

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ПАВЛИНЮК Олег Романович

УДК 535.13:537.226.83:537.874:
537.31:532.5.013

**ЛАЗЕРНО-ІНДУКОВАНІ ПОВЕРХНЕВІ СТРУКТУРИ ТА ВПЛИВ
ТРАНСПОРТУ ПОВЕРХНЕВОГО ЗАРЯДУ НА
ЕЛЕКТРОГІДРОДИНАМІЧНІ ЯВИЩА**

01.04.02 — Теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка МОН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Дацюк Віталій Васильович,
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка, провідний науковий співробітник
фізичного факультету.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Семчук Олександр Юрійович,
Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАН України,
завідувач відділу фізики і хімії поверхні наносистем;
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Коротєєв Вадим Вячеславович,
Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова
НАН України, старший науковий співробітник
відділу теоретичної фізики.

Захист відбудеться «11» травня 2021 р. о 14¹⁵ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.08 Київського національного університету імені Тараса Шевченка МОН України за адресою: м. Київ, пр. Глушкова, 4, фізичний факультет, ауд. 500.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці ім. М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: м. Київ, вул. Володимирська, 58 або на сайті Науково-консультаційного центру Київського національного університету імені Тараса Шевченка за посиланням (<http://scc.univ.kiev.ua/abstracts>) .

Автореферат розісланий « » квітня 2021 р.

В. о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради Д 26.001.08,
доктор фізико-математичних наук

І. Ю. Дорошенко

І. Ю. Дорошенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сили, що діють на масивні (англ. ponderous) тіла з боку електричного поля й змушують їх рухатися (англ. motive), називають пондеромоторними (англ. ponderomotive). Пондеромоторний вплив електромагнітного поля на діелектричні тіла широко використовується в сучасній науці та новітніх технологіях. Зокрема, за допомогою світла можна утримувати (лазерна пастка), переміщувати (лазерний пінцет), обертати (оптичний гайковий ключ) чи деформувати (оптичний розтягувальний пристрій) мікроскопічні частинки. Пондеромоторні сили також дуже важливі в оптомеханічних приладах, системах лазерного розділення ізотопів, відіграють роль у лазерній абляції і повинні враховуватись у системах глобального позиціонування (GPS-навігації). За допомогою лазерного пінцета запропоновані способи вимірювання малих сил та зміщень порядку кількох ангстрем, локальної в'язкості рідин, оцінюючи електромагнітні сили при переміщенні чи обертанні частинок в рідині.

Під дією фемтосекундних лазерних імпульсів на поверхнях діелектриків, напівпровідників і металів утворюються наноструктури, зокрема лазерно-індуковані періодичні поверхневі структури (ЛППС) [1*-3*]. Широкі дослідження ЛППС проводяться в багатьох лабораторіях, у тому числі в Центрі колективного користування приладами «Лазерний фемтосекундний комплекс» НАН України та на кафедрі експериментальної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Проте строгих теорій утворення цих структур на сьогоднішній день ще не побудовано. Тому важливо та актуально вивчити та змоделювати пондеромоторний вплив електромагнітного поля для таких явищ.

Одним із основних напрямів сучасних біологічних наук і технологій є дослідження електромеханіки мікрочастинок у живих клітинах чи схожих на них штучних об'єктах [4*-6*]. Значна частина вказаних досліджень зосереджена на маніпулюванні мікрочастинками, розподіленими у діелектричній краплині відповідних розмірів [7*-12*]. В них електричне поле використовується як інструмент для переміщення мікрочастинок або рідини. Станом на сьогодні дуже бурхливо розвивається міждисциплінарна галузь науки, присвячена дослідженню та опису поведінки малих (порядку мікро- чи нанолітра) об'ємів та потоків рідин — так звана мікрофлюїдика. Тому дослідження механічного впливу електромагнітного поля в таких системах є важливим та актуальним, адже воно може надати додаткові можливості контролю та маніпулювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є частиною досліджень, що проводились на кафедрі теоретичної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка в рамках комплексної наукової програми “Конденсований стан — фізичні основи новітніх технологій”. Зміст роботи узгоджений з планами роботи кафедри та факультету за держбюджетними темами: “Фунда-

ментальні дослідження в галузі фізики конденсованого стану і елементарних частинок, астрономії і матеріалознавства для створення основ новітніх технологій” (№ ДР0111U004954), “Взаємодія частинок, хвиль і електромагнітного поля з конденсованим середовищем, атмосферою, магнітосферою, наноструктурами і метаматеріалами” (№ ДР 0116U002563), “Моделювання нерівноважних станів і взаємодії підсистем конденсованих середовищ, зумовлених зовнішніми впливами” (№ ДР 0119U100183) та “Моделювання оптичних властивостей гібридних органічно-неорганічних плазмонних нано-структур для застосувань у біо- та нано-фотоніці” (№ ДР 0120U102174).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи — встановити закономірності утворення лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур та врахувати транспорт поверхневого заряду в електрогідродинамічній теорії краплин.

Відповідно до мети ставилися наступні завдання:

1. Визначитися із математичним апаратом, необхідним для моделювання пондеромоторного впливу електромагнітного поля на діелектричні тіла.
2. Встановити значення механічного тиску світла в утворенні лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур.
3. З'ясувати роль об'ємних плазмон-поляритонів в утворенні лазерно-індукованих структур.
4. Узагальнити електрогідродинамічну теорію Тейлора-Мелчера, врахувавши електричні та дифузійні поверхневі струми, а також розпад поверхневого заряду.

Об'єкт дослідження — лазерно-індуковані періодичні поверхневі структури та діелектричні краплини, занурені в рідкий діелектрик в зовнішньому електричному полі.

Предмет дослідження — механізми утворення лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур та значення транспорту поверхневого заряду в електрогідродинаміці краплин.

Методи дослідження. У роботі використовуються математичний апарат та методи класичної електродинаміки, електрогідродинаміки, електромеханіки та електрокінетики, застосовується тензор електромагнітних напружень Максвелла та розв'язок кінетичного рівняння Больцмана в наближенні часу релаксації, теорія капілярних явищ Релея та математичні методи комп'ютерного моделювання. Аналітичні результати порівнюються із відповідними експериментальними даними, отриманими іншими дослідниками.

Наукова новизна отриманих результатів. Під час проведення досліджень у дисертаційній роботі було отримано ряд нових та важливих теоретичних результатів:

— Передбачення теоретичних моделей, що використовують різні форми тензора напружень Максвелла (Лоренца, Мінковського, Айнштейна-Лауба, Абрахама), порівнюються між собою та дослідними даними щодо обертання, де-

формацій та руйнування дрібних діелектричних краплин під дією сталого електричного поля або світла.

— Проведено обчислення, які ілюструють електрострикційний механізм утворення ЛППС, з урахуванням інтерференції падаючого електромагнітного поля та збудженого у твердому тілі поверхневого плазмон-поляритону.

— Вперше визначено роль об'ємних плазмон-поляритонів в утворенні лазерно-індукованих структур. У рамках цього дослідження

- виходячи з кінетичного рівняння Больцмана, отримано вираз для просторово-дисперсійної поздовжньої діелектричної проникності, яка залежить від квадрату хвильового числа (параметра рівняння Гельмгольца), а не хвильового вектора;

- коефіцієнти Френеля узагальнені на випадок збудження поздовжніх електромагнітних хвиль;

- проведено детальні обчислення без використання підгінних параметрів, які пояснили зсув в область вищих частот і розширення поверхневого плазмонного резонансу пучка срібних нанокул, а також зникнення плазмонного резонансу для золотих сферичних частинок з радіусом близько 2 нм.

— Теорію Тейлора-Мелчера, відому як електростатодинаміку, узагальнено, враховуючи електричні та дифузійні поверхневі струми, а також розпад поверхневого заряду. Використовуючи пропоновану теорію,

- вперше визначено залежність ефективної провідності та поляризованості кулі від кутового розподілу поля, що передбачає існування нелокальних явищ нового типу;

- визначено умови застосування моделі неідеальних діелектриків Тейлора-Мелчера;

- відповідно до традиційної електростатодинаміки, дійсна частина фактору Клаузіуса-Моссотті, знайдена для сталого поля, є однозначною функцією двох параметрів, а саме, провідностей кулі та зовнішнього середовища. В дисертації ця величина залежить від більшої кількості параметрів і, у випадку сталого поля, може змінюватися від значення, визначеного для ідеального діелектрика, до значення ідеального провідника, навіть для частинки гарного ізолятора;

- деякі експериментальні результати щодо електростатодинамічної (ЕГД) циркуляції рідини та діелектрофорезу (ДЕФ) мікрочастинок у діелектричних краплях пояснено вперше або по-новому;

- частоти інверсії та перегину діелектрофорезу визначено з урахуванням затухання поверхневого заряду.

Практичне значення отриманих результатів. Оскільки лазерно-індуковані періодичні поверхневі структури знаходять надзвичайне широке застосування в новітніх технологіях (зокрема нанотехнологіях), то розуміння принципів та закономірностей їх утворення приведе до підвищення якості виробництва і, відповідно, ефективності побудованих з їх використанням пристроїв, а також дозволить зменшити ресурсні затрати на генерування таких структур. Удосконалення електростатодинамічної моделі Тейлора-Мелчера має значну

вагу для біофізики та медицини.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною науковою працею, в якій представлені ідеї та результати автора, що дозволили досягнути виконання поставлених завдань.

Використані в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання і використані лише для підтримки ідей здобувача. Усі наукові результати, положення і висновки, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Вибір тематики, постановка мети та завдань дослідження, аналіз отриманих результатів здійснено дисертантом разом з науковим керівником д.ф.-м.н., проф. Дацюком В. В. Усі аналітичні розрахунки та математичні моделювання проводилися дисертантом особисто під керівництвом Дацюка В. В.

Особистий внесок здобувача у статті [1–5], виконані у співавторстві з науковим керівником, полягає у проведенні на паритетних засадах аналітичних розрахунків, певної частини числових розрахунків, побудові графіків та аналізі отриманих результатів. Зокрема, здобувач порівнював відомі форми тензора Максвелла (на паритетній основі) та виконав комп'ютерне моделювання пружних деформацій діелектричних куль в електричному полі [1]. Проводив аналітичні та числові розрахунки розподілу нормального тиску і тангенціального напруження на поверхні твердого тіла, розподілу густини об'ємних сил [2]. Досліджував збудження поздовжніх мод в різних системах та їх роль в утворенні ЛППС [3]. Виконав узагальнення електрогідродинамічної моделі Тейлор-Мелчера (на паритетній основі) та комп'ютерне моделювання електрогідродинамічних потоків рідини [4, 5]. Здобувач написав основний текст публікацій [2, 4] та брав активну участь в підготовці інших публікацій [1, 3, 5] тез доповідей [6–10].

Апробація матеріалів дисертації. Результати, представлені в роботі, були оприлюднені на 6-ти міжнародних наукових конференціях: International Summer School and International research and practice conference, August 25 - September 1, 2013, Lviv, Ukraine; 23rd International Conference: Week of Doctoral Student, June 3-5, 2014, Prague, Czech Republic; International research and practice conference “Nanotechnology and Nanomaterials” (NANO-2015), August 26-29, 2015, Lviv, Ukraine; International research and practice conference “Nanotechnology and Nano-materials” (NANO-2016), August 24-27, 2016, Lviv, Ukraine; IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 16-18, 2019, Kyiv, Ukraine; IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 22-24, 2020, Kyiv, Ukraine.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 10 наукових робіт, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях [1–5], 4 з яких входять до науково-методичної бази Scopus: “Physical Review A” (impact factor 2.777), “Nanoscale Research Letters” (impact factor 3.581), “Ukrainian Journal of Physics” (SNIP 0.314); та 5 публікацій [6–10] є матеріалами і тезами доповідей на міжнародних наукових фахових конференціях, які додатково відображають зміст

дисертації та результати її апробації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій українською та англійською мовами, переліку опублікованих праць здобувача за темою дисертації, вступу, п'ятьох розділів, висновків та списку використаних джерел, що містить 122 найменування, та додатку. Загальний обсяг дисертації становить 120 сторінок. Робота містить 14 рисунків та 4 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується вибір теми дослідження та актуальність, вказується на її зв'язок з науковими програмами, планами, темами, формулюються мета, завдання та методи досліджень, відображається наукова новизна і практичне значення отриманих результатів. Також вказується особистий внесок автора, надаються відомості про апробацію результатів, публікації, структуру та обсяг дисертації.

В **розділі 1** розглядається одна з фундаментальних фізичних проблем — обчислення механічної сили, що діє на діелектричне тіло з боку електромагнітного поля. Згідно Максвеллу [13*] усереднена за часом механічна сила, яка діє на тіло виражається через інтеграл по поверхні

$$\mathbf{F} = \oint \langle \mathbf{T} \rangle \cdot \hat{\mathbf{n}} dA, \quad (1)$$

де $\hat{\mathbf{n}}$ – зовнішній одиничний вектор нормалі до поверхні, \mathbf{T} – тензор електромагнітних напружень Максвелла, дужки позначають усереднення по часу. На початку двадцятого сторіччя теорію Максвелла було узагальнено на випадок механічної дії електромагнітного поля у діелектричному та магнітному середовищі. Наступні форми тензора Максвелла були запропоновані Лоренцом [14*]

$$T_{ij} = \epsilon_0 E_i E_j + \mu_0 H_i H_j - \frac{1}{2} (\epsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2) \delta_{ij}, \quad (2)$$

Айнштайном та Лаубом [15*]

$$T_{ij} = E_i D_j + H_i B_j - \frac{1}{2} (\epsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2) \delta_{ij}, \quad (3)$$

Мінковським [16*]

$$T_{ij} = E_i D_j + H_i B_j - \frac{1}{2} (\mathbf{E}\mathbf{D} + \mathbf{H}\mathbf{B}) \delta_{ij} \quad (4)$$

та Абрахамом [17*]

$$T_{ij} = \frac{1}{2} (E_i D_j + E_j D_i + H_i B_j + H_j B_i) - \frac{1}{2} (\mathbf{E}\mathbf{D} + \mathbf{H}\mathbf{B}) \delta_{ij}, \quad (5)$$

де ϵ_0 – електрична стала, μ_0 – магнітна стала, δ_{ij} – символ Кронекера.

Для порівняння різноманітних форм тензора Максвелла з експериментами розглядається дія однорідного електричного поля на діелектричну кулю чи сферичну порожнину (див. рис. 1). В квазістатичному наближенні такий же ефект на достатньо маленьку у порівнянні з довжиною хвилі кулю створює світловий тиск. Якщо зовнішнє електричне поле однорідне, то значення \mathbf{F}

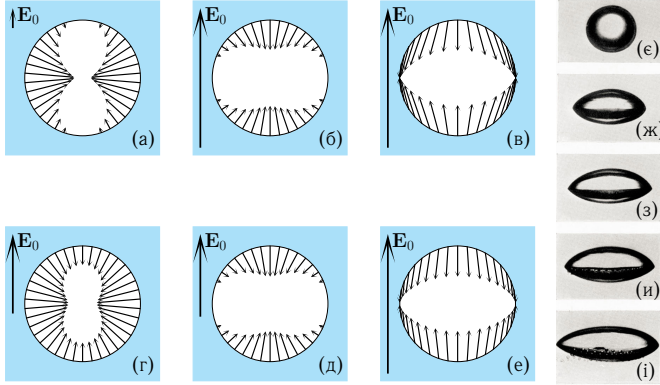


Рис. 1. Розподіл поверхневих сил обчислений за допомогою тензора електромагнітних напружень Мінковського (перша колонка), Айнштайна-Лауба (друга колонка) та Лоренца (третя колонка). Верхній рядок рисунків (а–в) демонструє дію постійного електричного поля на повітряну бульбашку у воді. Четверта колонка (є–і) – фотографія краплини силіконової олії у постійному електричному полі [18*]. Сили обчислені для параметрів цього експерименту відображені у нижньому рядку теоретичних рисунків (г–е). У всіх випадках вектор напруженості електричного поля спрямований вертикально.

визначається поверхневими силами \mathcal{F} , які вимірюються в Паскалях, і виражається через різницю тензорів електромагнітних напружень у двох середовищах. Нормальна компонента \mathcal{F} називається *нормальним тиском*, $\mathcal{P} = \mathcal{F} \hat{\mathbf{n}}$. Тангенціальна компонента називається *тангенціальним напруженням* \mathbf{S} . Якщо куля з центром в початку сферичної системи координат r, ϑ, ϕ знаходиться в статичному електричному полі $\mathbf{E} = E_0 \hat{\mathbf{z}}$, то за відсутності поверхневого заряду $s_p = 0$ з рівнянь (4) та (5) отримаємо

$$\mathcal{P}_r = \epsilon_1 C (\sin^2 \vartheta + \epsilon \cos^2 \vartheta), \quad \mathbf{S} = 0, \quad (6)$$

де $\epsilon = \epsilon_2/\epsilon_1$, ϵ_2 – діелектрична проникність кулі, ϵ_1 – діелектрична проникність оточуючого середовища, $C = \frac{9(\epsilon - 1)}{(\epsilon + 2)^2} \frac{\epsilon_0}{2} E_0^2$. Тоді як тензор Лоренца (2) дає

$$\mathcal{P}_r = (\epsilon + 1) C \cos^2 \vartheta, \quad S_\vartheta = -C \sin 2 \vartheta, \quad S_\phi = 0. \quad (7)$$

У випадку ж тензора Айнштайна-Лауба (3) отримаємо

$$\mathcal{P}_r = (2\epsilon_2\epsilon - \epsilon - 1)C \cos^2\vartheta, \quad \mathbf{S} = 0. \quad (8)$$

Поверхневі сили обчислені за допомогою тензорів електромагнітних напружень (2) – (5) можуть значно відрізнятись між собою. Наприклад, рис. 1 демонструє сили на поверхні маленької сферичної порожнини в ізотропному немагнітному діелектричному середовищі. Верхній ряд теоретичної частини рис. 1 відображає сили, які діють на повітряну бульбашку у воді з $\epsilon_1 = 80.1$, $\epsilon_2 = 1$. У нижньому рядку відображено обчислення для відносної діелектричної проникності $\epsilon = 0.44$, що відповідає експерименту [18*] з краплиною рідини зануреною в незмішувану рідину. Таке ж значення ϵ можна отримати для порожнини в середовищі з показником заломлення 1.5 – показник заломлення багатьох оптичних матеріалів. Теоретичні розрахунки на рис. 2 демонструють, що для параметрів вказаних в підписі до рис. 1 деформована сферична частинка стає витягнутою у випадку застосування тензора Мінковського та сплюсненою у випадку тензорів Айнштайна-Лауба та Лоренца. Також було розраховано сили,

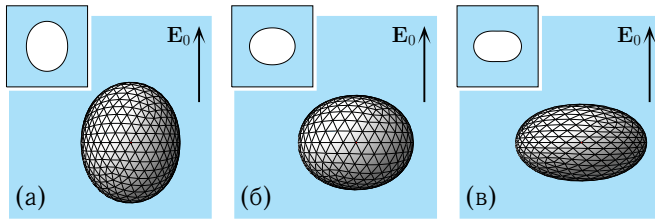


Рис. 2. Деформація сферичної порожнини в пружному діелектрику в однорідному електричному полі обчислена за допомогою тензора електромагнітних напружень Мінковського (а), Айнштайна-Лауба (б) та Лоренца (в). На вставках зображено поверхні отримані за допомогою теорії капілярних явищ Релея.

що діють на діелектричну сферичну частинку у середовищі із ледь меншим показником заломлення, ніж показник заломлення самої кулі (краплина води в повітрі) в полі лазерного випромінювання. В результаті тиск, знайдений за допомогою тензора Мінковського, майже не залежить від напрямку вектора напруженості електричного поля \mathbf{E}_0 . На противагу ж, моделі Айнштайна-Лауба та Лоренца передбачають розтягнення краплини вздовж вектора \mathbf{E}_0 .

Обчислення моменту сили для двопронезаломлюючої сферичної частинки в електричному полі показує, що лише тензор Лоренца та Абрахама дають ненульовий поверхневий момент сили.

Хоча тензор Лоренца найкраще описував деякі ефекти, що спостерігалися для сферичних частинок в електромагнітному полі, проте були експерименти, які неможливо було пояснити за його допомогою (див. [18*]). Таким чином, у першому розділі дисертації не вдалося знайти переконливих аргументів на

користь використання або невикористання однієї з чотирьох найбільш відомих форм тензора Максвелла. Однак в подальшому, під час дослідження лазерно-індукованих структур було використано тензор Лоренца. Цей вибір зумовлений порівнянням теоретичних розрахунків з результатами спостережень дії потужного лазерного імпульсу на краплю води.

В розділі 2, використовуючи підхід Максвелла (1) та тензор електромагнітних напружень Лоренца (2), досліджується значення механічного тиску світла в утворенні лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур (ЛППС). Визначається розподіл нормального тиску \mathcal{P} та тангенціального напруження \mathbf{S} зумовлених зовнішнім електромагнітним полем на опроміненій твердій поверхні, а також поле об'ємних електрострикційних сил, враховуючи збудження поверхневого плазмон-поляритону.

Поверхневий тиск і тангенціальне напруження визначаються як

$$\mathcal{F} = \mathcal{P} \hat{\mathbf{z}} + \mathbf{S} = \left[\langle \mathbf{T}^{(2)} \rangle - \langle \mathbf{T}^{(1)} \rangle \right] \cdot \hat{\mathbf{z}}, \quad (9)$$

де $\hat{\mathbf{z}}$ – одиничний вектор в напрямку осі z . Після застосування теореми Гауса права частини рівняння (1) перетворюється на інтеграл по поверхні тіла $\mathbf{F} = \int \nabla \cdot \langle \mathbf{T} \rangle dV$. Величина під знаком інтеграла вимірюється в Н/м³ та може бути інтерпретована як об'ємна густина електромагнітних сил $\mathbf{f} = \nabla \cdot \langle \mathbf{T} \rangle$.

Нормальний тиск і тангенціальне напруження знаходяться через поля на внутрішній поверхні металу, застосовуючи граничні умови для тангенціальних компонент полів \mathbf{E} і \mathbf{H} та нормальних компонент \mathbf{D} і \mathbf{B} та використовуючи рівняння (9) і тензор Лоренца (2). Врахувавши інтерференцію між падаючою хвилею та поверхневим плазмоном було встановлено, що період нормального тиску і тангенціального напруження становить $\Lambda = \lambda_0 / [(\lambda_0/\lambda_s) \pm \sin \theta]$, де λ_0 – довжина хвилі падаючого випромінювання, θ – кут падіння, а довжина хвилі поверхневого плазмон-поляритону $\lambda_s = \lambda_0 \left(\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \right)^{-1/2}$, ϵ_1 і ϵ_2 – діелектричні проникності середовищ при частоті ω .

Далі проводиться оцінка величини можливого тиску лазерного фемтосекундного імпульсу на поверхню міді, для якої $\epsilon_2 = -25.07 + 2.54i$ при частоті, яка відповідає довжині хвилі 800 нм. Також для числової оцінки було взято, що тривалість імпульсу $\tau = 140 - 150$ фс, а його густина потужності $\Phi = 1$ Дж/см². При наведених параметрах лазерного імпульсу тиск на абсолютно поглинаюче середовище з нульовим коефіцієнтом відбивання становить $\mathcal{P}_0 = \Phi/(\tau c) \simeq 0.2$ ГПа. Використовуючи теорію Максвелла-Лоренца, отримано від'ємне значення нормального тиску $\mathcal{P} \simeq -12 \mathcal{P}_0$ та періодичний розподіл тангенціального напруження з амплітудою $5 \mathcal{P}_0$ та періодом $\Lambda = \lambda_s \simeq 770$ нм. Крім того, для більш повної картини було визначено розподіл електрострикційних об'ємних сил для поверхневого шару металу. Встановлено, що тиск може становити декілька ГПа, чого достатньо для модифікації поверхні міді.

В розділі 3 переглядається загальноприйняте означення просторової дис-

персії діелектричної проникності. Визначається відгук виродженого електронного газу на електричне поле, яке задовольняє векторне рівняння Гельмгольца $\Delta \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0$ у кожному однорідному домені неоднорідного середовища, за допомогою розв'язку рівняння Больцмана в наближенні часу релаксації

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{e}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = \frac{f_0 - f}{\tau}, \quad (10)$$

де f – одночастинкова функція розподілу у фазовому просторі (\mathbf{r}, \mathbf{v}) , \mathbf{v} – мікроскопічна швидкість електрона, e і m – заряд електрона і його маса, відповідно, \mathbf{B} – магнітна індукція, f_0 – рівноважна функція розподілу, τ – час релаксації. Як і зазвичай, тангенціальні компоненти напруженості електричного \mathbf{E} та магнітного \mathbf{H} полів неперервні на границі поділу середовищ. Окрім того, враховано, що вільні електрони знаходяться тільки в металі, тому застосовується додаткова гранична умова для нормальної компоненти густини струму \mathbf{j} на поверхні металу S : $(\mathbf{j} \cdot \mathbf{n})|_{\mathbf{r} \in S} = 0$.

Для рівняння Гельмгольца існує два типи розв'язків: поле з нульовою дивергенцією, яке задовольняє рівняння $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ та безвихровий розв'язок, який задовольняє рівняння $\nabla \times \mathbf{E} = 0$. Остання умова для плоскої хвилі із $E \propto \exp[i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)]$ перетворюється у співвідношення $\mathbf{k} \times \mathbf{E} = 0$, яке демонструє, що хвиля поздовжня (L). Для опису поширення хвиль у сферичних частинках зручно використовувати векторні сферичні гармоніки \mathbf{L} , \mathbf{M} та \mathbf{N} у якості повної системи ортогональних функцій. В такому випадку безвихровий розв'язок визначає гармоніки \mathbf{L} . Хвильове число L хвилі чи \mathbf{L} моди визначається наступним законом дисперсії $\epsilon^L(\omega, k^L) = 0$. Знайшовши з рівняння Больцмана електропровідність, у результаті отримано наступний вираз для поздовжньої діелектричної проникності

$$\epsilon^L = \epsilon_g - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\Gamma)} \frac{3}{a^2} \left[1 - \frac{1}{2a} \frac{\ln(1+a)}{\ln(1-a)} \right], \quad (11)$$

де $a = \frac{kv_F}{\omega + i\Gamma}$, $\Gamma = 1/\tau$, v_F – швидкість Фермі. Якщо $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ та $v_F k \ll \omega$, (актуальний випадок), поперечна діелектрична проникність Лінгарда зводиться до діелектричної функції Друде $\epsilon^T = \epsilon_g - \omega_p^2/(\omega^2 + i\Gamma\omega)$, де ϵ_g – частина діелектричної проникності, що враховує поляризацію твердого тіла ($\epsilon_g = 1$ для простого металу), ω_p – плазмова частота. Якщо ж $|a| < 1$, поздовжня діелектрична проникність (11) спрощується до так званої гідродинамічної діелектричної проникності

$$\epsilon^L(\omega, k^L) = \epsilon_g - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\Gamma\omega - \frac{3}{5}(v_F k^L)^2}. \quad (12)$$

Знайдена функція поздовжньої діелектричної проникності збігається з ре-

зультатами Клімонтовіча та Сіліна отриманими в 1952 і Ліндхарда в 1954. Однак, знайдена функція залежить від квадрату хвильового числа (параметр хвильового рівняння Гельмгольца), а не від хвильового вектора плоскої електромагнітної хвилі. Така нова концепція спрощує проведення обчислень нелокальних ефектів, наприклад, за допомогою узагальненої теорії Лоренца-Мі, оскільки можна уникнути виконання перетворення Фур'є.

Коефіцієнти Френеля узагальнені на випадок збудження поздовжніх електромагнітних хвиль

$$r = 1 - (1 + \delta) t, \quad t = \frac{2 \epsilon_1 k_{2z}}{\epsilon_2 k_{1z} + (1 + \delta) \epsilon_1 k_{2z}}, \quad \delta = \frac{\epsilon_g - \epsilon}{\epsilon_g} \frac{k_{2x}^2}{k_{2z} k_{2z}^L} \quad (13)$$

При $\delta = 0$, коефіцієнт r перетворюється на коефіцієнт відбиття Френеля для р-поляризованої хвилі. При такій же умові t не перетворюється на коефіцієнт проходження Френеля, оскільки відрізняються означення коефіцієнтів t і r в дисертаційній роботі та запропоновані Френелем.

Для підтвердження запропонованої теоретичної концепції розраховується спектр екстинкції для срібної та золоті сферичних частинок нанометрових розмірів (рис. 3). Для таких частинок узагальнена теорія Лоренца-Мі дає

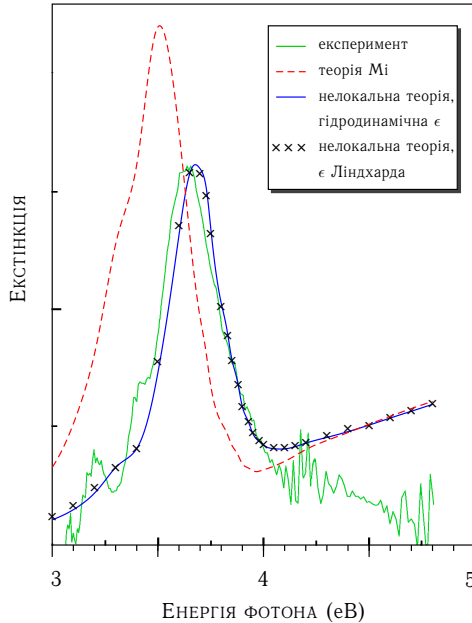


Рис. 3. Спектр екстинкції світла частинкою нанометрових розмірів, які спостерігалися в [19*] і розраховані за допомогою локальної і нелокальної моделей. Всі теоретичні спектри представлені в загальних відносних одиницях.

зсув в область вищих частот та розширення плазмонного резонансу, що добре узгоджується з експериментальними даними. Крім того, нелокальна теорія пояснює зникнення плазмонного резонансу, яке спостерігається для золотої кульки з діаметром менше або рівним 2 нм. При енергіях фотонів від 3 до 4 еВ обчислення, використовуючи діелектричну проникність Клімонтовіча-Сіліна-Ліндхарда та гідродинамічну діелектричну проникність, дають приблизно рівні результати. Також продемонстровано, що хвильове число поздовжніх хвиль у твердих тілах набагато більше, ніж хвильове число поперечних коливань. Тому виникненням поздовжніх коливань на плоскій поверхні можна знехтувати, хоча \mathbf{L} моди мають важливий вплив у нанометрових кластерах.

В розділі 4 для опису та дослідження особливостей руху мікрочастинок у слабопровідній діелектричній краплині узагальнено модель неідеальних діелектриків Тейлора-Мелчера, враховуючи поверхневу провідність краплини та поверхневі струми. Для цього знаходиться розв'язок електростатичної задачі для сферичної геометрії. Загальний розв'язок рівняння Лапласа для сферичної геометрії відомий. Тому задача, як і у попередніх розділах зводиться до встановлення системи граничних умов і знаходження розв'язку цієї системи. Використовуються граничні умови нормальної складової вектора напруженості електричного поля та потенціалу. Для визначення поверхневого заряду необхідно використати додаткове рівняння балансу. Якщо ж розподіл потенціалу електричного поля відомий, то для обчислення деформації краплини та потоку рідини в ній слід застосувати описані в [11*, 18*, 20*] підходи. В подальшому це дозволяє проаналізувати рух мікрочастинок на поверхні краплини. Тангенціальне напруження на поверхні діелектричної кулі, яке зумовлює виникнення потоків рідини, можна визначити наступним чином [18*]

$$S_{\theta} = -s_p E_2 \sin \theta \cos \theta, \quad (14)$$

де θ – полярний кут, s_p – поверхневий заряд на північному полюсі кулі, для якого $\theta = 0$, E_2 – абсолютне значення вектора напруженості електричного поля на внутрішній поверхні.

У результаті врахування поверхневої провідності дозволило у загальноприйнятому визначенні сумарної провідності кулі радіуса r , яка є сумою об'ємної σ_b і поверхневої κ , виявити залежність від кутового розподілу зовнішнього електричного поля

$$\sigma_2 = \sigma_{b2} + (l + 1) (\kappa/r). \quad (15)$$

Також знайдено величини s_p та E_2 , які фігурують в рівнянні (14) та дозволяють проаналізувати ЕГД потоки рідини

$$s_p = \varepsilon_0 (\beta_{ld} - \beta_{pd}) (K_2 + 2K_1) \Theta E, \quad (16)$$

$$E_2 = \left[\frac{3\sigma_1}{\sigma_2 + 2\sigma_1} \Theta + \frac{3K_1}{K_2 + 2K_1} (1 - \Theta) \right] E, \quad (17)$$

де $\beta_{\text{Id}} = (\sigma_2 - \sigma_1)/(\sigma_2 + 2\sigma_1)$ – модифікований фактор Клаузіуса–Моссотті провідної кулі із заміною σ_2 замість σ_{b2} , $\beta_{\text{pd}} = (K_2 - K_1)/(K_2 + 2K_1)$ – фактор Клаузіуса–Моссотті ідеально діелектричної сферичної частинки.

Фактор Клаузіуса–Моссотті використовується для визначення напрямку та абсолютної величини діелектрофоретичної сили, яка діє на частинку на поверхні кулі. Величина і напрям цієї сили залежать від добутку $\beta(2 + \beta)\beta'$ [11*, 12*], де β і β' – дійсні частини фактора Клаузіуса–Моссотті краплини і частинки в оточуючій рідині, відповідно.

Для моделі провідної кулі фактор Клаузіуса–Моссотті можна виразити як

$$f_{\text{CM}} = \Theta \beta_{\text{Id}} + (1 - \Theta) \beta_{\text{pd}}, \quad (18)$$

де $\Theta = [1 - i\omega\tau_\beta]^{-1}$. Можна зауважити, що фактор Клаузіуса–Моссотті, знайдений для провідної діелектричної кулі із врахуванням поверхневої провідності змінюється в межах між двома екстремальними значеннями β_{Id} та β_{pd} . Параметр τ_β^{-1} називається частотою перегину і визначає частоту переходу фактор Клаузіуса–Моссотті від одного граничного випадку до іншого. Якщо знехтувати поверхневою провідністю $\kappa = 0$ та взяти $\omega = 0$, то отримуємо результат оригінальної моделі неідеальних діелектриків Тейлора.

У роботі [18*] проводилося теоретичне та експериментальне вивчення впливу змінного однорідного електричного поля на виникнення деформацій і циркуляцій рідини в діелектричній краплині, зануреній в іншу незмішувану діелектричну рідину (діелектричні рідини з границею поділу). Отриманий результат показав залежність даних ефектів від коефіцієнтів $q = K_2/K_1$ і $Z = \sigma_2/\sigma_1$. Після розрахунку безрозмірної дискримінаційної функції, що визначає тип деформацій краплин, було введено класифікацію систем [18*]. У системах класу А, де $q \leq Z$, електрично-індукований потік по обидві сторони межі розділу спрямований від екватора до полюсів. У системах класу В навпаки, потік спрямований від полюсів до екватора. У системах класів А і В краплина стає витягнутим сфероїдом. У системах класу С краплина стає сплюсненою при низьких частотах і витягнутою при високих частотах. За умови, що інші процеси не враховуються, узагальнення моделі роботи [18*] зводиться до перевизначення наступним чином параметра $Z = r_1/r + \sigma_2/\sigma_1$. Значення параметра Z зростає при зростанні κ чи зменшенні r . Як результат, система класу С може перейти до класу В і, потім, до класу А, що підтверджується спостереженням на експериментах морфологічного переходу, коли сплюснення змінюється на витягування [9*, 12*].

На рис. 4, нормовані ЕГД сили $F_{\text{ЕНД}}(\omega)/|F_{\text{ЕНД}}(0)| = S_\theta(\omega)/|S_\theta(0)|$ порівнюються із нормованими ДЕФ силами [12*] $F_{\text{ДЕФ}}(\omega)/|F_{\text{ДЕФ}}(0)| = \beta(2 + \beta)\beta'/|\beta_{\text{Id}}(2 + \beta_{\text{Id}})\beta'_{\text{Id}}|$. Як можна зауважити на рис. 4 при частотах близьких до нуля ЕГД сили тяги та ДЕФ сили мають різні знаки, якщо не враховувати поверхневу провідність. Якщо ж врахувати поверхневу провідність, то ці сили будуть мати однаковий напрямок. Відповідно, зміна напрямку руху мікрочастинок при збільшенні частоти відбувається завдяки тому, що змінюється знак

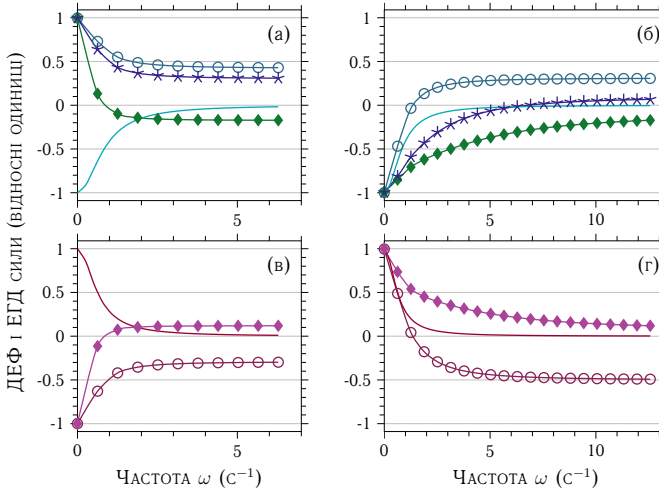


Рис. 4. Теоретичні частотні залежності нормованої ЕГД сили тяги (суцільні лінії) і ДЕФ сили, які діють на мікрочастинки вапняно-натрієвого скла (лінії з ромбовидними мітками), порожнистого скла (лінії із круглими мітками) та полістиролу (лінії із зірочками) на поверхні краплини із силіконової олії I [рисунки (а) і (б)] чи силіконової олії II [рисунки (в) і (г)] зануреної в касторову олію, обчислених нехтуючи [ліва колонка: рисунки (а) і (в)] та враховуючи [права колонка: рисунки (б) і (г)] поверхневу провідність мікрочастинок.

(відповідно, і напрямком) ДЕФ сили. Отже, міграція мікрочастинок на поверхні краплини за рахунок ЕГД та ДЕФ сил вагомо залежить від поверхневої провідності краплини та окремих мікрочастинок.

У розділі 5, використовуючи аналогічний до попереднього розділу математичний апарат, окрім струму через поверхню краплини враховуються дифузійні струми через поверхню та розпад поверхневого заряду. За таких умов фактор Клаузіуса-Моссотті можна записати в такому ж вигляді як (18), але з дещо відмінним параметром $\Theta = [1 + \tau_\beta (-i\omega + \tau_\alpha^{-1})]^{-1}$. Знову ж таки, аналогічно до попереднього розділу, з рівняння (18) видно, що дійсна частина β фактора Клаузіуса-Моссотті провідної кулі може змінюватися від β_{Id} до β_{Pd} . Для того щоб здійснити перехід до оригінальної теорії Тейлора [20*], варто взяти $\tau_\alpha^{-1} = 0$, $\kappa = 0$ та $\omega = 0$.

Для вивчення залежності поляризації сферичної частинки від поверхневої провідності κ і часу α -релаксації поверхневого заряду розглядається рис. 5. На ньому зображені теоретичні залежності фактору β від частоти $\nu = \omega/(2\pi)$ для сферичних частинок полістиролу занурених у воду. Аналізуючи рис. 5, маємо значний розкид значень для параметра β у випадку постійного струму, але водночас при високих частотах всі криві наближаються до граничного

випадку ідеального діелектрика. Якщо порівняти криві 1, 5 та 6, то виявляється, що властивості маленької кулі з $2r = 1$ мкм значно відрізняються від властивостей порівняно великої кулі. Неочікувано виявляється, що частинка доброго ізолятора мікрометрового розміру із $\sigma_{b2} = 0$ при низьких частотах веде себе як гарний провідник. Насправді, значення $\beta(\omega = 0) = 0.86$ для кривої 1 близьке до значення $\beta_{pc} = 1$, яке відповідає наближенню ідеального провідника. Порівняння кривих 1–4 показує, що значення β_{dc} зменшується із збільшенням відношення часу релаксації Максвелла-Вагнера τ_β до часу α -релаксації поверхневого заряду τ_α . Частота інверсії, яка визначається умовою $\beta(\omega_c) = 0$ є немонотонною функцією параметра τ_β/τ_α . Якщо фактори β_{pd} і

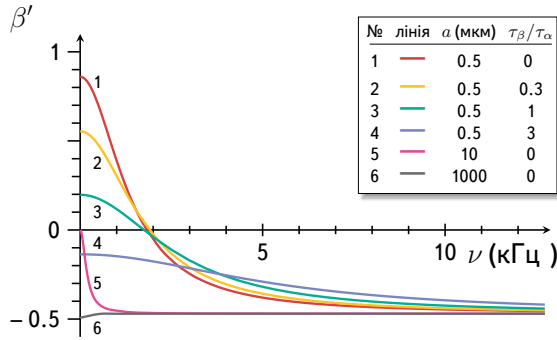


Рис. 5. Частотна залежність дійсної частини фактора Клаузіуса-Моссотті обчислена для сферичних частинок полістиролу у воді.

β_{ld} мають різні знаки, частота інверсії може бути визначена, як частота, яка ділить область негативного та позитивного діелектрофорезу, при якій дійсна частина фактора Клаузіуса-Моссотті рівна нулю

$$\omega_c = \tau_\beta^{-1} \left[\left(-\frac{\beta_{ld}}{\beta_{pd}} - \frac{\tau_\beta}{\tau_\alpha} \right) \left(1 + \frac{\tau_\beta}{\tau_\alpha} \right) \right]^{1/2}. \quad (19)$$

Це рівняння дає раніше відому формулу $\omega_c = \left[\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{(K_1 - K_2) \varepsilon_0} \tau_\beta^{-1} \right]^{1/2}$, якщо $\tau_\alpha^{-1} = 0$. В деяких експериментах спостерігалось зростання частоти інверсії із зменшенням радіуса частинок. Наприклад, частоти інверсії $\nu_c = \omega_c/(2\pi)$ для кульок полістирольного латексу суспендованих у водному розчині КСІ з діапазоном провідності від 10^{-4} до 10^{-1} См/м. Використовуючи останній вираз для ω_c було встановлено, що κ зменшується в діапазоні від 0.9 до 1.2 нСм для частинок з діаметром від 110 до 1900 нм і $\kappa = 0.75$ нСм для частинок діаметром 44 нм.

Якщо, використовуючи вираз (19) для частоти інверсії, припустити, що частинки достатньо малого розміру для того, щоб поверхнева провідність

домінувала у правій частині рівняння (15) при $l = 1$, а β_{ld} наближається до одиниці і доданок $2 D_{12}/r^2$ переважає при визначенні τ_{α}^{-1} , то за таких умов рівняння (19) набуває вигляду

$$\omega_c = \frac{2\kappa}{\varepsilon_0 (K_2 + 2 K_1)} \frac{1}{r} \left[\left(\frac{1}{\beta_{\text{pd}}} - \frac{L}{r} \right) \left(1 + \frac{L}{r} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (20)$$

де $L = D_{12} (K_2 + 2 K_1) \varepsilon_0 / \kappa$. Порівняння з експериментальними даними показує, що дане рівняння добре узгоджується з ними і завдяки врахуванню дифузії дає точніші результати.

ВИСНОВКИ

У дисертації проведено дослідження значення пондеромоторних сил в утворенні лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур та враховано транспорт поверхневого заряду в електрогідродинамічній теорії краплин. У результаті зроблено такі основні висновки.

1. Проведені обчислення показали, що лазерно-індуковані періодичні поверхневі структури можуть формуватися внаслідок дії пондеромоторних сил, якщо врахувати інтерференцію падаючого електромагнітного поля та збудженого у твердому тілі поверхневого плазмон-поляритону.

2. Коефіцієнти Френеля узагальнено на випадок рефракції додаткової поздовжньої електромагнітної хвилі та встановлено, що її збудженням під час утворення лазеро-індукованих структур можна знехтувати.

3. Отримано вираз для просторово-дисперсійної поздовжньої діелектричної проникності та показано її залежність від квадрата хвильового числа (параметра рівняння Гельмгольца), а не від хвильового вектора.

4. Проведені обчислення без використання підгінних параметрів в рамках нелокальної теорії, яка враховує збудження поздовжніх мод, пояснили зсув в область вищих частот і розширення поверхневого плазмонного резонансу групи срібних нанокул, а також зникнення плазмонного резонансу для золотих сферичних частинок з радіусом близько 2 нм.

5. Електрогідродинаміку Тейлора-Мелчера узагальнено, враховуючи електричні та дифузійні поверхневі струми, а також розпад поверхневого заряду, що дозволило пояснити експериментальні результати щодо електрогідродинамічної циркуляції рідини та діелектрофорезу мікрочастинок у діелектричних краплях.

6. Вперше встановлено залежність ефективної провідності та поляризованості кулі від кутового розподілу поля.

7. Модель неідеальних (слабопровідних) діелектриків Тейлора-Мелчера у випадку сталого електричного поля справедлива, якщо час релаксації поверхневого заряду τ_{α} значно більший, ніж час релаксації Максвелла-Вагнера τ_{β} , $\tau_{\alpha} \gg \tau_{\beta}$. Водночас, за протилежної умови $\tau_{\alpha} \ll \tau_{\beta}$ при $\omega \simeq 0$, всупереч загальноприйнятій концепції, повинна використовуватися модель ідеальних

діелектриків, яка є застосовною також за високих частот, коли $\omega \tau_\beta \gg 1$, при довільних τ_α .

8. Якщо врахувати поверхневу провідність та α -релаксацію (дифузія та розпад) поверхневого заряду, то дійсна частина фактора Клаузіуса-Моссотті залежить від більшої кількості параметрів порівняно з традиційною моделлю Тейлора-Мелчера, в якій вона є однозначною функцією двох параметрів, а саме провідності кулі та зовнішнього середовища, у випадку сталого електричного поля. При цьому в узагальненій моделі дійсна частина фактора Клаузіуса-Моссотті навіть у випадку ізолятора може змінюватися від значення ідеального діелектрика до значення ідеального провідника.

9. В експериментах по переміщенню мікрочастинок вздовж поверхні діелектричних краплин ключову роль грає передбачена зміна дійсної частини фактора Клаузіуса-Моссотті, а не співвідношення між силою діелектрофорезу та електрогідродинамічною силою.

10. Враховуючи затухання поверхневого заряду, вперше отримано формулу для частоти інверсії діелектрофорезу, яка краще узгоджується з експериментальними результатами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Datsyuk V. V., **Pavlyniuk O. R.** Maxwell stress on a small dielectric sphere in a dielectric // *Phys. Rev. A.* — 2015. — Vol. 91, no. 2. — P. 023826–1–6.
2. **Pavlyniuk O. R.**, Datsyuk V. V. Electrostrictive Mechanism of Nanostructure Formation at Solid Surfaces Irradiated by Femtosecond Laser Pulses // *Nanoscale Res. Lett.* — 2016. — Vol. 11, no. 16.
3. Datsyuk V. V., **Pavlyniuk O. R.** Properties of Longitudinal Electromagnetic Oscillations in Metals and Their Excitation at Planar and Spherical Surfaces // *Nanoscale Res. Lett.* — 2017. — Vol. 12, no. 473.
4. Дацюк В. В., **Павлинюк О. Р.** Роль поверхневої провідності в електромеханіці та електрогідродинаміці діелектричної кулі // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка Серія фізико-математичні науки.* — 2018. — № 4. — С. 110–117.
5. Datsyuk V. V., **Pavlyniuk O. R.** The role of surface-charge transport in electrohydrodynamics and electromechanics of a dielectric sphere // *Ukr. J. Phys.* — 2020. — Vol. 65, no. 6. — P. 521–532.
6. Datsyuk V. V., **Pavlyniuk O. R.** Mechanical action of electromagnetic field on a small spherical body // *Abstract Book of participants of the International Summer School and International research and practice conference, August 25 — September 1, 2013 / Edited by Prof. Leonid Yatsenko.* — Lviv : Eurosvit. — 2013. — P. 338.
7. **Pavlyniuk O. R.**, Datsyuk V. V. Electrostrictive mechanism of nanostructure formation at solid surfaces irradiated by femtosecond laser pulses // *Abstract Book. International research and practice conference “Nanotechnology and*

Nanomaterials” (NANO-2015), 26-29 August 2015, Lviv, Ukraine. — Lviv. — 2015.

8. Datsyuk V. V., **Pavlyniuk O. R.** Longitudinal electromagnetic waves in metals and their role in formation of the laser-induced surface structures // International research and practice conference “Nanotechnology and Nanomaterials” (NANO-2016), 24-27 August 2016, Lviv, Ukraine. Book of Abstracts. — Lviv. — 2016. — P. 307.
9. Datsyuk V. V., **Pavlyniuk O. R.** The role of surface conductivity in electro-mechanics of microparticles in a weakly-conducting dielectric drop // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). — Kyiv. — 2019. — P. 142–146.
10. Datsyuk V. V., **Pavlyniuk O. R.** Effect of the of Surface-Charge Diffusion on the Polarization of a Dielectric Sphere and Its Role in Electrohydrodynamics and Electromechanics // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). — Kyiv. — 2020. — P. 547–551.

СПИСОК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1.* Femtosecond laser-induced periodic surface structure / Bonse J., Krüger J., Höhm S., and Rosenfeld A. // *J. Laser Appl.* — 2012. — Vol. 24, no. 4. — P. 042006.
- 2.* Sub-100-nm laser-induced periodic surface structures upon irradiation of titanium by Ti:sapphire femtosecond laser pulses in air / Bonse J., Höhm S., Rosenfeld A., and Krüger J. // *Appl. Phys. A.* — 2012. — Vol. 110. — P. 547–551.
- 3.* Bonse J., Rosenfeld A., Krüger J. On the role of surface plasmon polaritons in the formation of laser-induced periodic surface structures upon irradiation of silicon by femtosecond laser pulses // *J. Appl. Phys.* — 2009. — Vol. 106. — P. 104910.
- 4.* Hughes M. P. *Nanoelectromechanics in engineering and biology.* — CRC press, 2003.
- 5.* Ramos A. *Electrokinetics and electrohydrodynamics in microsystems.* — Springer, 2011.
- 6.* Pethig R. R. *Dielectrophoresis: Theory, Methodology and Biological Applications.* — John Wiley & Sons, 2017.
- 7.* Concentrating particles on drop surfaces using external electric fields / Nudurupati S., Janjua M., Aubry N., and Singh P. // *Electrophoresis.* — 2008. — Vol. 29, no. 5. — P. 1164–1172.
- 8.* Salipante P. F., Vlahovska P. M. Electrohydrodynamics of drops in strong uniform dc electric fields // *Phys. Fluids.* — 2010. — Vol. 22, no. 11. — P. 112110.
- 9.* Active structuring of colloidal armour on liquid drops / Dommersnes P., Rozynek Z., Mikkelsen A., Castberg R., Kjerstad K., Hersvik K., and Fossum J. O. // *Nat. Comm.* — 2013. — Vol. 4. — P. 2066.

- 10.* Electrohydrodynamic controlled assembly and fracturing of thin colloidal particle films confined at drop interfaces / Rozynek Z., Dommersnes P., Mikkelsen A., Michels L., and Fossum J. // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* — 2014. — Vol. 223, no. 9. — P. 1859–1867.
- 11.* Electrohydrodynamic manipulation of particles adsorbed on the surface of a drop / Amah E., Shah K., Fischer I., and Singh P. // *Soft Mat.* — 2016. — Vol. 12, no. 6. — P. 1663–1673.
- 12.* Particle-covered drops in electric fields: drop deformation and surface particle organization / Mikkelsen A., Khobaib K., Eriksen F. K., Måløy K. J., and Rozynek Z. // *Soft Mat.* — 2018. — Vol. 14. — P. 5442–5451.
- 13.* Maxwell J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. II. — Clarendon Press, 1873.
- 14.* Lorentz H. A. The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat. A course of lectures delivered in Columbia University, New York, in March and April 1906. — Columbia University Press, 1909.
- 15.* Einstein A., Laub J. Über die im elektromagnetischen Felde auf ruhende Körper ausgeübten ponderomotorischen Kräfte // *Ann. Phys.* — 1908. — Vol. 331. — P. 541–550.
- 16.* Minkowski H. Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern // *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen.* — 1908. — P. 53–111.
- 17.* Abraham M. Zur Frage der Symmetrie des elektromagnetischen Spannungstensors // *Ann. Phys.* — 1914. — Vol. 349. — P. 537–544.
- 18.* Torza S., Cox R. G., Mason S. G. Electrohydrodynamic deformation and burst of liquid drops // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* — 1971. — Vol. 269, no. 1198. — P. 295–319.
- 19.* Hilger A., Tenfelde M., Kreibitz U. Silver nanoparticles deposited on dielectric surfaces // *Appl. Phys. B.* — 2001. — Sep. — Vol. 73, no. 4. — P. 361–372.
- 20.* Taylor G. Studies in Electrohydrodynamics. I. The Circulation Produced in a Drop by Electrical Field // *Proc. Roy. Soc. Lond. A.* — 1966. — Vol. 291, no. 1425. — P. 159–166.

АНОТАЦІЯ

Павлюк О. Р. Лазерно-індуковані поверхневі структури та вплив транспорту поверхневого заряду на електрогідродинамічні явища. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 — Теоретична фізика. — Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню значення механічного тиску світла для формування лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур (ЛІППС) та роль транспорту поверхневого заряду в електромеханіці та електрокінетиці.

Обчислені розподіли нормального тиску та тангенціального напруження на

поверхні твердого тіла, які виникають внаслідок інтерференції електромагнітного поля лазерних імпульсів та збудження поверхневих плазмон-поляритонів. Розраховано розподіл об'ємних електрострикційних сил. Встановлено, що утворення ЛППС можливе через непружні деформації внаслідок механічної дії одиничних лазерних фемтосекундних імпульсів. Досліджено значення поздовжніх електромагнітних хвиль у формуванні ЛППС. Узагальнено коефіцієнти Френеля на випадок збудження поздовжніх електромагнітних хвиль.

Встановлено умови застосування моделі неідеальних діелектриків Тейлора-Мелчера та проведено її узагальнення, враховуючи електричні та дифузійні поверхневі струми та розпад поверхневого заряду. Вперше визначено залежність ефективної провідності кулі від кутового розподілу поля.

Ключові слова: електромагнітні сили, лазерно-індуковані періодичні поверхневі структури, електрогідродинаміка.

АННОТАЦІЯ

Павлынюк О. Р. Лазерно-индуцированные поверхностные структуры и влияние транспорта поверхностного заряда на электрогидродинамические явления. — Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика. — Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко МОН Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена исследованию значения механического давления света в формировании лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) и роли транспорта поверхностного заряда в электромеханике и электрокинетике.

Вычислены распределения нормального давления и тангенциального напряжения на поверхности твердого тела, которые возникают в результате интерференции электромагнитного поля лазерных импульсов и возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов. Рассчитано распределение объемных электрострикционных сил. Установлено, что образование ЛИППС возможно через неупругие деформации вследствие механического воздействия единичных лазерных фемтосекундных импульсов. Определено значения продольных электромагнитных волн в формировании ЛИППС. Обобщены коэффициенты Френеля в случае возбуждения продольных электромагнитных волн.

Установлены условия применения модели неидеальных диэлектриков Тейлора-Мелчера и проведено ее обобщение, учитывая электрические и диффузные поверхностные токи и распад поверхностного заряда. Впервые определена зависимость эффективной проводимости шара от углового распределения поля.

Ключевые слова: электромагнитные силы, лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры, электрогидродинамика.

SUMMARY

Pavlyniuk O. R. Laser-induced surface structures and the effect of surface charge transport on electrohydrodynamic phenomena. — Qualification scientific work in the form of manuscript.

Thesis for candidate of physical and mathematical sciences degree in speciality 01.04.02 — Theoretical physics. — Taras Shevchenko National University of Kyiv MES of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the investigation of the significance of the mechanical pressure of light in laser-induced periodic surface structures (LIPSS) formation and the role of surface charge transport in electromechanics and electrokinetics.

Distributions of the electrically-induced normal pressure and tangential stress at the solid surface illuminated with laser pulses, as well as the field of volume electrostrictive forces, are calculated taking into account surface plasmon-polariton excitation. Based on these calculations, the surface destruction and LIPSS formation are predicted due to inelastic deformations during single femtosecond pulses.

To determine the role of the longitudinal rotationless electromagnetic waves in the LIPSS formation, their properties were studied. As a consequence, it's proposed a new simpler (avoiding Fourier transforms) approach of the simulation of the nonlocal effects using a calculated longitudinal dielectric function that depends on the square of the wavenumber, a parameter of the vector Helmholtz equation, but not the wave vector of a plane electromagnetic wave. The Fresnel coefficients are generalized allowing for excitation of the longitudinal electromagnetic waves. It's shown that the absolute values of the wavenumbers of the longitudinal waves in solids are much higher than those of the transverse waves.

The Taylor-Melcher electrohydrodynamics is extended allowing for electric and diffusion interfacial currents and surface-charge decay. The Taylor-Melcher leaky dielectric model applicability conditions are defined.

The real part of the Clausius-Mossotti factor is shown to depend on several parameters (but not only the conductivities of the sphere and ambient medium as in the conventional leaky dielectric model) and, in the DC case, ranges from the perfect-dielectric to perfect-conductor values even for a particle of a good insulator. The dielectrophoretic inflection and cross-over frequencies are defined allowing for the decay of the surface charge. The dependence of the effective conductivity of a sphere on the angular field distribution is predicted for the first time. The proposed model is confirmed by a review of phenomena observed mainly in a silicone-oil drop suspended in castor oil with microparticles at the interface.

Key words: electromagnetic forces, laser-induced periodic surface structures, electrohydrodynamics.