

В.М. Рубіш<sup>1</sup>, В.К. Кириленко<sup>1</sup>, М.О. Дуркот<sup>1</sup>, Л.І. Макара<sup>1</sup>, М.М. Поп<sup>1,2</sup>,  
А.А. Тарнай<sup>1</sup>, М.Л. Трунов<sup>1</sup>, С.І. Мудрий<sup>3</sup>, І.І. Штаблавий<sup>3</sup>

## Швидкісні методи формування неупорядкованих масивів наночастинок Au і Ag, їх морфологія та оптичні характеристики

<sup>1</sup>Ужгородська лабораторія матеріалів оптоелектроніки та фотоніки Інституту проблем реєстрації інформації НАН  
України, 88000, Ужгород, вул. Замкові сходи, 4, Україна, [center.uzh@gmail.com](mailto:center.uzh@gmail.com)

<sup>2</sup>Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, пл. Народна, 3, Україна

<sup>3</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка, 79005, Львів, вул. Кирила і Мефодія, 8, Україна

Розроблені методики та оснащення для швидкого формування у вакуумі та на повітрі неупорядкованих масивів наночастинок (НЧ) Au і Ag із заданими морфологією та оптичними характеристиками. Методом швидкого (30-60 с) радіаційного нагрівання плівок золота і срібла (товщиною 4-35 нм) до температур 573-693 К одержані масиви НЧ Au і Ag з розмірами наночастинок від декількох десятків до сотень нанометрів, положення максимуму смуги поверхневого плазмонного резонансу (ЛПР) яких знаходиться в межах 520-597 нм для НЧ Au і 424-509 нм для НЧ Ag. Встановлено, що середній розмір наночастинок залежить від товщини плівок золота і срібла та температури відпалу. Показано, що сформовані масиви НЧ Au можуть бути використані для дослідження структури нанорозмірних халькогенідних плівок методом поверхнево-підсиленої раманівської спектроскопії.

**Ключові слова:** наночастинок, неупорядковані масиви наночастинок, спектри пропускання, поверхневий плазмонний резонанс.

Подано до редакції 25.10.2021; прийнято до друку 23.12.2021.

### Вступ

Неупорядковані та упорядковані масиви наночастинок благородних металів певного розміру та форми (нанокірки, нанопризми, наностержні, наносліти) широко використовуються для підсилення різних фізичних явищ (поверхнево-підсилене раманівське розсіювання світла (Surface Enhanced Raman Scattering (SERS)), яке є ефективним методом аналізу біологічних молекул, живих клітин і речовин у надмалих концентраціях, структури ближнього порядку нанорозмірних халькогенідних плівок та її зміни при відпалі і лазерному опроміненні, підсилення фотоіндукованого мас-транспорту речовини в халькогенідних плівках, наноструктурування їх поверхонь, тощо [1-13]), оскільки такі масиви можуть призводити до

зростання електричного поля на декілька порядків за рахунок збудження в них поверхневого плазмонного резонансу (ППР).

Одними із найбільш ефективних плазмон-активних структур є острівцеві плівки. В [5, 6, 9] було показано, що неупорядковані масиви НЧ Au можна формувати шляхом термічного відпалу на повітрі тонких нанорозмірних плівок золота, причому середній розмір наночастинок та оптичні властивості масивів залежать від номінальної товщини плівок золота та температури їх відпалу. Суттєвий вплив на процес формування масивів НЧ металів має і швидкість нагрівання металічних плівок, нанесених на скляні підкладки. Особливо це важливо при формуванні наночастинок металів, які мають значну схильність до окислення на повітрі (наприклад, срібло, яке окислюється, особливо при

Швидкісні методи формування неупорядкованих масивів наночастинок Au і Ag, їх морфологія та оптичні ...

підвищених температурах). У зв'язку з цим є актуальним завдання створення методик і відповідного обладнання для швидкого формування масивів металічних наночастинок з контрольованими параметрами.

Дана робота присвячена розробці швидкісних методів формування неупорядкованих масивів НЧ благородних металів, вивченню їх морфології та оптичних характеристик.

## I. Одержання нанорозмірних плівок золота та срібла

Напилення нанорозмірних плівок золота та срібла контрольованої товщини проводилось на модернізованій вакуумній установці ВУП-4. Для одержання плівок золота та срібла був вибраний метод резистивного випаровування, зміст якого полягає у тому, що ефективна площа випаровування зведена до мінімуму і становить (2,5×2,5) мм, а додаткові частини випаровувача заекрановані з метою мінімізації їх теплового впливу на умови конденсації. Контроль товщини плівок золота і срібла у процесі їх напилення проводився фотометричним методом та по відбиванню лазерного променя ( $\lambda=630$  нм). Напилення плівок проводилось на скляні підкладки з танталових і молібденових випаровувачів. Перед напиленням підкладки піддавались хімічній очистці, яка проводилась у декілька етапів: промивання у етиловому спирті, механічне протирання тампоном із батисту, кип'ятіння в ізопропіловому спирті, короткочасне охолодження на повітрі, омивання в парах ізопропілового спирту.

Номінальна товщина осаджених металів варіювалась від 4 до 35 нм і оцінювалась методом еліпсометрії з використанням спектрального еліпсометра HORIBA Smart SE та програмного забезпечення Delta Psi 2. В деяких випадках товщина плівок вимірювалась за допомогою атомно-силового мікроскопу (АСМ) Nanoscope III Dimension 3100. Відмітимо, що значення товщин плівок, визначених еліпсометричним методом, і виміряних за допомогою АСМ, задовільно узгоджуються.

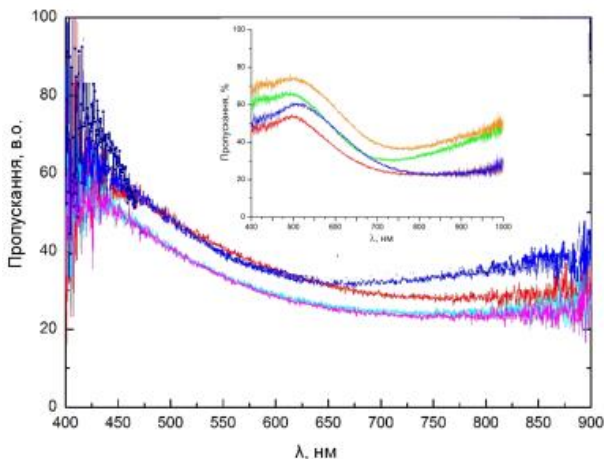


Рис. 1. Спектри пропускання плівок срібла та золота (вставка) різної товщини.

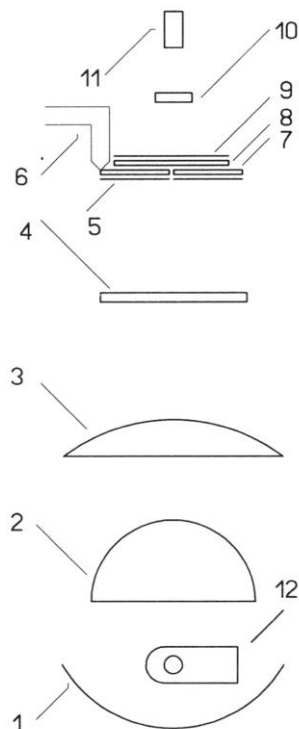
Спектри пропускання деяких плівок Au і Ag, вимірювання яких проводились за допомогою волоконного спектрофотометра Ocean Optics в ділянці спектру 400-1000 нм, наведені на рис. 1. Видно, що по формі спектри плівок різної товщини подібні.

## II. Формування неупорядкованих масивів наночастинок благородних металів на повітрі та контроль їх оптичних характеристик

Спосіб радіаційного нагрівання нанорозмірних плівок Au і Ag для формування масивів НЧ цих металів видається найбільш привабливим з огляду на те, що він дозволяє реалізувати широкий діапазон швидкостей нагрівання. У розробленому пристрої (рис. 2) нагрівачем служить галогенна лампа (12) потужністю 250 Вт з дзеркальнолінзовим конденсором (1), (2), (3), який концентрує випромінювання лампи на алюмінієвій пластинці (7), нижня сторона якої покрита термостійким чорнінням (5). У центрі пластинки (7) зроблений отвір діаметром 0,8 мм, через який невелика частина світлового потоку лампи (12) проходить крізь пластинку та підкладку (8) з нанесеною на неї плівкою (9) і потрапляє на волоконно-оптичний вхід (11) спектрофотометра Ocean Optics. Це дозволяє неперервно контролювати динаміку змін спектру пропускання плівки під час термообробки. Оптичний нейтральний фільтр (10) встановлюється при необхідності. Розмір алюмінієвої пластинки (7) в горизонтальній площині визначається розміром підкладки, а товщина вибирається такою, щоб мінімізувати нерівномірність розподілу температури на її поверхні. З цією ж метою пластинка (7) прикріплена до основи за допомогою ніхромових розтяжок діаметром 0,2 мм. Вимірювальна термопара (6) для одержання надійного теплового контакту, запресована безпосередньо в пластинку (7). В результаті, при масі пластинки (7) 1,2 г та середній масі підкладки (8) 1,5-2 г, одержана максимальна швидкість нагрівання становить 20-25 К/с. При цьому скляна підкладка не розтріскується, що свідчить про рівномірність розподілу температури по поверхні підкладки. Для зменшення швидкості нагрівання в оптичний тракт, між виходом конденсора та затвором (4), вводиться пакет з кварцових пластинок (на рис. 2 не показано), кількість яких підбирається експериментально. Такий підхід обґрунтований необхідністю мати незмінний спектр випромінювання лампи (12) при різних швидкостях нагрівання (за 30-300 с). Слід відмітити, що розроблений пристрій дозволяє проводити як швидке радіаційне нагрівання, так і стабілізацію температури скляної підкладки з нанесеною на неї плівкою металу в інтервалі 473-773 К.

Досягнення високих швидкостей нагрівання необхідне для зменшення часу взаємодії нагрітої поверхні металу з повітрям з метою запобігання оксидування утворених наночастинок. Особливо

це актуально при формуванні наночастинок срібла.



**Рис. 2.** Схема установки для одержання неупорядкованих масивів НЧ металів на повітрі

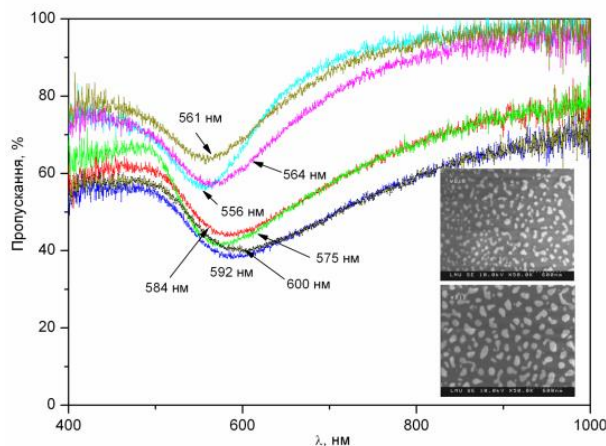
Використання спектрофотометра в процесі термообробки металічних плівок дозволяє контролювати зміни спектру поверхневого плазмонного резонансу при формуванні наночастинок і припинити відпал при досягненні ними заданих розмірів. Дослідження спектрів пропускання масивів наночастинок Au і Ag, які наведені на рис. 3 і 4, проводились в ділянці спектру 400-1000 нм.

Для аналізу морфології неупорядкованих масивів НЧ золота і срібла була використана польова емісія скануючого електронного мікроскопу Hitachi S-4100 в режимі вторинних електронів [14,15]. Сканування поверхні зразків проводилось за допомогою електронного променя при прискорюючій напрузі 15-20 кВ і струмі 10 мкА з просторовим розділенням 10 нм в режимі вторинних електронів. СЕМ-зображення деяких масивів НЧ Au і Ag, сформованих при різних режимах відпалу, наведені на вставках до рис. 3 і 4.

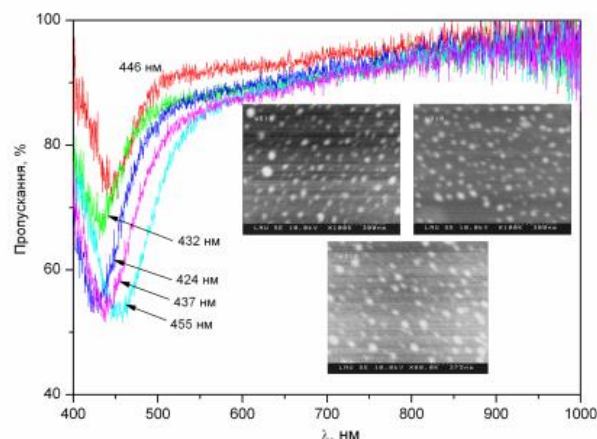
Аналіз СЕМ-зображень показав, що середній розмір наночастинок в масивах коливається в межах від декількох десятків до декількох сотень нанометрів. Зі зменшенням номінальної товщини осадженого золота та срібла зростає поверхнева щільність наночастинок. Середні розміри наночастинок при цьому зменшуються. Подібний висновок був зроблений і в [5, 6, 16, 17] на основі досліджень масивів наночастинок методом атомно-силової спектроскопії.

Слід відмітити, що при порівняно низьких температурах і часах відпалу морфологія поверхні металічних плівок на різних ділянках суттєво відрізняється. Для прикладу, на рис. 5 наведені СЕМ-

зображення різних ділянок масиву НЧ Ag, сформованого при 573 К протягом 30 с (на рисунках *a-в* наведені СЕМ-зображення ділянок плівки на краях, а на рисунках *г-е* – ближче до середини). Це, ймовірно, пов'язано з нерівномірністю розподілу температури плівки Ag, нанесеної на скляну підкладку, від середини до її країв [15].



**Рис. 3.** Контроль положення максимуму смуги ППР при формуванні масивів НЧ Au у процесі радіаційного нагрівання плівок золота до температур 653-693 К та СЕМ-зображення масивів різної морфології (вставка)



**Рис. 4.** Контроль положення максимуму смуги ППР при формуванні масивів НЧ Ag у процесі радіаційного нагрівання плівок срібла до температур  $T = 623$  К та СЕМ-зображення масивів різної морфології (вставка)

Таким чином, шляхом швидкого радіаційного нагрівання плівок золота і срібла (товщиною 4-35 нм) до температур 573-693 К на повітрі сформовані масиви НЧ Au і Ag з розмірами наночастинок від декількох десятків до сотень нанометрів, положення максимуму смуги ППР ( $\lambda_{ППР}$ ) яких знаходиться в межах 520-597 нм для НЧ Au і 424-509 нм для НЧ Ag. Аналіз спектрів пропускання та СЕМ-зображень масивів НЧ Au і Ag дозволяє стверджувати, що з ростом розмірів наночастинок  $\lambda_{ППР}$  зсувається у довгохвильову ділянку спектру.

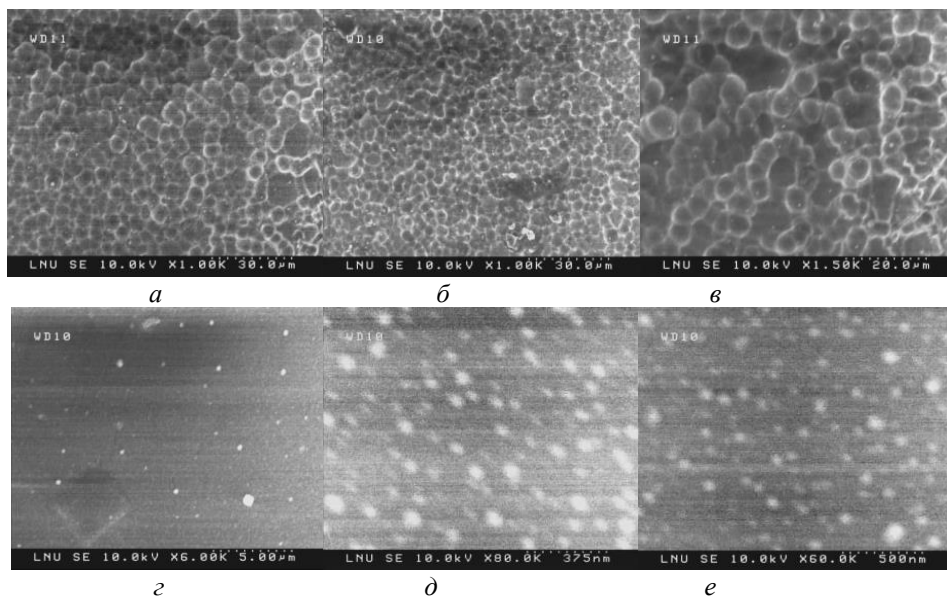


Рис. 5. СЕМ-зображення різних ділянок неупорядкованого масиву НЧ Ag, сформованого при температурі 573 К.

### III. Формування неупорядкованих масивів наночастинок срібла з контрольованими характеристиками у процесі вакуумного наплення

З метою прискорення процесу одержання масивів наночастинок срібла та запобігання їх контакту з повітрям, їх формування проводили під час наплення плівок. Для цього вакуумна установка ВУП-4 (рис. 6) була дооснащена рядом вузлів, які дозволяють проводити осадження металів на підігрівану (до 700 К) підкладку та контролювати спектри пропускання структур, що при цьому формуються. До складу оснастки входять: 1 – галогенна лампа 10 Вт (12 В); 2 – захисний екран; 3 – резистивний випаровувач; 4 – скляна підкладка; 5 – отвір діаметром 0,8мм; 6, 7 – місця встановлення двох галогенних ламп 100 Вт (12 В); 8 – мідний столик-тримач для підкладок; 9 – вакуумна камера; 10 – лінза; 11 – нейтральний світлофільтр; 12 – волоконно-оптичний вхід спектрофотометра.

Столик-тримач (8), до плоскої частини якого прикріплена підкладка (4), представляє собою мідну пластину, на краях якої сформовані циліндричні порожнини (6) та (7). В ці циліндричні порожнини вставлені дві галогенні лампи потужністю 100 Вт кожна. Така конструкція нагрівача забезпечує нагрівання підкладки до температури 700 К при швидкості нагрівання понад 10 К/с у вакуумі. В центрі плоскої частини столика є отвір (5), який, завдяки малому діаметру, не спотворює розподілу температури на поверхні підкладки. Через цей отвір випромінювання галогенної лампи (1), яке пройшло через підкладку (4) з плівкою, виходить назовні вакуумної установки через прозору верхню частину

(9). За межами вакуумної установки, за допомогою лінзи (10), випромінювання фокусується на волоконно-оптичному вході (12) спектрофотометра Ocean Optics. Це дозволяє неперервно контролювати спектри пропускання, та відповідно, зміну максимуму смуги поверхневого плазмонного резонансу (ППР) наночастинок, що формуються. Відмітимо, що спектри пропускання масивів НЧ Ag, сформованих у вакуумі, подібні спектрам, наведеним в [16, 17] та на рис. 4. Передбачена можливість введення в оптичний тракт нейтрального фільтру (11).

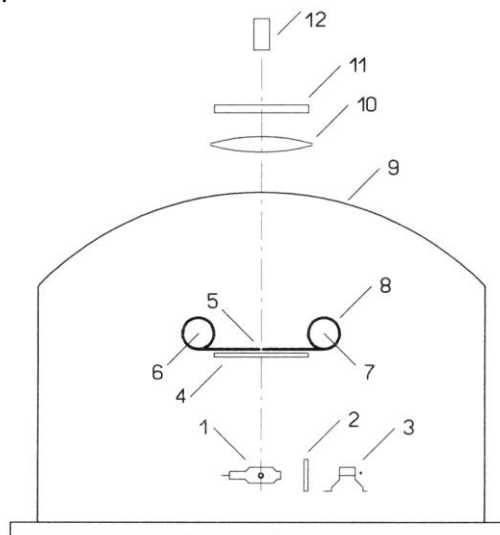


Рис. 6. Схема розміщення вузлів підковпачного оснащення для формування масивів наночастинок срібла у процесі осадження плівки

Дослідження показали, що даний метод дозволяє у процесі наплення формувати масиви НЧ срібла з розміром наночастинок 20-100 нм, положення максимумів смуг ППР яких знаходяться в ділянці спектру 480-510 нм.

#### IV. Використання неупорядкованих масивів НЧ Au в якості SERS-підкладок для дослідження структури ближнього порядку нанорозмірних халькогенідних плівок

З метою з'ясування можливості практичного використання неупорядкованих масивів НЧ Au, сформованих методом швидкого радіаційного нагрівання на повітрі нанорозмірних плівок золота, в якості SERS-підкладок нами проведені дослідження раманівських спектрів свіжо приготованих і відпалених плівок  $As_2S_3$  товщиною 50 і 100 нм та плазмонних структур на основі НЧ Au і плівок  $As_2S_3$  такої ж товщини.

Тонкі плівки сульфиду миш'яку та композитні структури «НЧ Au/плівка  $As_2S_3$ » одержувались методом термічного випаровування із квазізамкнених ефузійних комірок скла  $As_2S_3$  на скляні підкладки та на поверхню масивів золотих наночастинок з середнім розміром НЧ Au 20-35, 30-40 і 40-60 нм та значенням  $\lambda_{ППР}$ , рівними 532, 538 і 574 нм, відповідно. Дослідження раманівських спектрів свіжо приготованих і відпалених плівок  $As_2S_3$  та композитних структур «НЧ Au/плівка  $As_2S_3$ » проводились при кімнатній температурі на спектрометрі Horiba Jobin-Yvon. Для збудження використовувався лазер з  $\lambda_{365} = 671$  нм.

Дослідження раманівських спектрів нанорозмірних аморфних плівок  $As_2S_3$  показали, що як для свіжо приготованих, так і для відпалених номінально чистих плівок раманівський сигнал відсутній (рис. 7, криві 1 і 2).

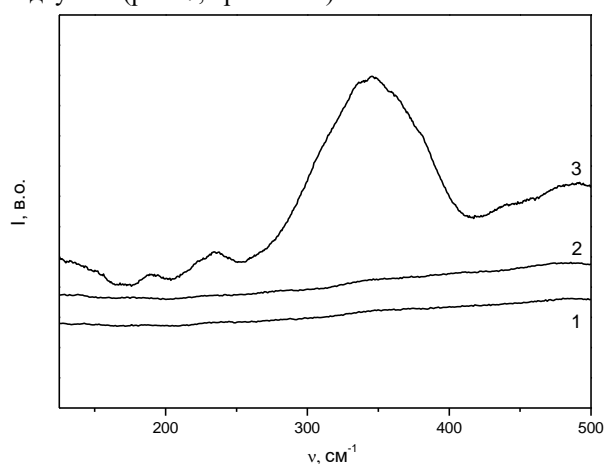


Рис. 7. Раманівські спектри свіжоприготованих плівок  $As_2S_3$  товщиною 50 нм (1), 100 нм (2) і плазмонної структури «НЧ Au/плівка  $As_2S_3$ » (3), зняті при  $\lambda_{365} = 671$  нм, (пояснення в тексті).

Для цих же плівок, але нанесених на масиви наночастинок золота, в раманівських спектрах чітко проявляються всі особливості, характерні для спектрів стекол і аморфних (мікронної товщини) плівок  $As_2S_3$  [11, 18]. Для прикладу, на рис. 7 (крива 3) наведений раманівський спектр відпаленої при 450 К протягом 1 год. плівки  $As_2S_3$  товщиною 50 нм, нанесеної на масив НЧ Au з середнім розміром

наночастинок 30-40 нм, знятий при  $\lambda_{365} = 671$  нм. Для плівки сульфиду миш'яку товщиною 100 нм, нанесеної на такий же масив, раманівський спектр ідентичний.

Раманівський спектр відпаленої нанорозмірної плівки  $As_2S_3$  містить інтенсивну широку смугу з максимумом при 343  $\text{cm}^{-1}$ , ряд менш виражених смуг при 148, 186, 235 і 483  $\text{cm}^{-1}$  та особливість (у вигляді плеча) при 380  $\text{cm}^{-1}$ . Слід відзначити подібність одержаного спектру зі спектром склоподібного  $As_2S_3$  [18]. Основна смуга в раманівському спектрі плазмонної структури «НЧ Au/ плівка  $As_2S_3$ » обумовлена коливаннями атомів As і S в тригональних пірамідах  $As_2S_3$ . Слабка смуга при 148  $\text{cm}^{-1}$  може бути віднесена до As-S-As коливань, а смуга при 483  $\text{cm}^{-1}$  – до S-S коливань. Досить виражені смуги при 186 і 235  $\text{cm}^{-1}$  та особливість при 362  $\text{cm}^{-1}$  вказують на присутність в матриці плівки сульфиду миш'яку певної кількості молекулярних фрагментів з гомополярними зв'язками миш'як-миш'як ( $As_4S_4$ ).

Слід зазначити, що раманівські спектри нанорозмірних плівок сульфиду миш'яку, нанесених на масиви НЧ Au з іншими розмірами наночастинок, практично не відрізняються від спектру, наведеного на рис. 7 (крива 3). Відмітимо, що ефект підсилення раманівського сигналу був виявлений і при дослідженні плазмонних структур «НЧ Au/плівка Se» [12, 13].

Одержані результати свідчать про те, що скляні підкладки зі сформованими на їх поверхні неупорядкованими масивами НЧ Au можуть бути використані в якості ефективних SERS-підкладок для досліджень структури нанорозмірних халькогенідних плівок методом поверхнево підсиленої раманівської спектроскопії.

#### Висновки

Дослідження показали, що методом швидкого радіаційного нагрівання тонких (4-35 нм) плівок золота і срібла на повітрі (при швидкостях нагрівання 20-25 К/с) до температур 573-693 К та методом осадження срібла на підігріті (при швидкості нагрівання 10 К/с) до таких же температур скляні підкладки у вакуумі можна формувати неупорядковані масиви НЧ Au і Ag з розміром наночастинок від декількох десятків до сотень нанометрів. Виявлено, що положення максимуму смуги ППР масивів НЧ Au знаходиться в ділянці спектру 520-597 нм, а масивів НЧ Ag – 424-509 нм. Встановлено, що середній розмір НЧ залежить від товщини плівок Au і Ag та температури і часу відпау. З ростом розміру наночастинок  $\lambda_{ППР}$  зсувається у довгохвильову ділянку спектру.

Показано, що сформовані неупорядковані масиви наночастинок золота можуть бути використані в якості ефективних SERS-підкладок для досліджень раманівських спектрів і, відповідно, структури нанорозмірних халькогенідних плівок.

*Автори висловлюють подяку Університету  
Вюрцбурга за надане обладнання для дослідження  
матеріалів методом сканувальної електронної  
мікроскопії.*

**Рубіш В.М.** – професор, д.ф.м.-н., завідувач;  
**Кириленко В.К.** – провідний інженер-конструктор;  
**Дуркот М.О.** – провідний інженер-технолог;  
**Макар Л.І.** – провідний інженер;  
**Поп М.М.** – к.ф.м.-н., доцент;  
**Тарнай А.А.** – провідний інженер-конструктор;  
**Трунов М.Л.** – науковий співробітник;  
**Мудрий С.І.** – професор, д.ф.м.-н., завідувач кафедри;  
**Штаблавий І.І.** – доцент, д.ф.м.-н.

- [1] R.K. Chang, T.E. Furtak, (1982), Surface enhanced Raman scattering, New York: Plenum Press, pp. 379
- [2] M. Moskovits, Surface-enhanced spectroscopy, Rev. Modern Phys. 57(3), 783-826 (1985); <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.57.783>.
- [3] I.P. Nabiev, R.G. Efremov, G.D. Chumanov, Giant Raman scattering and its application to the study of biological molecules, Sov. Phys. Usp. 31 241–262 (1988); <https://doi.org/10.1070/PU1988v031n03ABEH005720>.
- [4] D.M. Kuncicky, S.D. Christesen, O.D. Velev, Role of the micro- and nanostructure in the performance of surface-enhanced Raman scattering substrates assembled from gold nanoparticles, Applied Spectroscopy, 59(4), 401-409 (2005); <https://doi.org/10.1366%2F0003702053641559>.
- [5] M.L. Trunov, P.M. Lytvyn, P.M. Nagy, et al. Light-induced mass transport in amorphous chalcogenides/gold nanoparticles composites, Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 16(4), 354-361 (2013).
- [6] M.L. Trunov, P.M. Lytvyn, P.M. Nagy, et al., Light-induced mass transport in amorphous chalcogenides: Toward surface plasmon-assisted nanolithography and near-field nano imaging, Phys. Status Solidi B., 251(7), 1354-1362 (2014); <https://doi.org/10.1002/pssb.201350296>.
- [7] M.L. Trunov, P.M. Lytvyn, V.A. Sterligov, et al., Formation of Nanostructures Upon Photoexcitation of Surface Plasmon Resonance in Nanocomposites Derived from Textured Gold Films and Chalcogenide Glass», Theoretical and Experimental Chemistry, 54(2), 107–113 (2018); <https://doi.org/10.1007/s11237-018-9553-y>.
- [8] V.O. Yuhymchuk, O.M. Hreshchuk, V.M. Dzhagan, et al., Experimental studies and modeling of “starlike” plasmonic nanostructures for SERS application, Phys. Stat. Solidi B., 1800280 (1-8) (2018); <https://doi.org/10.1002/pssb.201800280>.
- [9] A.V. Korotun, A.O. Koval’, A.A. Kryuchyn, V.M. Rubish, V.V. Petrov, I.M. Titov, Nanophoton technologies. Modern state and prospects, Uzhgorod: PE Sabov A.M, 482 p. (2019).
- [10] I. Csarnovics, M. Veres, P. Nemeč, et al., Surface plasmon enhanced light-induced changes in Ge-Se amorphous chalcogenide-Gold nanostructures, J. Non-Cryst.Solids: X, 6, 100045 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120491>.
- [11] V.M. Rubish, M.O. Durkot, O.M. Hreshchuk, et al., Investigation of the short-range order structure of nanosized chalcogenide films by SERS-method, Mat. Intern. Meeting “Clusters and nanostructured materials (CNM-6)”, Uzhgorod, Ukraine, pp.134-135 (2020).
- [12] T.I. Yasinko, V.O. Yuhymchuk, V.M. Rubish, et al., Raman spectroscopy study of nano-sized amorphous layers of selenium and plasmon structures “Au NPs/ Se film”, Mat. Intern. Meeting “Clusters and nanostructured materials (CNM-6)”, Uzhgorod, Ukraine, pp.326-327 (2020).
- [13] V.M. Rubish, O.M. Greshchuk, M.O. Durkot, [et. al.], Structural studies of photosensitive composites “NPs Au/selenium film”, Data recording, storage & processing, 22(4), 12-18 (2020).
- [14] M.O. Durkot, V.K. Kyrylenko, A.A. Tarnaj et al. Surface morphology and optical characteristics of arrays of randomly distributed gold nanoparticles Mat. Intern. Meeting “Clusters and nanostructured materials (CNM-6)”, Uzhgorod, Ukraine, pp.209-210 (2020).
- [15] L.I. Makar, S. Mudry, V.M. Rubish, et al., ESEM study of surface morphology of arrays of noble metals nanoparticles, Mat. Intern. Meeting “Clusters and nanostructured materials (CNM-6)”, Uzhgorod, Ukraine, pp.114-115 (2020).
- [16] M.O. Durkot, V.K. Kyrylenko, P.M. Lytvyn, Formation of arrays of silver nanoparticles of different morphology and their optical characteristics, Abstr. VIII Ukrainian Scientific Conference on Physics of Semiconductors (USCPS-8), Uzhhorod, Ukraine, V.1, pp. 194-195 (2018).
- [17] M.O. Durkot, V.K. Kyrylenko, P.M. Lytvyn et al., Formation of Ag nanoparticles arrays and their optical transmittance spectra, Mat. Intern. Meeting “Clusters and nanostructured materials (CNM-5)”, Uzhgorod, Ukraine, pp. 163-164. (2018).
- [18] V.V. Petrov, A.A. Kryuchin, V.M. Rubish, Materials perspective optoelectronic devices, Kiev: Naukova dumka, 335 p. (2012).

V.M. Rubish<sup>1</sup>, V.K. Kyrylenko<sup>1</sup>, M.O. Durkot<sup>1</sup>, L.I. Makar<sup>1</sup>, M.M. Pop<sup>1,2</sup>,  
A.A. Tarnaj<sup>1</sup>, M.L. Trunov<sup>1</sup>, S. Mudry<sup>3</sup>, I. Shtablavyi<sup>3</sup>

## **Rapid formation methods of arrays of randomly distributed Au and Ag nanoparticles, their morphologies and optical characteristics**

<sup>1</sup>*Institute for Information Recording, NAS of Ukraine, 4, Zamkovi Skhody str., 88000 Uzhgorod, Ukraine, [center.uzh@gmail.com](mailto:center.uzh@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Uzhhorod National University, Narodna Square, 3, 88000, Uzhhorod, Ukraine*

<sup>3</sup>*Ivan Franko National University of Lviv, Kyrylo i Mephodiy 8, 79005 L'viv, Ukraine*

Techniques and equipment for rapid formation of disordered arrays of Au and Ag nanoparticles (NPs) with specified morphology and optical characteristics have been developed. By the method of rapid (30-60 s) radiation heating of gold and silver films (4-35 nm of thickness) to temperatures about 573-693 K, arrays of Au and Ag NPs with the dimensions from several tens to hundreds of nanometers has been received, and the position of the maximum of the surface plasmon resonance band ( $\lambda_{SPR}$ ) which is in the range of 520-597 nm for Au and 424-509 nm for Ag. It is established that the average size of nanoparticles depends on the thickness of gold and silver films and on the annealing temperature. It is shown that the formed Au NPs arrays can be used to study the structure of nanosized chalcogenide films by surface-enhanced Raman spectroscopy.

**Keywords:** nanoparticles, disordered nanoparticle arrays, transmission spectra, surface plasmon resonance.