Polymer Lines with 30 $\mu$ m Width for 140ppi Resolution RGB Organic Light Emitting Diodes [Text] / J.G. Tait // *Organic Electronics*. – 2015. – V 22. – P. 40–43.

62. **Gupta, A. A.** Aerosol Jet Printing for Printed Electronics Rapid Prototyping. In *Proceedings of the 2016 IEEE* [Text] / A.A. Gupta // *International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. – 2016. – V 65. – P. 866–869.

63. **Grunwald, I.** Surface Biofunctionalization and Production of



Miniaturized Sensor Structures Using Aerosol Printing Technologies [Text] / I. Grunwald // Biofabrication. – 2010. – V 2. – P. 141-146.

64. **Mahajan, A.** Optimization of Aerosol Jet Printing for High-Resolution, High-Aspect Ratio Silver Lines [Text] / A. Mahajan // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2013. – V 5. – P. 4856–4864.

65. **Zacharatos, F.** Selective Laser Sintering of Laser Printed Ag Nanoparticle Micropatterns at High Repetition Rates [Text] / Materials. – 2018. – V 11. – P. 21–42.

66. **Efimov, A. A.** Investigation of Sintering of Silver Lines on a Heated Plastic Substrate in the Dry Aerosol Jet Printing [Text] / A.A. Efimov // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – V 5. – P. 1124-1135, 081041.

67. **Efimov, A. A.** Dry Aerosol Jet Printing of Conductive Silver Lines on a Heated Silicon Substrate [Text] / A.A. Efimov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2018. – V 307. – P. 167-177.

68. **Israel, G. W.** High-Speed Beams of Small Particles [Текст] / G.W. Israel, S.K. Friedlander // Journal of Colloid and Interface Science. – 1967. – V 24. – P. 330–337.

69. **Akhatov, I. S.** Aerosol Focusing in Micro-Capillaries: Theory and Experiment [Text] / I.S. Akhatov // Journal of Aerosol Science. – 2008. – V 39. – P. 691–709.

70. **Akhatov, I. S.** Aerosol Flow through a Long Micro-Capillary: Collimated Aerosol Beam [Text] / I.S. Akhatov // Microfluid Nanofluid. – 2008. – V 5. – P. 215–224.

71. **Hoey, J. M.** A Review on Aerosol-Based Direct-Write and Its Applications for Microelectronics [Text] / J.M. Hoey // Journal of Nanotechnology. – 2012. – V 14. – P. 183-199.

72. **Protas, N.V.** Computer Simulation of Aerosol Nanoparticles Focusing and Deposition Process for Functional Microstructure Fabrication [Text] / N.V. Protas // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – V 17. – P. 1124-1135.

73. **Arsenov, P.V.** Effect of Methods of Changing in Focusing Ratio on

Line Geometry in Aerosol Jet Printing [Text] / P.V. Arsenov // Key Engineering Materials. – 2018. – V 779. – P. 159–164.

74. **Binder, S.** Analytical Investigation of Aerosol Jet Printing [Text] / S. Binder // Aerosol Science and Technology. – 2014. – V 48. – P. 924–929.

75. **Efimov, A. A.** Study of Aerosol Jet Printing with Dry Nanoparticles Synthesized by Spark Discharge [Text] / A.A. Efimov // J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – V 917. – P. 261-278.

76. **Muntean, A.** Generation of Copper, Nickel, and CuNi Alloy Nanoparticles by Spark Discharge [Text] / A. Muntean // J Nanopart Res. – 2016. – V 18. – P. 229-237.

77. **Khan, S.** Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review [Text] / S. Khan // IEEE Sensors Journal. – 2015. – V 15. – P. 3164–3185.

78. **Kim, M.-K.** Laser Sintering of Inkjet-Printed Silver Nanoparticles on Glass and PET Substrates [Text] / M.-K. Kim // In Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Nanotechnology. – 2010. – V 56. – P. 520–524.

79. **Zenou, M.** Laser Sintering of Copper Nanoparticles [Text] / M. Zenou // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. – V 47. – P.124-138.

80. **Liu, S.** Laser Sintering of Liquid Metal Nanoparticles for Scalable Manufacturing of Soft and Flexible Electronics [Text] / S. Liu // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2018. – V 10. – P. 28232–28241.

81. **Mock, J. J.** Shape Effects in Plasmon Resonance of Individual Colloidal Silver Nanoparticles. The Journal of Chemical Physics. – 2002. – V 116. – P. 6755–6759.

82. **McFarland, A. D.** Single Silver Nanoparticles as Real-Time Optical Sensors with Zeptomole Sensitivity [Text] / A.D. McFarland // Nano Lett. – 2003. – V 3. – P. 1057–1062.

83. **Guerrero-Martínez, A.** Nanostars Shine Bright for You: Colloidal Synthesis, Properties and Applications of Branched Metallic Nanoparticles [Text] / A. Guerrero-Martínez // Current Opinion in Colloid & Interface Science. –

2011. – V 16. – P. 118–127.

84. **Pakravan, A.** Comparison Study on the Effect of Gold Nanoparticles Shape in the Forms of Star, Hollow, Cage, Rods, and Si-Au and Fe-Au Core-Shell on Photothermal Cancer Treatment [Text] / A. Pakravan // Photodiagnosis and Photodynamic Therapy. – 2021. – V 33. – P. 102-144.

85. **Philip, D.** Synthesis and Spectroscopic Characterization of Gold Nanoparticles. Spectrochimica Acta Part A [Text] / D. Philip // Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2008. – V 71. – P. 80–85.

86. **Kelly, K.L.** The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment [Text] / K.L. Kelly // J. Phys. Chem. B. – 2003. – V 107. – P. 668–677.

87. **Polte, J.** Fundamental Growth Principles of Colloidal Metal Nanoparticles – a New Perspective // CrystEngComm. – 2015. – V 17. – P. 6809–6830.

88. **Barcikowski, S.** Handbook of Laser Synthesis and Processing of Colloids (Second Edition) // CrystEngComm. – 2019. – V 18. – P. 1731-1739.

89. **Sosa, I. O.** Optical Properties of Metal Nanoparticles with Arbitrary Shapes. // J. Phys. Chem. – 2003. – V 107. – P. 6269–6275.

90. **Liu, M.** Optical Properties of Rodlike and Bipyramidal Gold Nanoparticles from Three-Dimensional Computations [Text] / M. Liu // Phys. Rev. B. – 2007. – V 76. – P. 235-428.

91. **Maier, S. A.** Plasmonics: Fundamentals and Applications // Springer Science & Business Media. – 2007. – V 16. – P. 173-188.

92. **Korotun, A. V.** Optical Properties of Spherical Metal Nanoparticles Coated with an Oxide Layer [Text] / A. V. Korotun // Opt. Spectrosc. – 2019. – V 127. – P. 1161–1168.

93. **Olobardi, S.** Optical Properties and Chemical Ordering of Ag–Pt Nanoalloys: A Computational Study [Text] / S. Olobardi // J. Phys. Chem. C. – 2019. – V 123. – P. 25482–25491.

94. **Mie, G.** Beiträge Zur Optik Trüber Medien, Speziell Kolloidaler

Metallösungen // Annalen der Physik. – 1908. – V 330. – P. 377–445.

95. **Tsoulos, V.** A Closer Look at the Physical and Optical Properties of Gold Nanostars: An Experimental and Computational Study [Text] / V.A. Tsoulos // *Nanoscale*. – 2017. – V 9. – P. 3766–3773.

96. **Nehl, C. L.** Shape-Dependent Plasmon Resonances of Gold Nanoparticles [Text] / C.L. Nehl // *J. Mater. Chem.* – 2008. – V 18. – P. 2415–2419.

97. **Lin, S.** One-Dimensional Plasmon Coupling by Facile Self-Assembly of Gold Nanoparticles into Branched Chain Networks [Text] / S. Lin // *Advanced Materials*. – 2005. – V 17. – P. 2553–2559.

98. **Girard, C.** Theoretical Near-Field Optical Properties of Branched Plasmonic Nanoparticle Networks [Text] / C. Girard // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – V 97. – P. 100-121.

99. **Shaimanov, A. N.** Plasmon Resonances in a Two-Dimensional Lattice of Metal Particles in a Dielectric Layer: Structural and Polarization Properties // *J. Exp. Theor. Phys.* – 2017. – V 124. – P. 584–591.

100. **Theodorakos, I.** Selective Laser Sintering of Ag Nanoparticles Ink for Applications in Flexible Electronics [Text] / I. Theodorakos, F. Zacharatos, R. Geremia, D. Karnakis, I. Zergioti // *Applied Surface Science*. – 2015. – V 336. – P. 157–162.

101. **Fujikawa, R.** Contribution of the Surface Plasmon Resonance to Optical and Magneto-Optical Properties of a Bi: YIG-Au Nanostructure / R. Fujikawa, A.V. Baryshev, J. Kim, H. Uchida, M. Inoue // *Journal of Applied Physics*. – 2008. – V 103. – P. 174-183, 07D301.

102. **Moirangthem, R.S.** Enhanced Localized Plasmonic Detections Using Partially-Embedded Gold Nanoparticles and Ellipsometric Measurements. Biomed [Text] / R.S. Moirangthem, M.T. Yaseen, P.-K. Wei, J.-Y. Cheng, Y.-C. Chang // *Opt. Express, BOE*. – 2012. – V 3. – P. 899–910.

103. **Gómez, D. E.** The Dark Side of Plasmonics / D.E. Gómez, Z.Q. Teo, M. Altissimo, T.J. Davis, S. Earl, A. Roberts // *Nano Lett.* – 2013. – V 13. –

P. 3722–3728.

104. **Baryshev, A. V.** // Tunable Plasmonic Thin Magneto-Optical Wave Plate. J. / A.V. Baryshev, A.M. Merzlikin // Opt. Soc. Am. B, JOSAB. – 2016. – V 33. – P. 1399–1405.

105. **Zheng, C.** / C. Zheng, Y. Du, M. Feng, H. Zhan // Dependence of Nonlinear Optical Behaviors of Nanostructured Silver and Their Silica Gel Glass Composites. Appl. Phys. Lett. – 2008. – V 93 – P. 143-108.

106. **Zheng, C.** / C. Zheng, X.Y. Ye, S.G. Cai, M.J. Wang, X.Q. Xiao // Observation of Nonlinear Saturable and Reverse-Saturable Absorption in Silver Nanowires and Their Silica Gel Glass Composite. Appl. Phys. – 2010. – V 101. – P. 835–840.

107. **Yankovskii, G. M.** / G. M. Yankovskii, A.V. Komarov, R.S. Puz'ko, A.V. Baryshev, K.N. Afanas'ev, I.A. Boginskaya, I.V. Bykov, A.M. Merzlikin, I.A. Rodionov, I.A. Ryzhikov // Structural and Optical Properties of Single and Bilayer Silver and Gold Films. Phys. Solid State. – 2016. – V 58. – P. 2503–2510.

108. **Fuchs, N. A.** On the Stationary Charge Distribution on Aerosol Particles in a Bipolar Ionic Atmosphere / N.A. Fuchs // Geofisica Pura e Applicata. – 1963. – V 56. – P. 185–193.

109. **Коротун, А. В.** Поляризованість металевої напівсфери на діелектричній підкладці [Текст] / А. В. Коротун // Український фізичний журнал. – 2022. – Т. 67. – №12. – С. 858–868.