

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ І СПОРТУ УКРАЇНИ
МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЧЕПОК АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ

УДК 537.531: 533.951

**ВПЛИВ МЕТАЛЕВИХ НАНОЧАСТИНОК
НА ОПТИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДОГО ТІЛА**

01.04.07 – Фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Одеса – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі математики та математичного моделювання Міжнародного гуманітарного університету.

Науковий керівник доктор фізико-математичних наук, професор
КРАСНИЙ Юрій Петрович,
Міжнародний гуманітарний університет, професор
кафедри математики та математичного моделювання

Офіційні опоненти доктор фізико-математичних наук, професор
ТЮРІН Олександр Валентинович,
НДІ фізики Одеського національного університету імені
І.І.Мечнікова

доктор фізико-математичних наук, професор
ШВЕЦЬ Валерій Тимофійович,
Одеська державна академія холоду, професор кафедри
вищої та прикладної математики

Захист дисертації відбудеться “___” _____ 2011 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К41.053.07 Південноукраїнського національного педагогічного університету імені К.Д. Ушинського за адресою: 65020, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 26.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Південноукраїнського національного педагогічного університету за адресою: 65020, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 26.

Автореферат розісланий “___” _____ 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Х. Тадеуш

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Аналіз літературних даних указує на необхідність теоретичних досліджень, спрямованих на побудову фізико-математичних моделей, здатних описати фізичні властивості наночастинок, які розташовані у різноманітному діелектричному середовищі або напівпровідниках. До наночастинок простих металів дослідники і технологи мають особливий інтерес, оскільки, з одного боку, резонанси їх плазмових коливань розташовані у видимому діапазоні електромагнітного спектру, а з другого боку, наномодифіковані діелектрики і напівпровідники мають унікальні оптичні та фотоелектричні властивості.

Технологічні перспективи щодо використання властивостей плазмонів у металевих наночастинок пов'язані з розробкою та виробництвом наномасштабних хвилеводів, здатних передавати з високою ефективністю електромагнітні сигнали на субмікронні відстані.

Актуальна задача розробки високоефективних напівпровідникових фотоелементів для перетворення сонячної енергії в електричну потребує детальної інформації щодо взаємодії металевих наночастинок і напівпровідникових матеріалів.

Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною з погляду використання результатів у нанотехнологіях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі математики та математичного моделювання Міжнародного гуманітарного університету (м. Одеса). Тема дисертації входить до держбюджетної теми “Визначення механізмів формування сенсibiliзації та керування мікро- та наноструктурами під впливом світла” (номер Державної реєстрації 0109U000930).

Метою дисертаційної роботи є з'ясування механізму впливу металевих наночастинок розміром 10–70 нм на оптичні та фотоелектричні властивості діелектричних і напівпровідникові матеріалів, а також з'ясування механізму згасання плазмових коливань у металевих наночастинок. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі основні завдання:

1. Теоретичне дослідження структури частотного спектру та інших характеристик плазмових коливань у металевих наночастинок сферичної форми радіусом $a = 10 \dots 70$ нм, розташованих у неметалевих твердих тілах;
2. Теоретичне дослідження особливостей згасання плазмових коливань у металевих наночастинок, розташованих у неметалевих твердих тілах;
3. Теоретичне дослідження впливу зовнішнього електричного поля на плазмові коливання у металевих наночастинок;
4. Теоретичне дослідження проходження електромагнітного сигналу вздовж лінійного масиву із металевих наночастинок сферичної форми в неметалевих твердих тілах;
5. Теоретичне дослідження механізмів впливу металевих наночастинок на фотоелектричні властивості напівпровідникових матеріалів.

Об'єктом досліджень є металеві наночастинки сферичної форми (нанокульки) радіусом $a = 10...70$ нм, як індивідуальні, так і, головним чином, розташовані у діелектричному середовищі у вигляді лінійної наноструктури (нанорозмірний ланцюжок).

Предметом дослідження є процеси утворення, розповсюдження і згасання плазмових коливань у металевих нанокульках радіусом $a = 10...70$ нм.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у роботі завдань були використані теоретичний метод апроксимації хаотичних фаз (RPA-метод) та чисельні методи розв'язування відповідних диференціальних рівнянь.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в роботі вперше:

1. Записано рівняння щодо вільних та вимушених поверхневих і об'ємних плазмових коливань у металевих нанокульках радіусом $a = 10...70$ нм, розташованих у будь-якому діелектричному середовищі. Отримано розв'язки цих рівнянь з урахуванням згасання плазмових коливань у цих наночастинках. Встановлено, що зовнішнє однорідне змінне електричне поле взаємодіє виключно з поверхневими дипольними плазмовими коливаннями.
2. Враховано випромінювальне тертя Лоренця як додатковий канал згасання плазмових коливань у металевих наночастинках. Доведено, що згасання таких коливань суттєво залежить від діаметру металевих нанокульок. Визначено оптимальний радіус a_0 металевої нанокульки, за наявності якого згасання плазмових коливань у наночастинках буде мінімальним.
3. Досліджено процес розповсюдження плазмових коливань уздовж одномірного масиву із металевих нанокульок радіусом $a = 10...70$ нм, розташованих на відстані d один від одного ($d > 2a$) у діелектричному середовищі. Встановлено, що при певних параметрах такого наномасштабного хвилеводу у ньому можливе виникнення незгасаючих нелінійних електромагнітних хвиль.
4. Встановлено фактори, які впливають на значне підвищення фотоструму у наномодифікованих напівпровідникових структурах.

Практичне значення отриманих результатів. Побудовано фізико-математичну модель плазмових коливань у металевих наночастинках сферичної форми радіусом $a = 10...70$ нм, розташованих у неметалевих твердих тілах. Модель враховує існування випромінювального тертя Лоренця як додаткового каналу згасання плазмових коливань у металевих наночастинках і таким чином дозволяє точно визначити спектри резонансних частот вільних та вимушених поверхневих і об'ємних плазмових коливань у металевих нанокульках радіусом $a = 10...70$ нм, розташованих у будь-якому діелектричному середовищі. Виявлено можливість визначити оптимальний радіус a_0 металевої нанокульки, при якому згасання плазмових коливань буде мінімальним.

Таким чином, одержані результати приводять до конкретних рекомендацій щодо виготовлення певних наноструктур з урахуванням параметрів одиночної наночастинки. Одержання в технологічному процесі систем наночастинок певного розміру та з певними відстанями між ними надає, наприклад, можливість покращити параметри наномасштабного хвилеводу шляхом контролю коефіцієнта поглинання електромагнітного сигналу уздовж такого хвилеводу.

Варіація ступеню “занурення” металевих наночастинок у напівпровідниковий шар, а також варіація їхнього радіусу надають можливість суттєво впливати на ефективність внутрішнього фотоефекту, що є важливим для підвищення ефективності фотодіодів.

Особистий внесок здобувача. Постановка задачі, інтерпретація і узагальнення одержаних теоретичних, розрахункових та експериментальних результатів, формування основних положень і висновків проведені спільно з науковим керівником проф. Красним Ю.П.

Здобувачу належить отримання основних рівнянь, що описують плазмові коливання, отримання основних аналітичних розв’язків і розрахунків певних параметрів плазмових коливань, що виникають у наночастинок сферичної форми простих металів. Автором проведено аналіз основних рівнянь укладеної математичної моделі, порівняння отриманих теоретичних і експериментальних даних. Всі чисельні розрахунки і результати, наведені у дисертації, були отримані здобувачем власноруч за допомогою комп’ютерних програм, що були складені ним особисто за допомогою мови C++.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 3 конференціях: IV Международная научно-техническая конференция «Датчики, приборы и системы – 2008» (МНТК “ДПС–2008”), Україна, г. Ялта, 14-20 сентября, 2008 г.; V Международная научно-техническая конференция «Датчики, приборы и системы – 2009» (МНТК “ДПС–2009”), Україна, г. Ялта, 13-19 сентября, 2009 г.; International Conference on Nanostructures, WUT, Wroclaw 2009, (Wroclaw University of Technology, Institute of Physics, Польша, г. Вроцлав, 24-27 ноября, 2009 г.).

Публікації. Наведені в дисертації результати були опубліковані в 4 наукових працях у журналах і наукових збірниках, визнаних ВАК України як фахові, в 3 наукових працях у провідних фізичних журналах світу та в 4 тезах наукових конференцій. Загальна кількість складає 11 наукових друкованих праць.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, 5 розділів, 1 додатку, списку літературних джерел та висновків. Повний обсяг дисертації становить 118 друкованих сторінок, у тому числі 23 рисунків, 10 таблиць та списку використаних літературних джерел з 137 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтована актуальність теми, вказана мета роботи, визначені її новизна і практична цінність.

Перший розділ дисертації присвячений аналізу літературних даних з тематики утворення, розповсюдження і згасання плазмових коливань у металевих наночастинках різних форм та розмірів, особливо усередині твердого тіла. У першому розділі надано опис наночастинок, властивості плазмових коливань у цих об'єктах, а також описані методи теоретичного дослідження процесів збудження та згасання плазмових коливань у металевих наночастинках різних форм та розмірів; описано сучасні уявлення про механізми згасання плазмових коливань у металевих наночастинках. Представлено різні фізико-математичні моделі, що описують плазмові коливання у металевих нанокільках різних розмірів та їх резонансні властивості; показано основні переваги та недоліки сучасних методів теоретичного дослідження плазмових коливань у металевих наночастинках різних розмірів, зокрема усередині твердого тіла. Проаналізовано вплив геометричних та інших факторів на резонансні властивості плазмових коливань у металевих наночастинках (у рамках моделі “желе”).

У **другому розділі** надано опис методики теоретичного дослідження процесів виникнення, розповсюдження і згасання плазмових коливань у металевих наночастинках сферичної форми, а саме – методу апроксимації хаотичних фаз (метод RPA). Описано математичну модель для дослідження вільних і вимушених плазмових коливань у наночастинках сферичної форми радіусом $a = 10 \dots 70$ нм при наявності випромінювального каналу згасання цих коливань. Наведено основні формули щодо розрахунків резонансних частот плазмових коливань: частоти власних плазмових поверхневих коливань:

$$\omega_{0l} = \frac{\omega_p}{\sqrt{\varepsilon \cdot (2l+1)/l}} ; \quad (1)$$

частоти власних плазмових об'ємних коливань:

$$\omega_{nl} = \omega_p \sqrt{1 + \frac{X_{nl}^2}{k_{TF}^2 a^2}} , \quad (2)$$

де – ω_p – частота плазмових коливань;
 ε – діелектрична проникність;
 X_{nl} – корені сферичної функції Бесселя;

k_{TF} – обернений радіус Томаса-Фермі;

a – радіус наночастинки сферичної форми.

Одержано висновок, що у металевих наночастинках існує асиметрія стосовно взаємовпливу поверхневих і об'ємних плазмових коливань: об'ємні плазмові коливання впливають на поверхневі плазмові коливання, проте не навпаки. Показано, що згасання $1/\tau$ поверхневих дипольних плазмових коливань у металевих наночастинках суттєво залежить від радіусу a частинок, а саме:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{v_F}{2} \left(\frac{1}{\lambda_B} + \frac{C}{a} \right) + \frac{\omega_1}{3} \left(\frac{\omega_1 a}{v} \right)^3, \quad (3)$$

де – λ_B – довжина вільного пробігу електрона в об'ємному металі;

C – константа ($C \sim 1$);

$\omega_1 = \omega_{01} = \omega_p / \sqrt{3\epsilon}$ – частота поверхневих плазмових коливань дипольного типу;

$v = c / \sqrt{\epsilon}$ – швидкість світла у середовищі, що оточує наночастинку.

Новим у цьому виразі, у порівнянні з відомою формулою щодо “традиційних” каналів згасання коливань, є останній доданок, який описує випромінювальний канал згасання плазмових коливань, пов'язаний з тертям Лоренця.

Показано, що коефіцієнт згасання $1/\tau$ плазмових коливань має свій мінімум, якщо радіус a металевої нанокільки дорівнює:

$$a = a_0 = \sqrt[4]{\frac{9}{2} \frac{v_F \sqrt{\epsilon}}{\omega_p^4} c^3}, \quad (4)$$

тут v_F – швидкість Фермі; ϵ – діелектрична проникність середовища, що оточує наночастинку; c – швидкість світла у вакуумі.

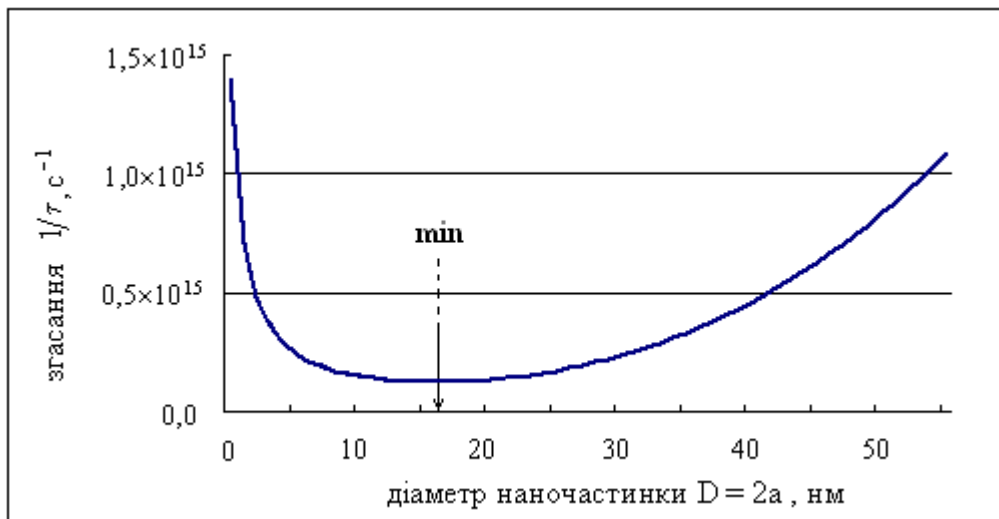


Рис.1. Залежність згасання поверхневих плазмових коливань від діаметру $D=2a$ металевої наночастинки сферичної форми (з урахуванням випромінювального тертя Лоренця)

Таким чином, a_0 є оптимальним радіусом металевої нанокіульки, за яким згасання поверхневих плазмових коливань буде мінімальним, а саме: якщо $a > a_0$, то зростання радіусу металевої нанокіульки приводить до росту величини $1/\tau$, отже і до росту згасання плазмових коливань, тобто воно у значній мірі зумовлене випромінювальним тертям Лоренця; а якщо $a < a_0$, то величина $1/\tau$ зростає разом зі зменшенням радіусу металевої нанокіульки, але в цьому випадку основний внесок у згасання коливань вноситиме розсіювання електронів на поверхні нанокіульки, що узгоджується з експериментом.

Підраховано величини оптимальних радіусів a_0 для золотих, срібних та мідних наночастинок, занурених у різноманітні діелектричні середовища. Результати для золотих нанокіулек, розташованих у склі ($n = 1,46$), добре співпадають з даними експериментів ([1], 1999 г.):

Таблиця 1

Величини оптимальних радіусів a_0 для сферичних металевих наночастинок, розташованих у SiO_2 : порівняння теорії з експериментом [1]

$n = \sqrt{\epsilon}$	a_0 , нм		
	Ag (теорія)	Au (теорія)	Au (експеримент) [1]
SiO_2 , $n = 1,46$	9,18	9,15	≈ 10

У **третьому розділі** описано результати теоретичного дослідження впливу металевих нанокіулек радіусом $a = 10...70$ нм (прості метали) на оптичні властивості діелектричного середовища.

У **підрозділі 3.1.** розглянуто математичну модель, що описує поглинання електромагнітних хвиль металевими нанокіулками радіуса $a = 10...70$ нм, занурених у діелектричне середовище. При цьому вважається, що загальний об'єм металевих наночастинок набагато менше об'єму самого діелектрика, окрім того, ці металеві нанокіульки розподілені у діелектрику хаотично. Одержано, що частоти резонансного поглинання ω'_{nl} мають суттєву залежність від розмірів наночастинок:

$$\omega'_{nl} = \sqrt{\omega_{nl} - 1/\tau_n} \quad (5)$$

Отримано аналітичний вираз діелектричної функції $\varepsilon(\omega)=\varepsilon'(\omega)+i\cdot\varepsilon''(\omega)$ для діелектрику, що оточує металеву наночастинку:

$$\varepsilon'(\omega)=\varepsilon_0+C_0\omega_p^2\sum_{n=0}^{\infty}\frac{f_n}{2\omega'_{nl}}\left[\frac{\omega'_{nl}-\omega}{(\omega'_{nl}-\omega)^2-1/\tau_n^2}+\frac{\omega'_{nl}+\omega}{(\omega'_{nl}+\omega)^2-1/\tau_n^2}\right];$$

$$\varepsilon''(\omega)=C_0\omega_p^2\sum_{n=0}^{\infty}\frac{f_n}{2\omega'_{nl}\cdot\tau_n}\left[\frac{1}{(\omega'_{nl}-\omega)^2-1/\tau_n^2}+\frac{1}{(\omega'_{nl}+\omega)^2-1/\tau_n^2}\right],$$
(6)

де – C_0 – концентрація (частка об'єму) металевих наночастинок у діелектричному середовищі;

τ_n – час існування плазмових коливань із частотою ω_{nl} ;

f_n – потужність осциляторів плазмових коливань із частотами ω_{nl} ($n \geq 0$);

ε_0 – діелектрична проникність середовища, вільного від металевих наночастинок.

Тобто спектр поглинання наномодифікованих діелектриків суттєво залежить від розміру металевих наночастинок.

У підрозділі 3.2. проведено порівняльний аналіз резонансних властивостей поверхневих плазмових коливань. Теоретичні та експериментальні результати щодо відповідних резонансів добре співпадають.

Поверхневі плазмові коливання спричиняють поглинання падаючого електромагнітного випромінювання, встановлено, що при цьому максимум такого поглинання набуває при резонансній частоті $\omega'_1=\sqrt{\omega_1^2-1/\tau^2}$, яка зменшується зі збільшенням радіусу металеві нанокіульки a . На рис. 2 і на рис. 3 представлено експериментальні спектри поглинання світла відповідно золотими нанокіульками різних радіусів (радіус $a= 10\dots75$ нм) і срібними нанокіульками (радіус $a= 10\dots40$ нм), занурених у діелектрик з $n= 2$ [2].

Спектр екстинкції Au-наночастинок

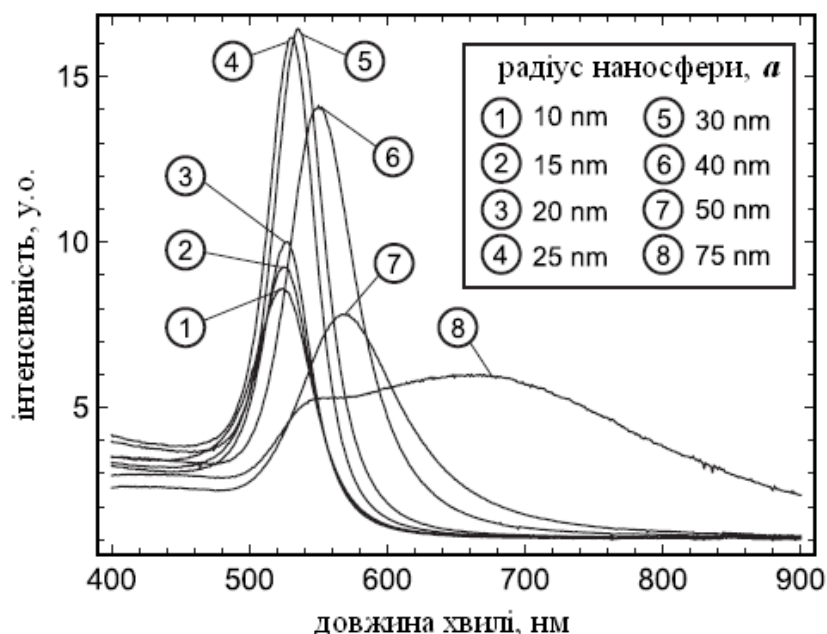


Рис. 2. Результати виміру екстинкції світла для Au -наночастинок різних розмірів, занурених у діелектрик з $n = 2$ [2].

Розбіжність отриманих експериментальних та теоретичних даних знаходиться у рамках (5,7...6,6)% для золотих нанокільок радіусом $a = 10...50$ нм, а також у рамках (0,3...9,6)% для срібних нанокільок радіусом $a = 10...40$ нм, що є цілком задовільним результатом. Тобто отримані нами результати щодо характеристик резонансних частот для поверхневих плазмових коливань у металевих нанокільках “середнього” діапазону розмірів, а також щодо радіаційного каналу згасання поверхневих плазмових коливань у металевих нанокільках (тертя Лоренця) підтверджені експериментально (див. рис. 4).

У **підрозділі 3.3.** описано механізм розповсюдження плазмових коливань уздовж одномірного масиву із металевих нанокільок радіусом $a = 10...70$ нм, розташованих на відстані d один від одного ($d > 2a$). Встановлено, що при певних параметрах такого наномасштабного ланцюжка у ньому можливе виникнення незгасаючих нелінійних електромагнітних хвиль.

Спектр екстинкції Ag-наночастинок

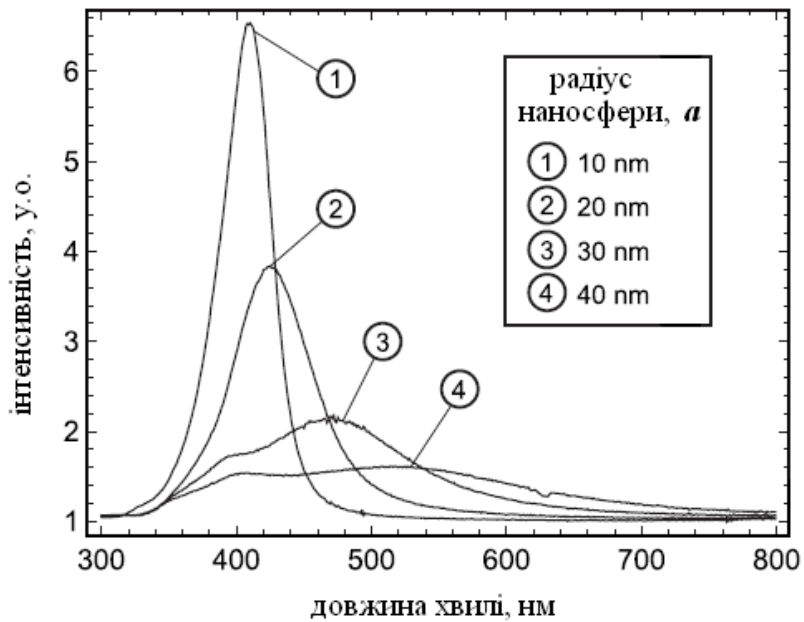


Рис. 3. Результати виміру екстинкції світла для Ag - наночастинок різних розмірів, занурених у діелектрик з $n= 2$ [2].

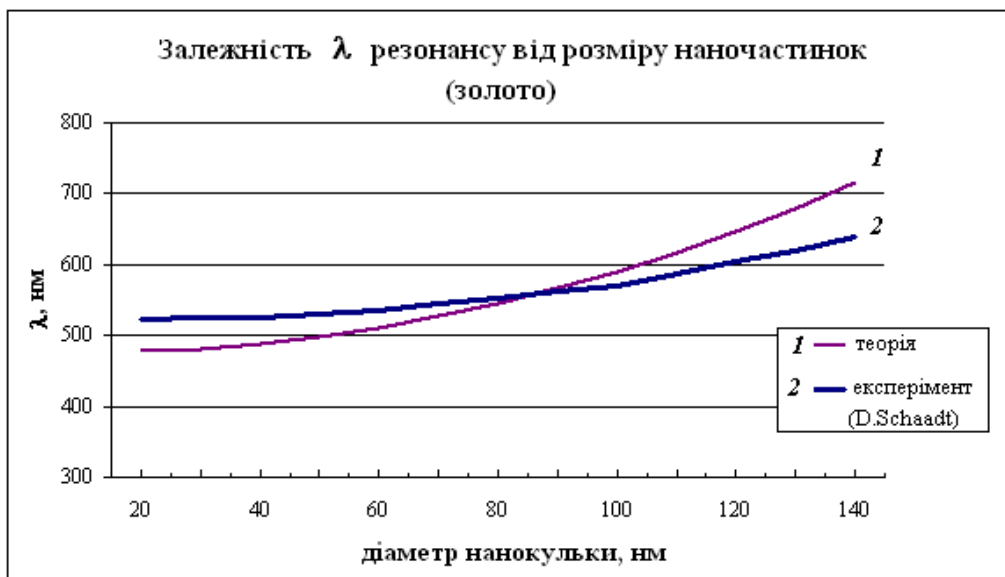


Рис. 4. Порівняння теоретичних та експериментальних даних стосовно залежності λ резонансної хвилі від розміру золотих наночастинок, занурених у діелектрик з $n= 2$.

Встановлено, що при розповсюдженні плазмових коливань уздовж одновимірного масиву із металевих наночастинок радіусом $a= 10...70$ нм виникають поперечні та подовжні плазмові хвилі; встановлено відповідні частоти для поперечних та подовжніх плазмових хвиль, що виникають у наноланцюжку. З'ясовано, що за певних параметрів одновимірного масиву із

металевих нанокулочок і певних довжинах хвиль плазмові хвилі, що можуть розповсюджуватись таким наноланцюжком, стають слабо згасаючими. Цей факт ясно підтверджується експериментами за участю плазмових хвилеводів із золотих нанокулочок.

У **четвертому розділі** проведено дослідження впливу металевих наночастинок на фотоелектричні властивості твердого тіла, розкрито механізм значного зростання фотоструму у наномодифікованих напівпровідникових матеріалах.

У **підрозділі 4.1.** надано пояснення результатів експериментів щодо виміру фотоструму у наномодифікованих напівпровідниках. При цьому порівнювалось співвідношення I_m/I величин фотострумів (I_m) у наномодифікованих золотими наночастинками напівпровідниках і фотострумів у контрольних напівпровідникових зразках (I). У табл. 2 і на рис. 5 наведені теоретичні і експериментальні дані щодо співвідношення I_m/I фотострумів.

Таблиця 2

Порівняння теоретичних і експериментальних даних щодо співвідношення I_m/I фотострумів у випадку не модифікованого (I) та модифікованого золотими наночастинками (I_m) напівпровідникового (Si) шару

a , нм	n_s , $\times 10^8/\text{см}^2$	ω_{\max} (теор.) , еВ	$\hbar\omega_{\max}$ (експ. [3]), еВ	$I_m/I(\omega_{\max})$
25	6,6	2,71	2,70	1,75
40	1,6	2,58	2,48	1,90
50	0,8	2,09	2,25	1,55

(тут: $\hbar\omega_1 = 2,72$ еВ, для Si : $m_n^i = 0,98 m_e$, $m_p^i = 0,52 m_e$, $E_g = 1,14$ еВ, $\epsilon = 12$)

Максимуму співвідношення I_m/I фотострумів (див. Табл. 2) відповідає частота ω_{\max} світлової хвилі.

У **підрозділі 4.2.** проведено аналіз факторів, що спричиняють підвищення ефективності внутрішнього фотоелектричного ефекту у наномодифікованих напівпровідниках. Через те, що процес передачі електромагнітної енергії від металевих наночастинок до оточуючого їх напівпровіднику втілюється за допомогою поверхневих плазмонів, то уся система плазмонів перейде у режим сильного згасання ($\omega_1 \tau \geq 1$). Аналіз теоретичних та експериментальних даних стосовно модифікації напівпровідників металевими наночастинками привів до висновку, що максимальна ефективність взаємодії наночастинок з оточуючим їх середовищем має бути досягнута, якщо створити такі умови: 1) частота світла, що поглинається повинна дорівнювати резонансній частоті $\omega_1 = \sqrt{\omega_1^2 - 1/\tau^2}$; 2)

повне занурення наночастинок у напівпровідник; 3) концентрація металевих наночастинок у напівпровідниковому шарі повинна досягнути певного рівня.

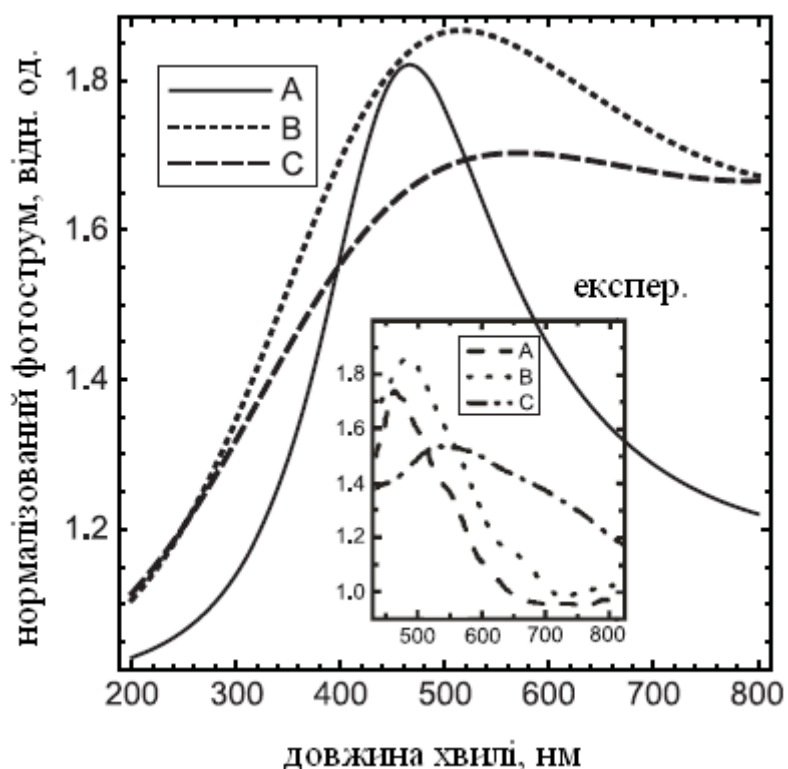


Рис. 5. Порівняння теоретичних і експериментальних [4] даних щодо нормалізованого фотоструму $I_m/I=f(\lambda)$: золоті наносфери різних розмірів, розташовані на напівпровідниковому Si шарі (відповідні параметри щодо випадків А, В і С наведені у Табл. 3).

Таблиця 3

**Параметри металевих наночастинок для експерименту [4]
і для обчислювань (див. Рис. 5)**

варіант	радіус a , нм	концентрація частинок n_s , $\times 10^8/\text{см}^2$	товщина шару, мкм
А	19	6,6	55
В	40	1,6	55
С	50	0,8	55

ВИСНОВКИ

1. Сформульовані диференціальні рівняння, що описують плазмові коливання в наночастинках простих металів розмірами 10...120 нм, що знаходяться в середині діелектричного середовища. Показано ефективність метода RPA, який дозволяє отримувати точне аналітичне рішення для вказаних рівнянь.
2. За допомогою RPA-методу було отримано спектр плазмових коливань – як поверхневих, так і об'ємних – у металевих наночастинках розмірами 10...120 нм, які розташовані у неметалевих твердих тілах, при наявності зовнішнього змінного електричного поля і з урахуванням різних шляхів згасання плазмових коливань. Встановлено, що зовнішнє змінне електричне поле взаємодіє тільки з поверхневими дипольними плазмовими коливаннями.
3. Знайдено, що важливим каналом згасання поверхневих плазмових коливань у металевих наночастинках є випромінювальне тертя Лоренця. З'ясовано, що згасання цих коливань суттєво залежить від розміру металевих наночастинок.
4. Для металевих наночастинок сферичної форми існує оптимальний радіус наносфери a_0 , при якому згасання поверхневих плазмових коливань є мінімальним.
5. Встановлено, що при розповсюдженні поверхневих плазмових коливань уздовж одномірного масиву металевих наночастинок, розташованих у діелектрику виникають поперечні і подовжні плазмові хвилі. З'ясовано, що за певних параметрів такого ланцюжка наночастинок у ньому можливе виникнення незгасаючих нелінійних хвиль.
6. Встановлено, що в умовах резонансу поглинання у металевих наночастинках у режимі взаємодії близького поля відбувається значне (1,5–2 рази) зростання фотоструму в напівпровідникових матеріалах, пов'язане з різними міжзонними оптичними переходами.
7. Знайдені особливості поверхневих плазмових коливань в металевих наночастинках, занурених у неметалеві тверді тіла, можуть бути використані у технологіях сучасної мікро- та наноелектроніки. Зокрема це стосується створення новітніх високоефективних наномасштабних хвилеводів, фотоелементів, світловипромінюючих діодів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Чепок А.О. Затухание электромагнитного сигнала, проходящего по линейному массиву из наночастиц золота / А.О. Чепок // Вісник ЧДТУ. — 2008. — № 3. — С. 24–27.
2. Яцак Л. К теории плазменных колебаний в металлических наночастицах / Л. Яцак, Ю.П. Красный, А.О. Чепок. // Физика низких температур. — 2009, т. 35, №5. — С. 491–502.
3. Чепок А.О. Прохождение электромагнитного сигнала по линейному массиву из наночастиц меди / А.О. Чепок // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2009. — Вып. 1 (31). — С. 143–147.
4. Чепок А.О. Затухание плазменных колебаний в наночастицах серебра, золота и меди с учетом силы трения Лоренца / А.О. Чепок // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2009. — Вып. 2 (32). — С. 187–190.
5. Jacak J. Surface and volume plasmons in metallic nanospheres in a semiclassical RPA-type approach: Near-field coupling of surface plasmons with the semiconductor substrate / J. Jacak, J. Krasnyj, W. Jacak, R. Gonczarek, A. Chepok, L. Jacak // Phys. Rev. B — 2010. — №82. — P. 035418 [14 pp.].
6. Jacak W. Radius dependent shift in surface plasmon frequency in large metallic nanospheres: Theory and experiment / W. Jacak, J. Krasnyj, J. Jacak, R. Gonczarek, A. Chepok, L. Jacak, D. Z. Hu, D. Schaadt // J. Appl. Phys. — 2010. — №107. — P. 124317 [13 pp.].
7. Jacak W. Undamped collective surface plasmon oscillations along metallic nanosphere chains / W. Jacak, J. Krasnyj, J. Jacak, A. Chepok, L. Jacak, W. Donderowicz, D. Z. Hu, and D. Schaadt. // J. Appl. Phys. — 2010. — №108. — P. 1 [13 pp.].
8. Чепок А.О. Сферическая наночастица благородных металлов как сенсор оптического наноустройства / А.О. Чепок, С.Ю. Крапивный // IV Міжнародна науково-техніч. конф. “Датчики, прилади та системи – 2008”, Ялта, вересень 2008. — Збірка тез доп. за матеріалами МНТК “ДПС–2008”. — Черкаси. — 2008. — С. 51–53.
9. Чепок А.О. On electromagnetic signal propagation in silver nanochains / А.О. Чепок, С.Ю. Крапивный // V Міжнародна науково-техніч. конф. “Датчики, прилади та системи – 2009”, Ялта, вересень 2009. — Збірка тез доп. за матеріалами МНТК “ДПС–2009”, Черкаси: “Брама України”. — С. 120–122.
10. Чепок А.О. Plasmon modes' damping in silver nanoparticles taking into consideration Lorentzian frictional force / А.О. Чепок // V Міжнародна науково-техніч. конф. “Датчики, прилади та системи – 2009”, Ялта, вересень 2009. — Збірка тез доп. за матеріалами МНТК “ДПС–2009”, Черкаси: “Брама України”. — С. 117–119.

11. Jacak L. Plasmons in metallic nanoparticles: towards efficiency enhancement of metal-nano-modified solar cells / Jacak L., R. Gonczarek, J. Jacak, W. Donderowicz, W. Jacak, J. Krasnyj, A. Chepok, D. Z. Hu, D. Schaadt // Proc. Intern. Conf. on Nanostructures, WUT, Wroclaw (Poland). — 2009. — P.107–115.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Krenn J. R. Squeezing the optical near-field zone by plasmon coupling of metallic nanoparticles / J. R. Krenn, A. Dereux, J. C. Webber, E. Bourillot, Y. Lacroute, J. P. Goudonnet, G. Schider, W. Gostschy, A. Leitner, F. R. Aussenegg, C. Girard // Phys. Rev. Lett. 82. — 1999. — P. 2590–2593.
2. Jacak W. Radius dependent shift in surface plasmon frequency in large metallic nanospheres: Theory and experiment / W. Jacak, J. Krasnyj, J. Jacak, R. Gonczarek, A. Chepok, L. Jacak, D. Z. Hu, D. Schaadt // J. Appl. Phys. — 2010. — №107. — P. 124317 [13 pp.].
3. Jacak J. Surface and volume plasmons in metallic nanospheres in a semiclassical RPA-type approach: Near-field coupling of surface plasmons with the semiconductor substrate / J. Jacak, J. Krasnyj, W. Jacak, R. Gonczarek, A. Chepok, L. Jacak // Phys. Rev. B — 2010. — №82. — P. 035418 [14 pp.].
4. Schaadt D. M. Enhanced semiconductor optical absorption via surface plasmon excitation in metal nanoparticles / D. M. Schaadt, B. Feng, E. T. Yu // Appl. Phys. Lett. 86. — 2005. — P. 063106–063109.

АНОТАЦІЯ

Чепок А.О. Вплив металевих наночастинок на оптичні та фотоелектричні властивості твердого тіла. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Міжнародний гуманітарний університет (м. Одеса).

В дисертації на основі проведених за допомогою методу апроксимації “хаотичних фаз” (RPA-метод) з’ясовано структуру частотного спектру та інші характеристики плазмових коливань у металевих наночастинок сферичної форми радіусом $a = 10 \dots 70$ нм, розташованих у неметалевих твердих тілах; отримано рівняння щодо вільних та вимушених поверхневих і об’ємних плазмових коливань у металевих нанокільках радіусом $a = 10 \dots 70$ нм, розташованих у будь-якому діелектричному середовищі. Отримано розв’язки цих рівнянь з урахуванням згасання плазмових коливань у цих наночастинок і встановлено, що зовнішнє однорідне змінне електричне поле взаємодіє виключно з поверхневими дипольними плазмовими коливаннями.

З’ясовано особливості згасання плазмових коливань у металевих наночастинок, розташованих у неметалевих твердих тілах; враховано випромінювальне тертя Лоренця як додатковий канал згасання плазмових коливань у металевих наночастинок і доведено, що згасання таких коливань суттєво залежить від діаметру металевих нанокільок. Визначено оптимальний радіус a_0 металевої нанокільки, за наявності якого згасання плазмових коливань у наносфері буде мінімальним.

Досліджено вплив зовнішнього електричного поля на плазмові коливання у металевих наночастинок. Досліджено проходження електромагнітного сигналу вздовж лінійного масиву із металевих наночастинок сферичної форми в неметалевих твердих тілах. Надано опис (моделювання) процесу розповсюдження плазмових коливань уздовж одномірного масиву із металевих нанокільок радіусом $a = 10 \dots 70$ нм, розташованих на відстані d один від одного ($d > 2a$). Також встановлено, що при певних параметрах такого наномасштабного ланцюжка у ньому можливе виникнення незгасаючих нелінійних електромагнітних хвиль.

Досліджено вплив ймовірних факторів, що впливають на значне підвищення фотоструму у наномодифікованих напівпровідникових фотодіодних структур. Визначено роль геометричного фактору (ступеня площини контакту металевої нанокільки з напівпровідниковим шаром) на підвищення фотоструму у наномодифікованих напівпровідниках.

Ключові слова: плазмон, плазмовий резонанс, металеві наночастинок, діелектрики.

АННОТАЦИЯ

Чепок А.О. Влияние металлических наночастиц на оптические и фотоэлектрические свойства твердого тела. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Международный гуманитарный университет (г. Одесса).

В диссертации на основе проведенных с помощью метода аппроксимации «хаотических фаз» (RPA-метод) сформулированы и решены дифференциальные уравнения, описывающие плазменные колебания в наночастицах простых металлов размерами 10...120 нм, находящихся внутри диэлектрика.

Выяснена структура частотного спектра и другие характеристики плазменных колебаний в металлических наночастицах сферической формы радиусом $a = 10...70$ нм, расположенных в неметаллических твердых телах; получены уравнения, описывающие свободные и вынужденные поверхностные и объемные плазменные колебания в металлических наносферах радиусом $a = 10...70$ нм, расположенных в какой-либо диэлектрической среде. Получены решения этих уравнений с учетом затухания плазменных колебаний в наночастицах и установлено, что внешнее однородное переменное электрическое поле взаимодействует исключительно с поверхностными дипольными плазменными колебаниями.

Выяснены особенности затухания плазменных колебаний в металлических наночастицах, расположенных в неметаллических твердых телах; учтено излучательное трение Лоренца как дополнительный канал затухания плазменных колебаний в металлических наночастицах и доказано, что затухание плазменных колебаний существенно зависит от диаметра металлических наносфер. Определен оптимальный радиус a_0 металлической наносферы, при котором затухание плазменных колебаний будет минимальным.

Исследовано влияние внешнего электрического поля на плазменные колебания в металлических наночастицах. Исследовано прохождение электромагнитного сигнала вдоль линейного массива из металлических наночастиц сферической формы в неметаллических твердых телах. Дано описание процессов распространения плазменных колебаний вдоль одномерного массива из металлических наносфер радиусом $a = 10...70$ нм, находящихся друг от друга на расстоянии d ($d > 2a$). Установлено, что при определенных параметрах такого наномасштабного волновода в нем могут возникать незатухающие электромагнитные волны.

Исследовано влияние вероятных факторов, влияющих на значительное увеличение фототока в наномодифицированных полупроводниковых фотодиодных структурах. Определена роль геометрического фактора (площади

контакта металлической наночастицы с полупроводниковым слоем) на повышение фототока в наномодифицированных полупроводниках.

Ключевые слова: плазмон, плазменный резонанс, металлические наночастицы, диэлектрики.

SUMMARY

Chepok A.O. Influence of metallic nanoparticles on the optical and photoelectric properties of Solids. – Manuscript.

Thesis for degree of candidate of physical and mathematical sciences in the speciality 01.04.07 – Solid State Physics. – International Humanitarian University, Odesa, 2010.

The thesis is devoted to researching into the effects of plasmon excitations in metallic nanoparticles on the optical and photoelectric properties of non-metallic Solids.

A random-phase-approximation semiclassical scheme for the description of plasmon excitations in large metallic nanospheres, with a radius range of 10–60 nm, is developed in an all-analytical version, with inclusion of irradiation phenomena. The spectrum of plasmons is determined for both surface- and volume-type excitations and their mutual connections. It is demonstrated that only surface plasmons of dipole-type can be excited by homogeneous dynamical electric field. The Lorentz friction due to irradiation of electromagnetic wave by plasmon oscillations is analyzed with respect to the sphere dimension. The resulting shift in resonance frequency turns out to be strongly sensitive to the sphere radius. The various channels for the damping of surface plasmons are evaluated and a predominant role of the irradiation losses is indicated for large metallic nanospheres, with radius greater than 10 nm. The resulting shift in resonance frequency due to plasmon damping is compared with experimental data for various sphere radii.

The form of electromagnetic e-m response of the system of metallic nanospheres embedded in the dielectric medium is found. The theoretical predictions are verified by a measurement of extinction of light due to plasmon excitations in nanosphere colloidal water solutions, for Au and Ag metallic components with radius from 10 to 75 nm. Theoretical predictions and experiments clearly agree in the positions of surface plasmon resonances and in an emergence of the first volume plasmon resonance in the e-m response of the system for limiting big nanosphere radii, when dipole approximation is not exact.

Wave-type collective oscillations of surface plasmons in long chains of metallic nanospheres are described. The undamped region for collective plasmon propagation along the metallic chain is found in agreement with previous numerical simulations.

The damping-caused plasmon resonance shifts are compared with the experimental data for metallic nanoparticles of different sizes located in a dielectric medium or on the semiconductor substrate. The strong enhancement of energy transfer from the surface plasmon oscillations to the semiconductor substrate is explained in the regime of a near-field coupling of surface plasmons with

semiconductor electrons in agreement with recent experimental observations for metallicity surface-nanomodified photo-diode systems.

Key words: plasmon, plasmon resonance, metallic nanoparticles, dielectrics.