

СИНТЕЗ ТА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДНИХ СУСПЕНЗІЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО СРІБЛА

С. З. Малинич

*Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
просп. Науки, 41, 03028, Київ,*

*Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005, Львів*

(Отримано 20 грудня 2007 р.; в остаточному вигляді — 12 грудня 2008 р.)

Квазісферичні наночастинки та нанодротини срібла синтезовано методом відновлення оксиду срібла воднем у водному середовищі. Метод дає змогу отримувати наночастинки в широкому діапазоні розмірів — від 10 нм до 150 нм і більше. Зернами кристалізації використовували наночастинки розміром менше 10 нм. Представлено експериментальні оптичні спектри водних суспензій наночастинок срібла та проведено порівняння з розрахованими спектрами для сферичних частинок у межах теорії Мі.

Ключові слова: наночастинки срібла, колоїди, оптичні спектри, локалізовані поверхневі плазмонні резонанси.

PACS number(s): 81.07.Bc, 78.67.Bf

I. ВСТУП

Останнім часом відбувається справжній бум у виготовленні та дослідженні нанорозмірних систем. Це зумовлено багатообіцяючими перспективами застосування таких систем у мікроелектроніці, оптиці та фотоніці, для потреб каталізу, хемо- та біосенсорики тощо. Особливе місце серед них посідають наночастинки металів, передусім благородних. Малі металеві частинки займають проміжне місце між окремими атомами та масивним металом. Експериментально показано, що перехід від макрооб'єктів до нанорозмірних частинок веде до якісних змін у їх фізико-хімічних властивостях. Завдяки ряду особливостей, пов'язаних із їхнім розміром, вони мають унікальне поєднання оптичних, електричних, магнітних, каталітичних та інших властивостей, не притаманних масивним металам [1]. У цьому сенсі наночастинки срібла є особливо цікавими внаслідок їхньої здатності ефективно взаємодіяти зі світлом шляхом збудження плазмонних резонансів. Серед благородних металів (Ag, Au, Cu), які демонструють плазмонні резонанси у видимій області спектра, саме срібло має найбільшу ефективність збудження плазмонів. Окрема наночастинка срібла взаємодіє зі світлом значно сильніше, ніж будь-який відомий органічний чи неорганічний матеріал. Ефективний переріз взаємодії наночастинки срібла зі світлом може в десять разів перевищувати її геометричний переріз, що свідчить про те, що частинка захоплює більше світла, ніж фізично на неї падає [2]. Ще однією визначною особливістю ультрадисперсного срібла є його бактерицидна дія широкого спектра, що відкриває перспективи використання срібних наночастинок у медицині, текстильній промисловості та засобах гігієни [3–5].

Досягнення в наукових дослідженнях та використанні наночастинок значною мірою залежать від можливостей методів синтезу, а саме, продукування частинок у значних об'ємах, із заданими розмірами та формою. Способи виготовлення та застосування на-

ночастинок металів відомі ще з античних часів, хоча перші систематичні наукові дослідження золів (водних суспензій) золота та деяких інших металів почав проводити М. Фарадей у середині XIX століття [6]. На сьогодні існує багато методів отримання наночастинок металів, зокрема срібла. Умовно їх можна поділити на дві групи: хімічні та фізичні. Очевидно, що в першому випадку наночастинки срібла отримують унаслідок протікання хімічних реакцій, тоді як у другому використовують або конденсацію атомів, або подібнення масивних частин срібла. Розробляють навіть “екзотичні” методи, коли наночастинки металів отримують унаслідок процесів життєдіяльності бактерій [7, 8].

Найбільшого поширення завдяки хорошій відтворюваності та високій продуктивності набули хімічні методи синтезу, коли наночастинки отримують у вигляді колоїдів. В основу цих методів покладено відновлення певних сполук срібла в рідинному середовищі за наявності стабілізаторів. Переважна частина робіт присвячена синтезу наночастинок срібла відновленням нітриду срібла AgNO_3 . Відновлення здійснюють гідрохіноном [9], цитратом натрію [9, 10], NaBH_4 [10, 11], α -NADPH-залежною нітратною редуктазою [12], додекантіолом [13], лимонною та аскорбіновою кислотою [14], етиленгліколем (так званий поліольний процес) [15], спиртом [16], воднем [18]. Препаратами хімічної реакції використовують також AgI [17], AgSO_4 [19], перхлорат срібла [20]. Для запобігання агрегації наночастинок до розчинів додають стабілізуючі речовини, які утворюють навколо кожної частинки захисний шар. Такими стабілізаторами є цетилтриметиламоній бромід (СТАВ) [11, 14], цитрат натрію [10, 11], поліфосфат натрію [18], фітожелатин [12], полівінілпіролідон та полівінілалкоголь [9], тіоли [13], амфифільні блок-кополімери [21]. Це аж ніяк не повний перелік відновників та стабілізаторів, що використовують для синтезу наночастинок срібла. Як правило, такими методами отримують монодисперсні суспензії срібних частинок розміром 5–20 нм.

Окремо можна виділити методи синтезу наночастинок, у яких поряд із хімічними реакціями використовують фізичні чинники. Так, для керування процесом кристалізації та протіканням реакцій застосовують ультразвук [22], мікрохвильове [23, 24], йонізуюче [25, 26] та УФ [27, 28] випромінювання. Цікаво, що опромінення колоїдів срібла світлом під час синтезу дає змогу кардинально змінювати форму наночастинок [29, 30]. Спільною рисою всіх перелічених хімічних методів синтезу наночастинок є використання, окрім самого срібла, інших хімічних реагентів, які можна розглядати як забруднення. Бажаним було б отримати “чисті” наночастинок срібла з тим, щоб надалі їх можна було функціоналізувати належно.

Серед “фізичних” методів одержання наночастинок срібла насамперед відзначимо лазерну абляцію масивних зразків срібла у воді [31, 32]. Зрозуміло, що такий метод не може забезпечити достатньо вузького розподілу наночастинок за розмірами. Кращих результатів у цьому сенсі можна досягти за допомогою осадження атомів срібла на поверхню з їх подальшою поверхневою дифузією та нуклеацією (механізм росту Фольмера–Вебера) [33]. Опромінення отриманих у такий спосіб частинок за допомогою лазера ($\lambda = 355$ нм та 532 нм) істотно поліпшує монодисперсність зразків. Проте частинки в цьому випадку отримують безпосередньо на підкладці, тоді як багато застосувань вимагають наявності “вільних” наночастинок. Об’ємного розподілу наночастинок срібла у твердотільній матриці можна досягти Ag^+ йонною імплантацією в монокристал SiO_2 [34].

Г. Чуманов (G. Chumakov) розвинув метод синтезу наночастинок срібла, який полягає у відновленні оксиду срібла (I) воднем у водному середовищі [35]. Перевагами цього методу над іншими є висока продуктивність, простота та одержання “чистих” наночастинок срібла, оскільки будь-які інші хімічні компоненти, крім оксиду срібла та водню, відсутні. Метод синтезу, описаний у даній статті, відрізняється від згаданого використанням попередньо синтезованих наночастинок срібла розміром до 10 нм як зародків кристалізації.

II. СИНТЕЗ ВОДНИХ СУСПЕНЗІЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО СРІБЛА

Для синтезу ультрадисперсного срібла використано оксид срібла Ag_2O чистотою 99.99% виробництва Alfa Aesar, водень чистотою 99.9999% (виробництво National Welders) та дейонізовану воду, електричний опір якої перевищує 18 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$.

Реактор для синтезу складається з 5 л округлої колби з пірексу, оснащеної трьома шийками, а також конденсатора з водяним охолодженням (рис. 1). Водень із балона подається в колбу через одну з шийок, до якої також приєднаний конденсатор для збору води, що випаровується під час реакції. Лінія подачі водню оснащена двома клапанами для запобігання попаданню водяної пари в балон із воднем та газовим вентиляем.

Дві інші шийки використано, щоб установити термометр та сифон для відбору проб колоїдного срібла під час росту частинок. Нагрівали розчин за допомогою електричного нагрівника, встановленого під колбою. Розмішували розчин за допомогою магнітного розмішувача. Колбу попередньо промивали азотною кислотою та великою кількістю дейонізованої води.

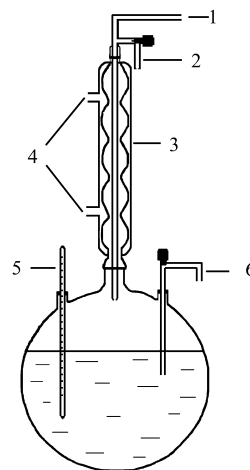
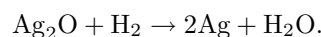


Рис. 1. Апарат для синтезу наночастинок срібла: 1 — трубка для впуску водню з балона; 2 — випускний газовий вентиль; 3 — конденсатор водяної пари; 4 — вхід та вихід водяного охолодження; 5 — термометр; 6 — сифон для відбору проб.

Чисту колбу заповнювали трьома літрами дейонізованої води, до якої додавали 3 г оксиду срібла (I). Посудину інтенсивно струшували протягом приблизно 1 хв для забезпечення однорідності розчину. Утворювався насичений розчин, оскільки розчинність оксиду срібла у воді становить 0.0013 г/100 г при 20°C та 0.0053 г/100 г при 100°C [36]. До розчину додавали ~ 20 мл водної суспензії 10 нм частинки срібла, отриманої попередньо під час аналогічної реакції. Колбу встановлювали на штативі у витяжній шафі, а під нею розташовували нагрівник та магнітний розмішувач. Після того як температура розчину досягала значення 70°C , колба кілька разів наповнювалася воднем, який випускався назовні через газовий вентиль. У такий спосіб із колби видалялося повітря. Тиск водню всередині колби встановлювався на рівні 69 кПа. За вказаних умов протікала хімічна реакція:



Хід реакції можна контролювати візуально, спостерігаючи за кольором розчину. Одразу після початку реакції розчин прозорий світло-жовтого забарвлення, що свідчить про утворення частинок срібла розміром 10–15 нм. Для частинок таких розмірів поглинання світла домінує над розсіюванням. Із ростом частинок колір стає більш насиченим, поступово набуваючи червонуватого відтінку. Вже через 20 хв реакції розчин робиться червоно-коричневим з легкою опалесценцією. Це відбувається тоді, коли розмір частинок

досягає значень ~ 50 нм і частка розсіювання в оптичних спектрах переважає поглинання. Надалі розчин мутніє і набуває зеленуватого забарвлення [37]. Повний час реакції становив 8 годин. Отже, спостереження за забарвленням колоїду дає змогу якісно оцінити розмір частинок у суспензії. Точніші оцінки можна отримати зі спектрів пропускання розчинів у видимій області. Відбір проб для спектральних вимірювань здійснюється під час реакції через сифон.

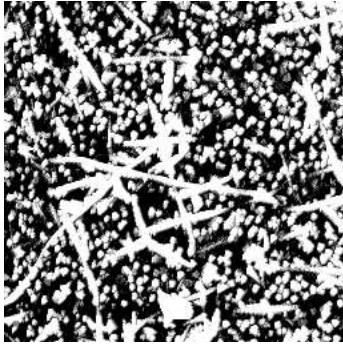


Рис. 2. Зображення наночастинок та нанодротин срібла, отримане за допомогою атомно-силового мікроскопа (поле зору 10×10 мкм).

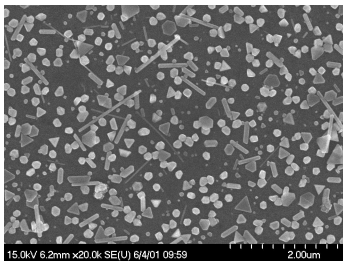


Рис. 3. Наночастинок срібла на пізній — 480 хв — стадії росту. Зображення отримане на скануючому електронно-мікроскопі.

За допомогою атомно-силової та скануючої електронної мікроскопії було виявлено, що колоїдні розчини утворюються частинками різних форм та розмірів (рис. 2, 3). Значну частку становлять частинки поліедричної (округлої) форми, наявні також частинки у вигляді трикутних призм, паличкоподібні, довгі — понад 3 мкм завдовжки — дротини діаметром ~ 40 нм та частинки малих (10–20 нм) розмірів. Кількісні співвідношення між фракціями та розмір частинок залежить від часу реакції. Фактично, частинки потрібного розміру можна отримати припиненням реакції. Розподіл за формою та розмірами частинок, синтезованих описаним методом, є не настільки однорідним, як це описали автори [35]. Причиною цього може бути зростання швидкості хімічної реакції завдяки наявності зерен кристалізації та, як наслідок, значна анізотропія росту нанокристалів. Дуже важливим є той факт, що частинки в колоїді не утворюють агрегатів, а залишаються відокремленими протягом дуже тривалого часу навіть за відсутності хімічних стабілізаторів. Агрегації запобігає подвійний

електричний шар навколо кожної наночастинок, який зумовлює кулонівське відштовхування частинок. Вони лише осаджуються на дно посудини, але для отримання суспензії посудину достатньо легко збовтати. У такому стані колоїди можуть зберігатися роками. Про відсутність агрегації можна судити за незмінністю спектрів екстинкції колоїдів.

III. ОПТИЧНІ СПЕКТРИ ЕКСТИНКЦІЇ КОЛОЇДІВ СРІБЛА

Як уже зазначалося вище, нанорозмірні частинки металів, зокрема срібла, мають ряд цікавих оптичних властивостей. Уперше оптичний відгук малих сферичних металевих частинок теоретично описав Г. Мі у 1908 р. [38]. Для сферичних частинок розміром значно менших, ніж довжина хвилі падаючого світла, поле електромагнітної хвилі можна вважати квазістатичним, тоді екстинкцію світла частинкою можна знайти безпосередньо розв'язуванням рівнянь Максвелла. Мі знайшов відповідні розв'язки для частинок золота різного розміру та навіть діаграми електричного й магнітного полів для дипольних, квадрупольних, секступольних та октупольних коливних мод. На сьогодні добре відомо, що смуги в оптичних спектрах екстинкції наночастинок благородних металів пов'язані з колективними коливаннями електронів провідності, або інакше, локалізованими поверхневими плазмонними резонансами. Для частинок із розмірами порядку довжини хвилі падаючого світла помітними стають ефекти запізнення і необхідно застосовувати електродинамічні моделі.

Згідно з теорією Мі, екстинкція (сумарне поглинання та розсіяння) світла частоти ω ізольованою сферичною металевою частинкою діаметром $2a$ описується перерізом екстинкції

$$C_{\text{ext}}(\omega, a) = \frac{2\pi c^2}{\omega^2 \varepsilon_M(\omega)} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n), \quad (3.1)$$

де c — швидкість світла у вакуумі, $\varepsilon_M(\omega)$ — діелектрична стала зовнішнього середовища, a_n and b_n — коефіцієнти розсіяння ТМ та ТЕ мод порядку n відповідно, Re означає дійсну частину. Для колоїдної суспензії, тобто ансамблю невзаємодіючих частинок, екстинкція буде

$$E(\omega) = -\log \left(\frac{I_t(\omega)}{I_0(\omega)} \right). \quad (3.2)$$

Екстинкція пов'язана з перерізом розсіяння законом Ламберта–Бера:

$$E(\omega) = \sum_j C_{\text{ext}}(\omega, a_j) \frac{N_j}{V} d \cdot \log e, \quad (3.3)$$

де $2a_j$ відповідає діаметрові частинок, що становлять ансамбль, N_j/V концентрації, d — довжина оптичного шляху (товщина кювети), V — загальний об'єм зразка. Останній вираз описує загальне ослаблення колоїдом інтенсивності світлового пучка, яку вимірюють у далекій зоні експериментально.

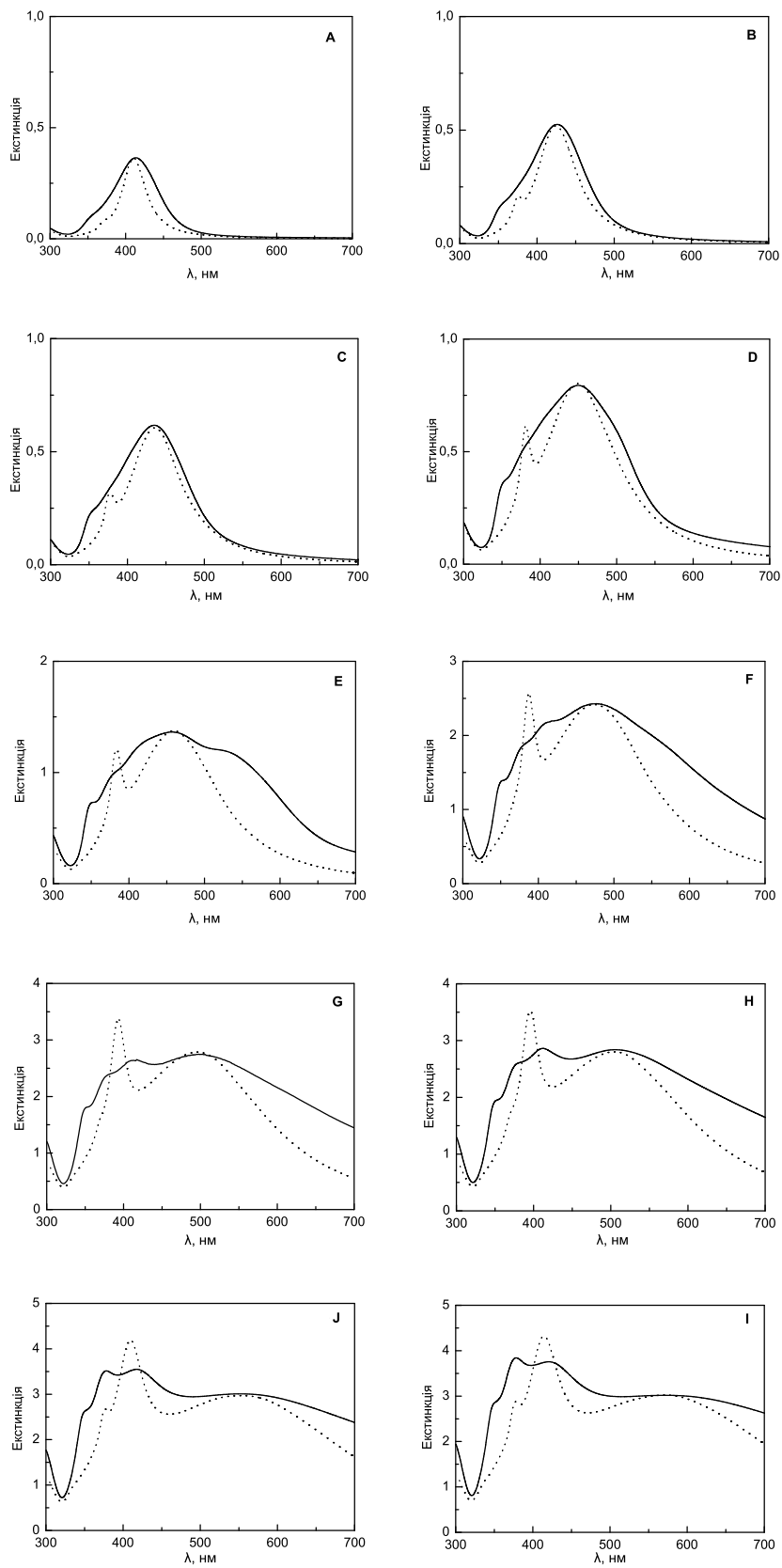


Рис. 4. Спектри екстинкції суспензій наночастинок срібла, відібраних у різні моменти часу під час хімічної реакції. Пунктиром показані спектри, розраховані в межах теорії Мі для сферичних частинок срібла радіусом: А — 27 нм; В — 33 нм; С — 37 нм; D — 42 нм; E — 45; F — 49 нм; G — 54 нм; H — 56 нм; J — 66 нм; I — 69 нм.

У спектрах екстинкції водних суспензій наночастинок срібла наявна чітко виражена широка смуга, пов'язана з дипольною компонентою плазмонного резонансу. Спектральне положення цієї смуги є функцією розміру та форми частинок [39]. Зі збільшенням розміру частинок максимум смуги зміщується в бік довших довжин хвиль; одночасно в “синій” частині спектра починає зростати відносно вузька квадрупольна смуга. Для сферичних Ag частинок діаметром ~ 100 нм ці смуги центровані при 480 нм та 387 нм відповідно.

На рисунку 4 зображено експериментальні спектри екстинкції порцій водних суспензій ультрадисперсного срібла, відібраних у різні моменти під час протікання хімічної реакції. Спектри вимірювали на двоканальному спектрофотометрі Shimadzu UV-2501PC, колоїди заливали у кварцеву кювету товщиною 10 мм. Поряд з експериментальними кривими на рисунку наведено спектри, обчислені в межах теорії Мі для сферичних частинок срібла різних розмірів, завислих у воді. Обчислення проводили з використанням симулятора Nanosphere Optics Lab, розробленого Jon P. Camden, George C. Schatz та вільно доступного на сайті <http://nanohub.org>. Розраховані криві нормували за інтенсивністю дипольної коливної моди так, щоб зрівняти максимуми розрахованих спектрів із максимумами відповідних експериментальних кривих. Одразу помітно, що експериментальні спектри істотно різняться від теоретичних. Спектри проб, відібраних на ранніх стадіях синтезу (рис. 4А, В, С), мають більшу спектральну ширину; квадрупольна смуга, що починає з'являтися в розрахованих спектрах, наявна лише у вигляді слабко вираженого плеча в короткохвильовій частині спектрів. Це зумовлено тим, що вже в ранніх пробах є частинки різних форм, у тому числі відмінних від сферичної. Для спектрів пізніших проб характерні інтенсивний довгохвильовий “хвіст” та поява локальних смуг в області 350–500 нм (рис. 4F–J). Внесок у короткохвильові смуги може надходити від двох різних типів плазмонних коливань. З одного боку, це можуть бути дипольні моди, пов'язані з частинками видовженої форми. Наприклад, для наночастинок, що мають форму тривісного еліпсоїда відповідно спостерігається три дипольні моди [40]. Причому для дипольного резонансу, збудженого світлом із поляризацією, паралельною до довшої осі еліпса, відбувається червоне зміщення при видовженні частинки, тоді як при поляризації, паралельній до меншої осі, дипольний резонанс зміщується в короткохвильовий бік [39]. Іншим джерелом плазмонних збуджень у цій частині спектра є коливні моди вищих порядків, наявні у сфероїдальних наночастинок діаметром понад

70 нм та у “нанодротинах”. Автори [41], на основі детальних розрахунків спектрів екстинкції методом T -матриці для наночастинок із видовженням $1 \div 5$, показали, що мультипольні моди у спектральній області 350–500 нм є досить сильно вираженими. Оскільки в цій роботі використовували неполяризоване світло, а також, якщо взяти до уваги той факт, що наночастинки в суспензії орієнтовані хаотично, то загальний внесок від дипольних плазмонних мод, зумовлених відхиленням форми частинок від сферичної, повинен приводити до згладжування спектральних кривих. Наявність чітко виражених спектральних особливостей в області 350–500 нм вказує на їхню мультипольну природу.

Зростання інтенсивності довгохвильового “хвоста” у спектрах суспензій на пізніх стадіях синтезу в основному зумовлене збільшенням геометричних розмірів частинок та появою “нанодротин” діаметром 30–40 нм і довжиною понад 2 мкм. Внесок у цій частині спектра також може йти від збудження коливних мод у коротких паличкоподібних частинках, які можна описати стоячими хвилями із плазмонною довжиною хвилі λ_p , що визначається довжиною частинки $l = n \frac{\lambda_p}{2}$ [42].

IV. ВИСНОВКИ

У цій статті описано метод синтезу частинок срібла наноскопічних розмірів завдяки хімічній реакції відновлення оксиду срібла воднем у водному середовищі. Особливістю описаного методу є використання попередньо синтезованих наночастинок срібла розміром до 10 нм як зародків кристалізації. Наявність зародків веде до зміни кінетики хімічної реакції та, як наслідок, до значного розкиду в розподілі частинок за формою та розмірами порівняно з беззародковим синтезом. Оптичні спектри екстинкції колоїдного срібла відрізняються від спектрів сферичних частинок срібла наявністю довгохвильового “хвоста” та нових смуг в області 350–450 нм, що походять від збудження коливних мод вищих порядків. Для точнішої інтерпретації спектрів бажані оптичні вимірювання окремо для всіх фракцій, наявних у суспензіях. Також важливими є вимірювання спектрів “нанодротин” срібла в поляризованому світлі з електричним вектором, паралельним та перпендикулярним до довшої осі частинки.

Експериментальна частина роботи виконана під час перебування на стажуванні в Клемсонівському університеті (Clemson University, USA). Автор висловлює щире подяку проф. Г. Чуманову за підтримку, плідні дискусії та обговорення результатів.

[1] P. Kamat, J. Phys. Chem. B **106**, 7729 (2002).

[2] D. D. Evanoff, Jr., G. Chumanov, J. Phys. Chem. B **108**, 13957 (2004).

[3] Е. М. Егорова, А. А. Ревина, Т. Н. Ростовщикова, О.

И. Киселева, Вестн. Моск. ун-та, сер. 2. Химия, **42**, 332 (2001).

[4] J. R. Morones, J. L. Elechiguerra, A. Camacho, K. Holt, J. B. Kouri, J. T. Ramirez, M. J. Yacaman, Nanotech-

- nology **16**, 2346 (2005).
- [5] Sung Hoon Jeong, Yun Hwan Hwang, Sung Chu Yi, J. Mater. Sci. **40**, 5413 (2005).
- [6] M. Faraday, Phil. Trans. **147**, 145 (1857).
- [7] D. Mandal, M. E. Bolander, D. Mukhopadhyay, G. Sarkar, P. Mukherjee, Appl. Microbiol. Biotechnol. **69**, 485 (2006).
- [8] P. Mohanpuria, N. K. Rana, S. K. Yadav, J. Nanopart. Res. **10**, 507 (2008).
- [9] R. Patakfalvi, Z. Viranyi, I. Dekany, Coll. Polym. Sci. **283**, 299 (2004).
- [10] R. Keir, D. Sadler, W. E. Smith, Appl. Spectrosc. **56**, 551, (2002).
- [11] N. R. Jana, L. Gearheart, K. Murphy, Chem. Commun. 617 (2001).
- [12] S. A. Kumar *et al.*, Biotechnology Lett. **29**, 439 (2007).
- [13] C. Tian, Z. Kang, E. Wang, B. Mao, S. Li, Z. Su, L. Xu, Nanotechnology **17**, 5681 (2006).
- [14] Qinghua Zeng, Xuchuan Jiang, Aibing Yu, Gaoqing Lu, Nanotechnology **18**, 035708 (2007).
- [15] Y. Sun, Y. Xia, Science 2176 (2002).
- [16] Hoe Jin Hah, Sang Man Koo, Sang Hoon Lee, J. Sol-Gel Sci. Technol. **26**, 467 (2003).
- [17] Yu. V. Bokshits, G. P. Shevchenko, A. N. Pomyavina, S. K. Rakhmanov, Colloid J. **66**, 517 (2004).
- [18] Б. Г. Ершов, Е. В. Абхалимов, Коллоидный журн. **69**, 620 (2007).
- [19] P. C. Lee, D. Meisel, J. Phys. Chem. **86**, 3391 (1982).
- [20] D. L. Van Hyning, C. F. Zukoski, Langmuir **14**, 7034 (1998).
- [21] A. B. R. Mayer, J. E. Mark, Coll. Polym. Sci. **275**, 333 (1997).
- [22] Cheng Jingquan, Yao Suwei, Zhang Weiguo, Zou Yi, Frontiers Chem. China **1**, 418 (2006).
- [23] Hongjin Jiang, Kyoung-sik Moon, Zhuqing Zhang, S. Pothukuchi, C. P. Wong, J. Nanopart. Res. **8**, 117 (2006).
- [24] K. Patel, S. Kapoor, D. P. Dave, T. Mukherjee, J. Chem. Sci. **117**, 53 (2005).
- [25] Б. Г. Ершов, Изв. РАН, сер. хим. **46**, 259 (1997).
- [26] Б. Г. Ершов, Рос. хим. журн. **45**, 20 (2001).
- [27] K. Mallick, M. J. Witcomb, M. S. Scurrall, J. Mater. Sci. **39**, 4459 (2004).
- [28] T. Kempa, R. A. Farrer, M. Giersig, J. T. Fourkas, Plasmonics **1**, 45 (2006).
- [29] R. Jin, YunWei Cao, C. A. Mirkin, K. L. Kelly, G. C. Schatz, J. G. Zheng, Science **294**, 1901 (2001).
- [30] R. Jin, Y. C. Cao, Encai Hao, G. S. Metraux, G. C. Schatz, C. A. Mirkin, Nature **425**, 487 (2003).
- [31] F. Mafune, J. Kohno, Y. Takeda, T. Kondow, J. Phys. Chem. B **104**, 8333 (2000).
- [32] A. Pyatenko, K. Shimokawa, M. Yamaguchi, O. Nishimura, M. Suzuki, Appl. Phys. A **79**, 803 (2004).
- [33] J. Bosbach, D. Martin, F. Stietz, T. Wenzel, F. Trager, Appl. Phys. Lett. **74**, 2605 (1999).
- [34] Z. Liu, H. Wang, H. Li, X. Wang, Appl. Phys. Lett. **72**, 1823 (1998).
- [35] D. D. Evanoff, Jr., G. Chumanov, J. Phys. Chem. B **108**, 13948 (2004).
- [36] О. Д. Куриленко *Краткий справочник по химии* (Наукова думка, Киев, 1974).
- [37] S. Malynych, I. Moroz, V. Kurlyak, Ukr. J. Phys. Opt. **8**, 54 (2007).
- [38] G. Mie, Ann. Phys. **25**, 377 (1908).
- [39] K. L. Kelly, E. Coronado, Lin Lin Zhao, G. C. Schatz, J. Phys. Chem. B **107**, 668 (2003).
- [40] P. M. Tomchuk, N. I. Grigorchuk, Phys. Rev. B **73**, 155423 (2006).
- [41] B. N. Khlebtsov, N. G. Khlebtsov, J. Phys. Chem. C **111**, 11516 (2007).
- [42] G. Schider *et al.*, Phys. Rev. B **68**, 155427 (2003).

SYNTHESIS AND OPTICAL PROPERTIES OF SUPERDISPERSED SILVER AQUEOUS SUSPENSIONS

S. Z. Malynych

*V. E. Lashkaryov Institute for Physics of Semiconductors, NAS Ukraine,
41, Nauky Ave., Kyiv, UA-03028, Ukraine,
Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of Lviv,
8, Kyryla i Mefodija St., Lviv, UA-79005, Ukraine*

Quasispherical nanoparticles and silver nanowires were synthesized via reduction of silver oxide by hydrogen in the water. The technique allows obtaining the nanoparticles in a wide size range from 10 nm to 150 nm and above. 10 nm silver nanoparticles were used as seeds. Experimental optical spectra of silver aqueous suspensions are presented and compared with the calculated ones in the frame of Mie theory for spherical nanoparticles.