

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

**ПЛАЗМОННІ ЕФЕКТИ В КОМПОЗИТАХ
НА ОСНОВІ НАНОЧАСТИНОК
ШЛЯХЕТНИХ МЕТАЛІВ**

Монографія

Львів
2025

УДК [533.9:539:535]-022.532:004.94

ПЗ9

Автори:

Іван Болеста, Богдана Калівошка,
Володимир Капустяник, Олексій Кушнір

Рецензенти:

д-р фіз.-мат. наук, проф. **Ігор Столярчук**
(Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка);
канд. фіз.-мат. наук, доц. **Петро Трохимчук**
(Волинський національний університет імені Лесі Українки);
д-р фіз.-мат. наук, проф. **Григорій Ільчук**
(Національний університет «Львівська політехніка»)

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Львівського національного університету імені Івана Франка
(протокол № 88/9 від 24 вересня 2025 року).*

*Монографія підготовлена завдяки підтримці
Міністерства освіти і науки України*

Плазмонні ефекти в композитах на основі наночастинок

ПЗ9 **шляхетних металів** : монографія / [І. Болеста, Б. Калівошка, В. Капустяник, О. Кушнір]. – Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2025. – 168 с.

ISBN 978-617-10-0950-9

Присвячено висвітленню результатів досліджень плазмонних ефектів у композитах на основі наночастинок шляхетних металів, проведених авторами протягом останніх років. Розглянуто технологічні аспекти, проаналізовано результати експериментальних досліджень, наведено дані комп'ютерного моделювання і відповідні теоретичні моделі, які пояснюють процеси та ефекти у таких матеріалах.

Для спеціалістів у галузі наноелектроніки, плазмоніки, а також для студентів старших курсів технічних і фізичних спеціальностей.

УДК [533.9:539:535]-022.532:004.94

© Болеста І., Калівошка Б., Капустяник В.,
Кушнір О., 2025

© Львівський національний університет
імені Івана Франка, 2025

ISBN 978-617-10-0950-9

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- МК – металічні кластери;
НЧ – наночастинки;
ФК – фрактали;
АОД – агрегація, обмежена дифузією;
МДД – метод дискретних диполів;
ДДА – дискретно-дипольна апроксимація;
FDTD – метод скінченних різниць у часовій області (*англ.* finite-difference time-domain);
GMM – загальна теорія Мі для багатьох частинок (generalized multipole method);
ППР – поверхневий плазмонний резонанс.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	3
ВСТУП	8
<hr/>	
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО НАНОЧАСТИНКИ І КЛАСТЕРИ	16
1.1. Типи кластерів	19
1.2. Особливості магічних кластерів. Природа магічних чисел	21
1.3. Зіставлення металічних кластерів з іншими фізичними системами	25
1.4. Деякі фізичні параметри металічних кластерів	28
1.5. Якісні уявлення про електронну структуру металічних кластерів	31
1.6. Технології отримання кластерів	34
<hr/>	
РОЗДІЛ 2. ОПТИЧНІ РЕЗОНАНСИ У НАНОЧАСТИНКАХ	37
2.1. Поверхневі плазмони	37
2.2. Оптичний резонанс у малих частинках	39
2.3. Електродинамічні властивості суцільних середовищ. Модель Лоренца	42
2.4. Діелектрична проникність металів	53
2.4.1. Зв'язок оптичних констант з діелектричною проникністю	53

2.4.2. Модель Друде.....	54
2.4.3. Розмірний ефект діелектричної проникності.....	60

РОЗДІЛ 3. ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

У НАНОПЛАЗМОНЦІ.....	63
3.1. Теорія Мі для розрахунку плазмонних спектрів наночастинок.....	63
3.2. Метод дискретних диполів (МДД).....	65
3.3. Квазістатичне наближення.....	69
3.3.1. Металічна кулька у діелектричному середовищі.....	70
3.3.2. Металічний сфероїд у діелектричному середовищі.....	70
3.4. Інтегрування рівнянь Максвелла у часовій області.....	71
3.4.1. Рівняння Максвелла.....	72
3.4.2. Метод скінченних різниць у часовій області.....	75
3.4.3. Алгоритм Йі.....	77
3.4.4. Ідеально узгоджені шари (PML).....	83
3.4.5. Реалізація моделей дисперсних середовищ для методу FDTD.....	90
3.4.6. Метод повного і розсіяного поля (Total / Scattered field).....	93
3.5. Розрахунок у частотній області.....	95
3.5.1. Алгоритм Ray-by-Ray Integration.....	97

РОЗДІЛ 4. ФРАКТАЛЬНІ КЛАСТЕРИ

І ЛОКАЛЬНІ ПОЛЯ.....	101
4.1. Фрактали і фрактальна розмірність.....	101
4.2. Механізми росту фрактальних кластерів.....	102

4.3. Особливості плазмонних збуджень у фрактальних кластерах.....	103
4.3.1. Моделювання росту фрактальних кластерів.....	104
4.3.2. Розрахунок фрактальної розмірності	105
4.3.3. Програма розрахунку спектрів екстинкції на основі теорії Мі	105
4.3.4. Розрахунок спектрів екстинкції димерів	107
4.4. МДД для кластерів наночастинок.....	114
4.5. Розрахунок спектрів екстинкції фрактальних кластерів.....	116

РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ ЛОКАЛЬНИХ ПОЛІВ НА ЛІНІЙНІ ТА НЕЛІНІЙНІ СПРИЙНЯТЛИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ.....

5.1. Формування модельної структури плівки	120
5.2. Модель розрахунку локальних полів	122
5.3. Розрахунок полів підсилення нанотонких плівок.....	125
5.4. Експериментальне виявлення локального підсилення поля.....	127

РОЗДІЛ 6. ВЗАЄМОДІЯ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ ІЗ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИЧНІСТЮ В КОМПЗИТАХ «КРИСТАЛ DMAALS + НАНОЧАСТИНКИ СРІБЛА».....

6.1. Природа сегнетоелектричного фазового переходу в кристалі DMAALS	135
6.2. Технологія отримання плазмонних композитів «сегнетоелектрик+НЧ срібла».....	136
6.3. Аналіз морфології поверхні композита «кристали DMAALS+НЧ срібла»	137

6.4. Температурні залежності спектрів поверхневого плазмонного резонансу композитів «кристали DMAAIS+НЧ срібла»	140
6.5. Вплив сегнетоелектричного фазового переходу на спектри поверхневого плазмонного резонансу композитів «кристали DMAAIS+НЧ срібла»	144
ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ	152
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	155

Наукове видання

Болеста Іван Михайлович,
Калівошка Богдана Михайлівна,
Капустяник Володимир Богданович,
Кушнір Олексій Олександрович

**ПЛАЗМОННІ ЕФЕКТИ В КОМПОЗИТАХ
НА ОСНОВІ НАНОЧАСТИНОК
ШЛЯХЕТНИХ МЕТАЛІВ**

Монографія

Редактор *Оксана Яремчук*
Комп'ютерне верстання *Вікторії Лоїк*
Обкладинка *Маргарити Білобринь*

Формат 60x84/16.
Умовн. друк. арк. 9,8. Тираж 20 прим.

Видавець та виготовлювач:
Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Університетська, 1, м. Львів, 70007.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції.
Серія ДК № 3059 від 13.12.2007 р.

Видруковано у друкарні ТОВ "Бук-Друк"
вул. Мала Бердичівська, 17а, Житомир, 10014
тел. 073 101 22 33, e-mail: bookovych@gmail.com
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи.
Серія ДК № 5610 від 21.09.2017 р.