МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Стогній Надія Петрівна

УДК 537.87

СТАЦІОНАРНІ ТА НЕСТАЦІОНАРНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ В СИСТЕМАХ МЕТАЛЕВИХ НИТОК

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, доцент
Сахненко Наталія Костянтинівна,
Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри вищої математики.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
Черпак Микола Тимофійович,
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, старший науковий співробітник відділу радіофізики твердого тіла;

доктор фізико-математичних наук
Туз Володимир Ростиславович,
Радіоастрономічний інститут НАН України, провідний науковий співробітник відділу теоретичної радіофізики.

Захист відбудеться «24» грудня 2014 р. о 11.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, Україна, м. Харків, пр. Леніна 14, зал засідань.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, Україна, м. Харків, пр. Леніна 14.

Автореферат розісланий «21» листопада 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом металеві наноструктури привертають до себе значну увагу, що зумовлено, насамперед, їх електродинамічними властивостями та можливістю сильної локалізації світла на субхвильовому рівні за рахунок збудження поверхневих і локалізованих плазмонів. Вивчення і дослідження таких наноструктур з плазмонними резонансами ініціюється можливостями їх потенційного використання в багатьох сферах, зокрема, в наноантенних, нанолазерних і сенсорних застосуваннях. Так, наприклад, особливо ефективне використання поверхневого плазмонного резонансу в біосенсорах для аналізу різного виду біохімічних реакцій і складу біологічних середовищ. Висока чутливість таких сенсорів забезпечується резонансною залежністю вихідних величин датчика від параметрів контролюючого середовища.

Якщо наноелементи перебувають у безпосередній близькості один від одного, то плазмонні резонанси є комбінаціями плазмонних резонансів окремого елемента. Фундаментальні властивості наноструктур, такі як висока чутливість до зовнішнього середовища або поліпшення спрямованості випромінювання, можуть бути скориговані підбором розміру та положення елементів, з яких складаються.

Як правило, плазмонні резонанси знаходять за резонансними максимумами поперечного перерізу розсіювання. Але вказане дослідження не є повним, зокрема, дозволяє досліджувати тільки «яскраві» плазмони, які ефективно збуджуються плоскою хвилею, залишаючи поза увагою «темні» плазмони. Такий аналіз також не дає можливості кількісної оцінки добротності. Часто застосовують дипольне (квазістатичне) наближення, яке ефективне тільки для моделювання малих частинок, що розміщені на значній відстані одна від одної. Зі збільшенням поперечного розміру частинки, а також зі зменшенням відстані між ними необхідно враховувати вплив вищих плазмонів. Тому актуальним є застосування математично строгих підходів, які дозволяли б досліджувати «усі» плазмони: як «яскраві», так і «темні», як дипольні, так і мультипольні без будь-яких обмежень на поперечний розмір та відстань між елементами. Можливості строго досліджувати вказані властивості плазмонів дає, наприклад, така структура, як система паралельних кругових металевих ниток (нанопроводів).

Поряд із пасивними плазмонними структурами великий інтерес викликають і активні структури: плазмонні перемикачі, динамічно контрольовані антени та нанолазери. Для таких застосувань велике значення має ефективне моделювання у часовій області, оскільки воно дає глибоке розуміння фундаментальних процесів, зокрема, використовується для діагностики зовнішнього середовища.

Зараз комп’ютерне моделювання фізичних процесів знаходить все більш широке застосування для розв’язання різноманітних задач. Фактично воно дозволяє на відповідних моделях детально дослідити різноманітні аспекти

поведінки системи, дослідження якої прямим експериментальним спостереженням є ускладненим або неможливим. Так, для аналізу нестаціонарних електродинамічних процесів, як правило, використовують кінцево-різницеві методи в просторово-часовій області. Але прямі числові методи, наприклад, метод кінцевих різниць у часовій області (finite difference time domain (FDTD) method), вимагає великих обчислювальних ресурсів та має слабкі місця в ході моделювання відкритих об'єктів і криволінійних границь. Таким чином, є *актуальною* тема дисертаційної роботи, яка направлена на дослідження активних і пасивних металевих наноструктур за допомогою строгих методів і побудови аналітичних та чисельно-аналітичних розв'язків, що гарантують отримання результатів з контрольованою точністю, а також простоту інтерпретації явищ, що спостерігаються.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційні дослідження зв'язані з виконанням тематичного плану науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки в межах держбюджетної теми № 248-2 «Моделювання нестаціонарних електромагнітних процесів у неоднорідних циліндричних діелектричних структурах» (номер держреєстрації 0110U002594, 2009 – 2012); за підтримки IEEE APS (у 2011 році отримана стипендія від Antennas and Propagation Society для проведення досліджень за темою «Accurate frequency and time domain modeling of electromagnetic scattering by an aggregate of coupled columns with steady-state and transient plasma»). Робота частково пов'язана з виконанням міжнародного конкурсного наукового проекту в рамках співробітництва ХНУРЕ із закордонними партнерами «Theoretical study of plasmon excitation and field emission dynamics in nanolasers consisting of metal nanowires coupled with an optically active gain medium», за підтримки німецької служби академічних обмінів (Deutscher Akademisher Austausch Dienst, DAAD), вересень – листопад 2012, університет ім. Фрідріха Шиллера м. Єна, Німеччина.

В усіх перелічених проектах і держбюджетній темі автор дисертації була виконавцем.

Мета і задачі дослідження. *Метою* даної дисертаційної роботи є дослідження стаціонарних та нестаціонарних електромагнітних полів у структурах різноманітної просторової морфології, що складаються з паралельних металевих ниток кругового перерізу, які розміщені в недиспергуючому діелектрику.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розглянути наступні *задачі*:

- Розробити чисельно-аналітичний алгоритм для знаходження «всіх» плазмонних власних мод металевої нитки, металевої нитки з порожниною всередині (трубки) та ансамблів з таких ниток, зокрема, ниток, які розміщені у вершинах правильного трикутника або квадрата. Для ефективного аналізу полів розв'язати задачу дифракції плоскої хвилі на всіх вказаних структурах.

- Розробити чисельно-аналітичний алгоритм для вивчення еволюції поверхневих плазмонів нитки, яка знаходиться в нестаціонарному середовищі.
- Розробити чисельно-аналітичний алгоритм для вивчення часової динаміки поверхневих плазмонів нитки і трубки, які збуджуються зовнішніми нестаціонарними локалізованими джерелами та спрямованими пучками.

Об'єкт дослідження – стаціонарні та нестаціонарні електромагнітні поля в різних просторових конфігураціях металевих ниток кругового перерізу.

Предмет дослідження – частотні характеристики та добротності плазмонних резонансів, просторові розподіли полів, динаміка перехідних процесів у структурах з плазмонними резонансами.

Методи дослідження. Основним методом дослідження стаціонарних полів у роботі є зведення задачі дифракції до нескінченної системи алгебраїчних рівнянь, розв'язок якої знаходився з контрольованою точністю.

В ході дослідження нестаціонарних полів застосовувався метод частинного розділення змінних. Для того, щоб відокремити часову змінну, використовувалося перетворення Лапласа, обернене перетворення знаходилось за допомогою формули Мелліна.

У дисертаційній роботі використовувався апарат математичної фізики, зокрема, рівняння в часткових похідних і метод функцій Гріна; апарат теорії функцій комплексної змінної, зокрема, операційне числення та теорія лишків; методи чисельного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна отриманих результатів визначається тим, що в роботі:

- Вперше досліджені комплексні власні частоти, добротності та розподіли полів поверхневих плазмонів металевої трубки з аксіально симетричною порожниною всередині. Встановлено, що існують плазмони, в яких магнітне поле на внутрішньому та зовнішньому боці трубки має один і той самий знак (парні плазмони), або різні знаки (непарні плазмони).
- Проведено подальше дослідження плазмонних резонансів ниток скінченного лінійного ланцюжка. Але, на відміну від попередніх досліджень, вперше встановлено, що серед «яскравих» плазмонів лінійного ланцюжка металевих ниток найбільшу добротність мають поперечні протифазні плазмони. Такі плазмони мають найбільшу чутливість до змін властивостей навколишнього середовища і їхня чутливість зростає зі збільшенням кількості ниток у ланцюжку. Показано, що у ланцюжку металевих ниток положення ділянки значної концентрації поля на субхвильових просторових масштабах залежить від кількості ниток. Зі зростанням кількості ниток у ланцюжку спостерігається зростання інтенсивності поля на цих ділянках.
- Вперше досліджені всі класи як поворотної, так і дзеркальної симетрій; просторові розподіли полів, спектральні характеристики та добротності поверхневих плазмонів ансамблів ідентичних металевих ниток, зокрема, ниток, які розміщені у вершинах правильного трикутника або квадрата. Встановлено, що найбільшу чутливість до змін властивостей зовнішнього середовища мають

плазмони срібного трикутного кластера. В такій структурі спостерігається максимальна концентрація поля.

- Вперше отримано аналітичне описання часової динаміки поля поверхневого плазмону металевої нанонитки, що знаходиться в нестаціонарному діелектрику, показник заломлення якого змінюється в часі стрибком. Показано, що стрибок показника заломлення призводить до зсуву частоти поверхневого плазмону та збереження просторового розподілу поля.
- Вперше побудовано у вигляді перетворення Лапласа аналітичний розв'язок задачі збудження нестаціонарних плазмонів нанонитки та нанотрубки зовнішнім імпульсним джерелом. Показано, що внаслідок збудження імпульсним спрямованим пучком результативне поле являє собою асиметричну поверхневу хвилю, що біжить по поверхні структури.

Практичне значення отриманих результатів. У даній дисертаційній роботі розвинута методика для знаходження та класифікації всіх можливих мод зв'язаних (близько розташованих) металевих нанониток, зокрема, ниток, котрі розміщені у вершинах правильного трикутника або квадрата. Ефекти, які були виявлені при дослідженні їх частотних та просторових характеристик, можуть стати основою для розробки й керування параметрами оптичних антен, сенсорів і нанолазерів.

У роботі виявлені оптимізовані конфігурації нанониток, які характеризуються високою чутливістю до властивостей зовнішнього середовища, а також просторові конфігурації, які здатні в десятки разів збільшувати концентрацію ближнього поля.

Наведені у роботі дослідження нестаціонарних процесів в нанонитці та нанотрубці дозволили вперше отримати низку важливих результатів, котрі розширили та поглибили розуміння нестаціонарних явищ, а також показали принципово нові властивості часової динаміки електромагнітного поля. Так, наприклад, було виявлено, що при зміні в часовій області показника заломлення стрибком поверхневий плазмон резонансної структури перетворюється у поверхневий плазмон і при цьому відбувається зсув його частоти й зміна амплітуди. Отже, це є основою для створення швидкого й ефективного зсуву частоти в нанооб'єктах з плазмонним резонансом, що необхідно для приладів безпровідної передачі та обробки інформації.

Особистий внесок здобувача. У статтях та доповідях, опублікованих в співавторстві, особистий внесок автора полягає в наступному: у роботах [1, 3-5, 8-14, 16-24] автор брала участь у постановці задачі, виборі методу розв'язування, отриманні розв'язків, у виконанні чисельних розрахунків, обговоренні результатів та підготовці публікацій; у роботах [6, 7, 25, 26] – у виконанні чисельних розрахунків, інтерпретації результатів та підготовці публікацій; у роботах [2, 15] – у розробці чисельного апарата та підготовці публікацій.

Апробація результатів дисертації. Результати, викладені в даній дисертаційній роботі, обговорювалися й доповідалися на науковому семінарі інституту прикладної фізики університету ім. Фрідріха Шиллера м. Єна в жовтні 2012 року (кер. проф. Т. Перч) та на таких наукових конференціях і симпозіумах:

- International Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW): Харків (21 – 26 червня 2010);
- International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON): Стокгольм (26 – 30 червня 2011);
- International Conference on Laser and Fiber-Optic Numerical Modelling (LFNM): Харків (4 – 8 вересня 2011);
- International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT): Київ (20 – 23 вересня 2011);
- International Conference on Micro- and Nano-photonics material and devices (MINAP): Тренто (16 – 18 січня 2012);
- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP): Прага (26 – 30 березня 2012);
- International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET): Харків (28 – 30 серпня 2012);
- International Workshop on Theoretical and Computational Nanophotonics (TaCoNa): Бад Хонеф (24 – 26 жовтня 2012);
- European Microwave Week (EuMW): Амстердам (31 жовтня – 2 листопада 2012);
- Young Scientists Conference (YSC): Харків (28 листопада – 2 грудня 2011, 2 – 6 грудня 2013);
- Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті»: Харків (18 – 20 квітня 2011, 17 – 19 квітня 2012, 22 – 24 квітня 2013, 14 – 16 квітня 2014);
- International Conference for Young Scientists «Low temperature physics»: Харків (6 – 10 червня 2011, 14 – 18 травня 2012, 3 – 7 червня 2013).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 26 наукових працях, в тому числі 7 статях [1-7] фахових зарубіжних та українських наукових журналах, а також 19 доповідях [8-26] на міжнародних та українських конференціях, симпозіумах.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, переліку умовних позначень, п’яти розділів, висновків та списку використаних джерел. Її загальний обсяг складає 145 сторінок, з них 126 сторінок основного тексту. Дисертація містить 56 рисунків (з них 2 – на окремій сторінці). Список використаних джерел на 17 сторінках нараховує 150 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність обраної теми, сформульовані мета та задачі дослідження, визначені об’єкт, предмет і методи дослідження, що використовуватимуться. Також наведено зв’язок роботи з науковими програмами та темами. Показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, перераховані дані про їх апробацію та публікації, де підкреслено особистий внесок автора.

Перший розділ має оглядовий характер. Проаналізовані як числові, так і аналітичні методи розв’язування стаціонарних та нестаціонарних задач електродинаміки. Основною перевагою прямих чисельних методів є їх універсальність, однак при цьому виникає необхідність використання потужних обчислювальних машин, також можуть виникнути складності з інтерпретацією результатів, інколи з’являються проблеми із повільною збіжністю або стійкістю розв’язку. Аналітичні розв’язки дають глибоке розуміння основних фізичних властивостей явищ, що досліджуються, але їх можливо застосовувати тільки для вузького класу задач. Чисельно-аналітичні методи, що поєднують вказані два підходи, надають можливість створення ефективних обчислювальних алгоритмів та полегшують інтерпретацію отриманих результатів.

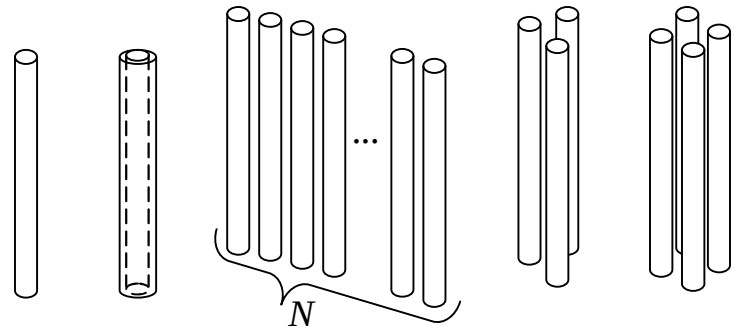


Рис. 1. Просторове розміщення металевих ниток: (а) відокремлена нитка, (б) трубка, (в) лінійний ланцюжок, (г) трикутний кластер, (д) чотирикутний кластер

Характерною особливістю взаємодії світла з металевими наноструктурами є існування плазмонів – хвиль, що виникають на поверхні металу внаслідок колективних коливань електронів. Спектр поверхневих резонансів наночастинок і співвідношення між їх ефективностями поглинання та розсіювання залежить від вибору металу, а також від розміру, форми та структури наночастинок (від їх морфології). Інтенсивний розвиток технологій синтезу наночастинок останніми роками надав для дослідження широкий спектр різних форм наночастинок і наноструктур. Їх плазмонні властивості досліджують за допомогою низки числових методів. Проте вони залишаюсь поза увагою вивчення добротності плазмонів, хоча ця характеристика має принципове значення для багатьох застосувань.

Сьогодні значну увагу привертають до себе також плазмонні активні системи. Така структура може бути реалізована, якщо плазмонна наноструктура гібридизована з матеріалом, властивості якого можна регулювати у часі. Таким

чином, виникає необхідність використання строгих методів, які дозволяють досягти глибокого розуміння нестаціонарних процесів, що відбуваються в металевих наноструктурах.

У **другому** розділі досліджені поверхневі та об'ємні плазмони металевої нитки (рис. 1 (а)). Її моделлю є круговий циліндр радіуса a нескінченої протяжності, діелектрична проникність внутрішнього середовища якого описується моделлю Друде $\varepsilon_p = 1 - \omega_p^2 \cdot (\omega(\omega - i\gamma))^{-1}$, де ω_p – плазменна частота, γ – коефіцієнт поглинання. Зовнішнє середовище – діелектрик із діелектричною проникністю ε_1. Всі середовища вважаються немагнітними, залежність від часу задається у вигляді $e^{i\omega t}$. Вихідними рівняннями є рівняння Максвела, доповнені матеріальними рівняннями та граничними умовами.

Досліджені власні стани полів (плазмонні моди), які існують у відсутності джерел, та коливання, що збуджені сторонніми полями. Всі власні частоти, які задовольняють дисперсійному рівнянню, є комплексно значними $\omega = \omega' + i\omega''$, $\omega'' > 0$. Рівняння має нескінченну множину розв'язків за кожного фіксованого s (s – число варіацій поля за кутовою змінною), як для E- (паралельно), так і для H- (перпендикулярно) поляризованих полів в області прозорості металу ($\mathrm{Re}(\omega) > \omega_p$). Відповідні власні стани поля називають «об'ємними» плазмонами. В області непрозорості металу (на частотах нижче плазменної частоти) дисперсійне рівняння має єдиний розв'язок при кожному відмінному від нуля значенні s у випадку перпендикулярної поляризації та не має розв'язків у випадку паралельної поляризації. Вказані власні стани поля відповідають поверхневим (локалізованим) плазмонам. Важливою властивістю поверхневих плазмонів є їх значна локалізація поблизу границі. Далі в роботі вивчались саме такі плазмони і, відповідно, H – поляризовані поля.

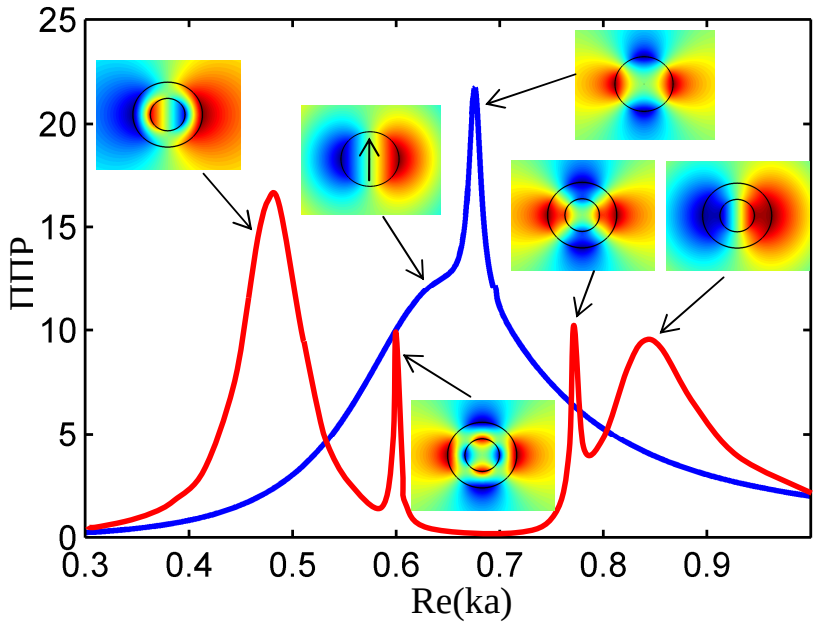


Рис. 2. ППР для металевої нитки (синя лінія) і трубки (червона лінія): $w_p = 1,\ \gamma = 10^{-3} \cdot w_p,\ b/a = 0{,}5$

Плазмон, який відповідає значенню $s = 1$, називають дипольним плазмоном, $s = 2$ – квадрупольним (вставка рис. 2, стрілкою вказано напрямок дипольного моменту збудженого плазмону). В роботі використані такі нормовані величини: $w_p = \omega_p a/c$ – нормована плазменна частота, $w = \omega a/c$ – нормована частота падаючої хвилі, $\gamma = 10^{-3} w_p$ – нормоване

поглинання (c – швидкість світла у вакуумі).

Були досліджені комплексні власні частоти, добротності та розподіли полів поверхневих плазмонів суцільної нитки і нитки з аксіально симетричною порожниною радіуса b – трубки (рис. 1 (б)). Добротність обчислювали за формулою $Q=\omega'/(2\omega'')$. Встановлено, що на відміну від суцільної металевої нитки, дисперсійне рівняння для трубки при кожному фіксованому s має не один, а два різних розв'язки. Існують плазмони, в яких на внутрішньому та зовнішньому боці трубки магнітне поле має один і той самий знак (парні плазмони) або різні знаки (непарні плазмони) (вставка рис. 2). На рис. 2 подано поперечний переріз розсіювання (ППР) для нитки і трубки. Використані такі значення параметрів: $w_p=1$, $\gamma=10^{-3}\cdot w_p$, $b/a=0{,}5$. У ППР нитки наявні дипольний ($\mathrm{Re}(ka)=0{,}63$, де $k=\omega/c$ – хвильове число) та квадрупольний ($\mathrm{Re}(ka)=0{,}675$) плазмони. У ППР трубки спостерігається розщеплення плазмонних резонансів. Непарні плазмони зміщуються в область більш низьких частот ($\mathrm{Re}(ka)=0{,}48$ та $\mathrm{Re}(ka)=0{,}6$), а парні – в область більш високих частот ($\mathrm{Re}(ka)=0{,}77$ і $\mathrm{Re}(ka)=0{,}83$). Більш широкі резонансні піки відповідають дипольним плазмонам, більш вузькі – квадрупольним.

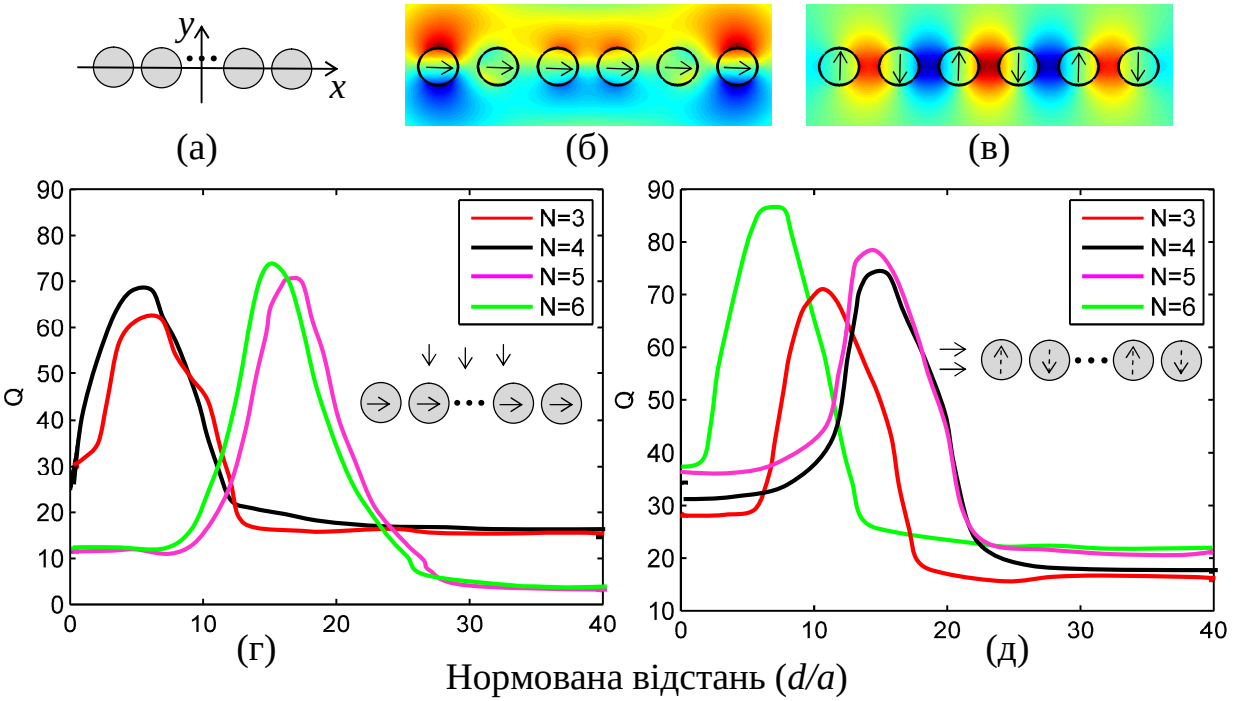


Рис. 3. (а) Схематична діаграма та осі симетрій лінійного ланцюжка; (б) розподіл ближнього поля поздовжнього синфазного та (в) поперечного протифазного плазмонів; залежність добротності від нормованої відстані для (г) дипольних поздовжніх синфазних та (д) поперечних протифазних плазмонів у лінійному ланцюжку з N ниток ($w_p=1, \gamma=w_p\cdot 10^{-3}$)

У **третьому** розділі теоретично досліджені поверхневі плазмони лінійного ланцюжка ідентичних близько розташованих (зв'язаних) металевих

ниток (рис. 1 (в)). Відстань між нитками d. Для дослідження застосований строгий математичний метод, який полягає у зведенні рівнянь Гельмгольца, виписаних для поля кожної нитки, до нескінченої алгебраїчної системи рівнянь для знаходження невідомих коефіцієнтів. Матриця такої системи є матрицею Фредгольма, а тому зі збільшенням порядку усікання матриці наближений розв'язок прямує до точного, що дозволило знайти невідомі величини з контрольованою похибкою, що залежить від порядку редукції.

Така структура має дві осі симетрії (рис. 3 (а)), а всі власні стани поля розпадаються на чотири класи, які відрізняються один від одного наявністю дзеркальної симетрії (E) або антисиметрії (O) відносно осей x або y. Загальна кількість можливих збуджуваних гібридних плазмонів для ланцюжка із N ниток складає $2N$ за фіксованого значення кутового параметра s [1]. Ті плазмони, які збуджуються плоскою хвилею, в літературі називають «яскравими» плазмонами, а інші плазмони є «темними». На рис. 3 (б, в) показані розподіли ближніх полів поперечного протифазного та поздовжнього синфазного плазмонів, напрями дипольних моментів вказані стрілками. Тільки ці два дипольних плазмони є «яскравими». На вставках до рис. 3 (г, д) вказано напрямки падіння зовнішньої плоскої хвилі, що збуджує такі плазмони.

Добротність відповідних резонансів залежить від відстані між нитками. Можна суттєво контролювати добротність резонансів, збільшуючи її, або навпаки зменшуючи, що важливо для подолання паразитних мод. Величина максимуму добротності збільшується зі зростанням кількості ниток у ланцюжку. Було встановлено, що добротність поперечних протифазних плазмонів дещо перевищує добротність відповідних поздовжніх синфазних плазмонів (рис. 3 (г, д)).

Зі збільшенням відстані між нитками власні частоти гібридних плазмонів наближуються до відповідних частот плазмонів відокремленої нитки. Зі зменшенням відстані відбувається так зване розщеплення мод, яке виражається у відхиленні резонансної частоти зв'язаної моди від моди відокремленої нитки. Встановлено, що власні частоти «яскравих» плазмонів при зближенні ниток зсуваються вниз, найбільший зсув резонансної частоти демонструють поздовжні синфазні плазмони.

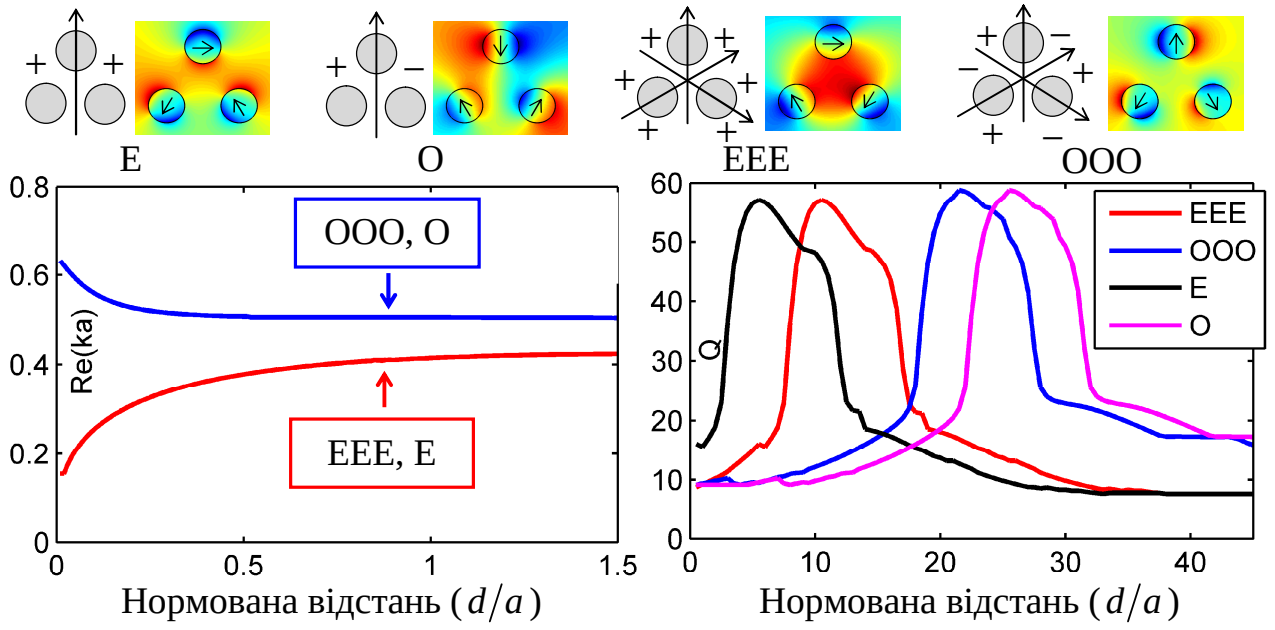
Було показано, що в проміжках між срібними нитками утворюються ділянки локалізації поля на відстанях, набагато менших довжини хвилі, причому збільшення інтенсивності спостерігається зі зменшенням відстані між нитками. Із наростанням кількості ниток у ланцюжку відбувається зростання інтенсивності, а положення ділянки локалізації залежить від кількості ниток у ланцюжку.

Встановлено, що в лінійному ланцюжку срібних нанониток поперечні протифазні плазмони мають найбільшу чутливість до зміни властивостей зовнішнього середовища, причому така чутливість збільшується зі зростанням кількості ниток у ланцюжку. Зсув резонансної довжини хвилі вказаних плазмонів досягає максимуму, коли відстань між нитками приблизно дорівнює довжині хвилі, що співпадає з положенням максимуму їх добротності.

У **четвертому** розділі досліджені поверхневі плазмони ансамблів зв'язаних металевих ниток, зокрема, ниток, які розміщені у вершинах правильного трикутника або квадрата (рис. 1 (г) та (д)). Такі структури були названі кластерами, відповідно, трикутної або чотирикутної конфігурації. Для розв'язування задачі застосований строгий математичний метод, розроблений для лінійного ланцюжка та розвинутий для вивчення таких ансамблів. В аналітичному вигляді отримані системи алгебраїчних рівнянь для всіх можливих класів симетрії поля.

Загальна кількість збуджуваних плазмонів у трикутному кластері дорівнює чотирьом (вставки рис. 4 подають всі можливі класи симетрії та просторові розподіли дипольних плазмонів). Досліджені способи гібридизації поверхневих плазмонів, їх спектральні характеристики, добротності та просторові розподіли полів. На рис. 4 показана залежність дійсних частин власних частот і добротностей дипольних плазмонів від відстані між нитками в трикутному кластері ($w_p = 0{,}5$, $\gamma = w_p \cdot 10^{-3}$). Встановлено, що гібридні плазмони розпадаються на дві пари «майже» вироджених мод. EEE та E плазмони, а також OOO і O плазмони є «майже» виродженими в трикутному кластері (рис. 4), оскільки дійсні частини їх власних частот дуже близькі між собою, а уявні частини відрізняються. Показано, що плазмони, які мають поворотну симетрію (EEE), належать до «яскравих», а інші знайдені плазмони є «темними».

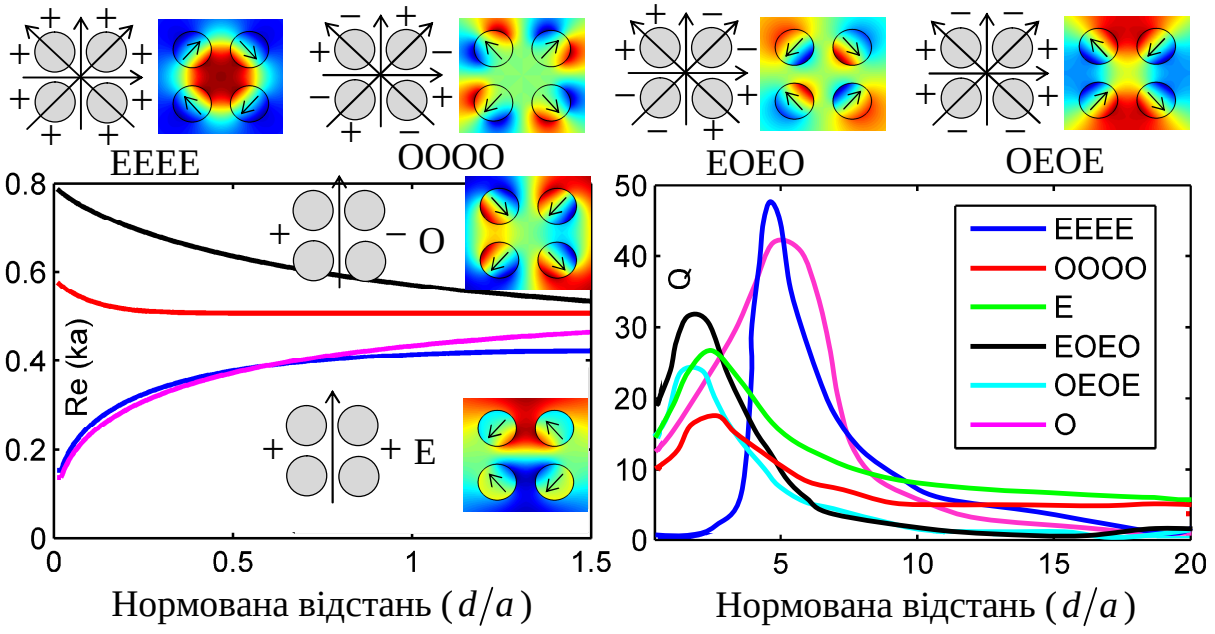
Для чотирикутного кластера повністю описані та класифіковані всі можливі плазмонні моди, їх частотні характеристики, добротності та просторові



(а) (б)

Рис. 4. Залежність (а) дійсної частини власної частоти і (б) добротності дипольних плазмонів від нормованої відстані між нитками трикутного кластера ($w_p = 0{,}5, \gamma = w_p \cdot 10^{-3}$)

розподіли полів. Дана структура має поворотну та дзеркальну симетрії, а загальна кількість збуджуваних плазмонів дорівнює шести. На вставках рис. 5 схематично зображені всі можливі класи симетрії та просторові розподіли полів дипольних плазмонів. На рис. 5 подана залежність дійсної частини власної частоти та добротності від нормованої відстані між нитками ($w_p = 0{,}5, \gamma = w_p \cdot 10^{-3}$). Для віддалених металевих ниток власні частоти гібридних дипольних плазмонів наближаються до частоти дипольного плазмону відокремленої нитки, а зі зменшенням відстані спостерігається суттєве відхилення від цієї величини. У цьому випадку «майже» виродженими є EEEE і OEOE плазмони, а також EOEO та E плазмони. Серед дипольних плазмонів максимальну добротність мають плазмони з поворотною симетрією.



(а) (б)

Рис. 5. Залежність (а) дійсної частини власної частоти і (б) добротності дипольних плазмонів від нормованої відстані між нитками чотирикутного кластера ($w_p = 0{,}5, \gamma = w_p \cdot 10^{-3}$)

Встановлено, що в такій конфігурації «яскравими» є плазмони, що характеризуються поворотною симетрією (EEEE), а також плазмони, поля яких симетричні відносно вертикальних і горизонтальних осей, але антисиметричні відносно діагоналей (OEOE). Інші знайдені поверхневі плазмони є «темними».

Встановлено, що плазмони срібного трикутного кластера мають найбільшу чутливість до зміни властивостей зовнішнього середовища порівняно із плазмонами квадратного кластера, а також порівняно із плазмонами аналогічних конфігурацій ниток із золота.

Показано, що в центрі симетрії ансамблей існують ділянки значної концентрації полів, причому із зменшенням відстані між нитками спостерігається збільшення інтенсивності. Поля найбільшої концентрації

притаманні срібному трикутному кластеру, проте такі поля менш локалізовані, ніж поля ниток у лінійному ланцюжку.

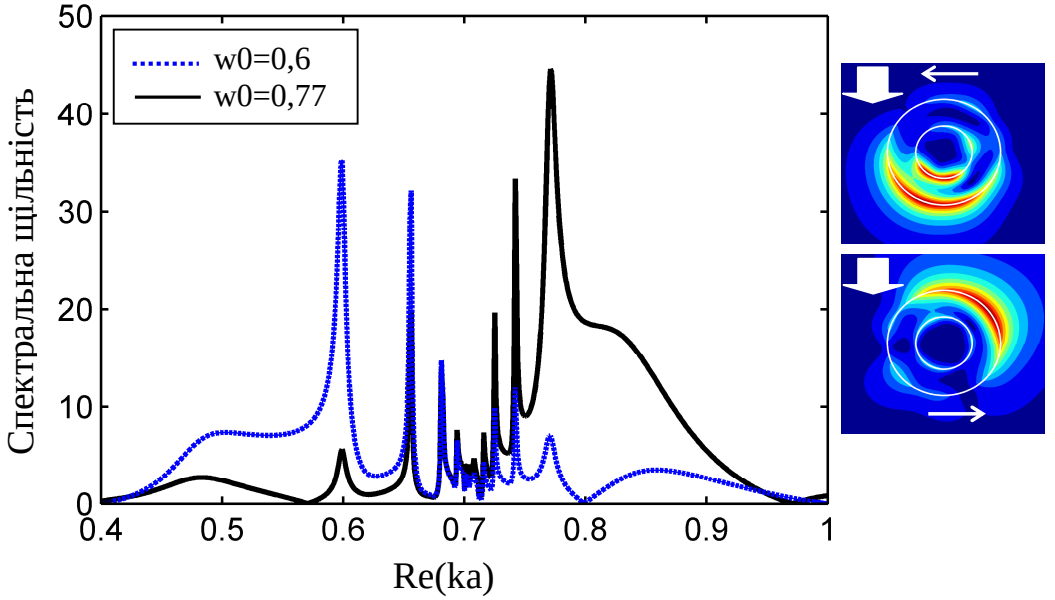


Рис. 6. Спектральна щільність поля в трубці ($w_p = 1,\ \tau = 2\pi a/c$)

У **п’ятому** розділі досліджуються нестаціонарні поля металевої нитки та трубки. Вихідними рівняннями є нестаціонарні рівняння Максвела, на основі яких було отримано відповідне інтегро-диференціальне рівняння, що описує нестаціонарні електромагнітні явища у середовищах із часовою дисперсією. За допомогою отриманих рівнянь була вивчена задача реакції поверхневого плазмону металевої нитки на різку зміну властивостей навколишнього середовища. Було припущено, що на поверхні нитки збуджено поверхневий плазмон і показник заломлення середовища змінюється від значення n_1 до значення n_2 в деякий фіксований момент часу, який не зменшуючи загальності, можна вважати нульовим. Вихідне рівняння в даному розділі було записано всередині нитки у вигляді

$$\Delta h + \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}h + \frac{1}{c^2}\frac{\omega_p^2}{\gamma}\frac{\partial}{\partial t}h - \frac{1}{c^2}\frac{\omega_p^2}{\gamma}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\int_0^t e^{-\gamma(t-t')}h(t')dt' = 0, \qquad (1)$$

де $\Delta = \left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}\right)$, h – це z – координата нестаціонарного магнітного поля.

Поле ззовні нитки задовольняє хвильовому рівнянню, яке в даному випадку було наведено у вигляді

$$\Delta h - \frac{n_2^2}{c^2}\frac{\partial^2 h}{\partial t} = 0,\ \rho > a\,. \qquad (2)$$

Єдиність розв'язку забезпечується наявністю початкових і граничних умов. У припущенні миттєвої зміни властивостей середовища задача допускає побудову аналітичного розв'язку у вигляді перетворення Лапласа. Обернене перетворення в часову область здійснювалось за допомогою оцінки лишків в особливих точках, які відповідають збуджуваним плазмонам, та інтегралів вздовж розрізів комплексної площини. Такий спосіб перетворення гарантує високу точність обчислень і забезпечує простоту інтерпретації результатів. Показано, що східчаста зміна показника заломлення у деякий фіксований момент часу призводить до збудження як об'ємних, так і поверхневого плазмону. Усі збуджені плазмони мають таку саму кількість кутових варіацій поля, що і плазмон, який існував до зміни параметрів середовища. Але внески збуджуваних об'ємних плазмонів нехтовно малі порівняно із внеском збуджуваного поверхневого плазмону. Тому був зроблений такий висновок: при зміні властивостей середовища поверхневий плазмон перетворюється у поверхневий плазмон такого самого просторового розподілу, але при цьому змінюється його амплітуда та частота.

Також у цьому розділі побудовано аналітичний розв'язок задачі збудження нестаціонарних плазмонів зовнішнім імпульсним джерелом. Для моделювання зовнішнього нестаціонарного пучка використано поняття імпульсного комплексного точкового джерела. В основі такої моделі лежить ідея Л. Фелсена аналітичного продовження функції поля звичайного точкового джерела в комплексний простір. При обчисленні оберненого перетворення Лапласа формула Мелліна була модифікована з урахуванням «комплексного часового запізнення». Як об'єкти, в яких збуджувались нестаціонарні поля, були розглянуті металева нитка та трубка. На рис. 6 наведена спектральна щільність поля в трубці при збудженні її імпульсним джерелом із залежністю від часу $\tilde{j}(t) = e^{i\omega_0 t}\left[\Theta(t) - \Theta(t-\tau)\right]$. Точка спостереження розташована всередині трубки поблизу границі. Введена нормована частота джерела $w_0 = \omega_0 c/a$. На рис. 6 суцільна лінія відповідає випадку, коли частота джерела співпадає з дійсною частиною частоти парного дипольного плазмону, а штрихова лінія – непарного дипольного плазмону. Тривалість імпульсу $\tau = 2\pi a/c$. Також у спектрі наявні множинні максимуми, пов'язані із вищими плазмонами. На вставках рис. 6 показані миттєві зображення модуля дійсної частини магнітного поля (верхня панель – $w_0 = 0{,}83,\ T = 100\pi$; нижня панель – $w_0 = 0{,}83,\ T = 140\pi$, де $T = tc/a$ – нормований час). Стрілки вказують напрямок падіння хвильового пучка й спрямованість руху поверхневої хвилі. Ця хвиля є результатом одночасного збудження плазмонів з різними кутовими залежностями та добротностями. Розподілення полів на поверхні трубки має ще більш складний характер, ніж для нитки, тому що при цьому збуджуються як парні, так і непарні плазмони з різними добротностями та розподілами полів.

ВИСНОВКИ

У даній дисертаційній роботі розв’язана актуальна наукова задача, що полягає в ефективному чисельно-аналітичному дослідженні стаціонарних і нестаціонарних полів у двовимірних структурах різноманітної просторової конфігурації, які складаються з металевих ниток кругового перерізу. Для розв’язання задачі застосований строгий математичний підхід, який дозволив виявити всі можливі плазмони конфігурацій без будь-яких обмежень на поперечний розмір та відстань між нитками. Цей підхід гарантував отримання результатів з контрольованою точністю, простоту інтерпретації явищ та створив повну фізичну картину нестаціонарних процесів, які спостерігаються в таких структурах.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Вивчені плазмонні резонанси відокремленої металевої нитки та трубки. Розглянуті об’ємні та поверхневі плазмони. Основну увагу приділено вивченню поверхневих (локалізованих) плазмонів, які існують в області непрозорості металу і тільки в H – поляризації. Досліджені їх комплексні власні частоти, добротності та розподіли полів. На відміну від суцільної металевої нитки, дисперсійне рівняння для трубки за певного фіксованого значення числа кутових варіацій поля матиме не один, а два різних розв’язки. Для трубки спостерігається розщеплення плазмонних резонансів: непарні плазмони зміщуються в область більш низьких частот, а парні – в область більш високих частот. Встановлено суттєве збільшення добротностей плазмонних резонансів для трубки порівняно з суцільною ниткою.

2. Встановлено, що добротність гібридних плазмонів лінійного ланцюжка зв’язаних металевих ниток залежить від відстані між нитками. Контролюючи відстань між об’єктами, можна як підсилювати, так і знижувати добротність. Показано, що серед «яскравих» плазмонів найвищу добротність мають поперечні протифазні плазмони.

3. Вперше вивчені власні стани полів металевих ниток, що розміщені у вершинах правильного трикутника або квадрата. Знайдені розподіли полів, їх власні частоти та добротності, показано розщеплення частот. Визначені «яскраві» і «темні» плазмони. Встановлено, що для віддалених ниток у ППР спостерігається тільки один резонансний максимум, проте зі зближенням ниток спектр ускладнюється та спостерігається збудження вищих плазмонів.

4. Досліджено посилення ближнього поля в лінійному ланцюжку й ансамблях ниток. Встановлено, що в проміжках між нитками утворюються ділянки значної концентрації поля на просторових масштабах набагато менших довжини хвилі. Положення ділянки концентрації залежить від кількості ниток у ланцюжку. Встановлено, що зі зростанням кількості ниток та зменшенням зазору між ними амплітуда поля збільшується. В центрі симетрії трикутного та чотирикутного ансамблей також спостерігається збільшення концентрації поля,

за амплітудою більшою від відповідної величини концентрації в ланцюжку з тією самою кількістю ниток, проте в цьому випадку ділянка концентрації поля менш локалізована.

5. Показано, як впливає просторове розміщення ниток з благородних металів на чутливість гібридних плазмонів зі зміною властивостей зовнішнього середовища. Встановлено, що зі зміною властивостей навколишнього середовища зсув резонансної довжини хвилі максимальний для плазмонів срібного трикутного кластера. Продемонстрована концентрація дальнього поля у вузький хвильовий пучок у ланцюжку срібних ниток. Зі збільшенням кількості ниток у ланцюжку спрямованість випромінювання покращується.

6. Здійснений розв'язок задачі нестаціонарного відгуку поверхневого плазмону металевої нитки, що розміщена в діелектрику, показник заломлення якого змінюється в часі стрибком. Аналітичний розв'язок отримано у вигляді перетворення Лапласа. Обернення у часовий простір знаходилось за формулою Мелліна та теоремою Коші про лишки. Було встановлено, що при зміні властивостей середовища поверхневий плазмон перетворюється у поверхневий плазмон такого самого просторового розподілу, але при цьому змінюється його амплітуда й частота.

7. Досліджено збудження поверхневих плазмонів металевої нитки та трубки зовнішнім нестаціонарним джерелом. Показано, що внаслідок збудження спрямованим імпульсом результативне поле має вигляд асиметричної поверхневої хвилі, що біжить по поверхні структури. Причому розподіл поля на поверхні трубки має більш складний характер, оскільки при цьому збуджуються як парні, так і непарні плазмони з різними добротностями та розподілами полів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список статей:

1. Stognii N.P. Plasmon resonances and their quality factors in a finite linear chain of coupled metal wires / Stognii N.P., Sakhnenko N.K // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2013. – Vol. 19, N. 3. – P. 4602207.

2. Sakhnenko N. Near-field patterns images of a cylindrical plasma column / Sakhnenko N., Stogniy N., Nerukh A. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2011. – Vol. 39, N. 11. – P. 2552 – 2553.

3. Стогний Н.П. Плазмонные резонансы в изолированном и паре связанных плазменных цилиндров / Стогний Н.П., Сахненко Н.К. // Вестник Харьковского национального университета. Радиофизика и электроника. – 2011. – № 19. – Вып. 983. – С. 84 – 90.

4. Стогний Н.П. Плазмоны в кластере нанопроводов треугольной или четырехугольной конфигурации / Стогний Н.П, Сахненко Н.К. // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. – техн. сб. – 2013. – Вып. 174. – С. 105 – 111.

5. Стогний Н.П. Нестационарный отклик поверхностного плазмона металлического нанопровода на изменение показателя преломления внешнего

пространства / Стогний Н.П., Сахненко Н.К. // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. – техн. сб. – 2013. – Вып. 172. – С. 7 – 13.

6. Стогний Н.П. Возбуждение плазмонных резонансов нанопровода и нанотрубки импульсным источником / Стогний Н.П., Сахненко Н.К. // Вестник Харьковского национального университета. Радиофизика и электроника. – 2013. – № 1067. – Вып. 22. – С. 48 – 54.

7. Стогний Н.П. Моделирование процессов в электромагнитном поле при образовании плазменного шнура / Стогний Н.П., Сахненко Н.К., Нерух А.Г. // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. – техн. сб. – 2010. – Вып. 162. – С. 41 – 47.

Список тез доповідей на конференціях:

8. Стогний Н.П. Собственные частоты гибридных плазмонов нанонитей, образующих кластеры треугольной или четырехугольной конфигурации / Стогний Н.П., Сахненко Н.К. // Материалы XVIII международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков. – 14 – 16 апреля 2014. – Т. 7. – С. 156 – 157.

9. Stognii N.P. Influence of the environment on the coupled metal nanowire plasmon resonances / Stognii N.P., Sakhnenko N.K. // Young Scientists Conference (YSC 2013), Kharkiv, Ukraine. – 2 – 6 December 2013. – SSR&NM–2.

10. Стогний Н.П. Смещение частоты плазмонного резонанса при изменении во времени показателя преломления внешней среды нанопровода / Стогний Н.П., Сахненко Н.К. // Материалы XVII международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков. – 22 – 24 апреля 2013. – С. 189 – 190.

11. Stognii N.P. Plasmon resonance shift due to time variations in refractive index of outer medium of silver nanowire / Stognii N.P., Sakhnenko N.K. // Proc. International Conference for Young Scientists «Low temperature physics», Kharkiv, Ukraine. – 3 – 7 June 2013. – P. 130.

12. Stognii N. Spectral characteristics of coupled plasmonic modes in aggregates of plasma columns / Stognii N., Sakhnenko N. // European Microwave Week (EuMW 2012), European radar conference, Amsterdam, The Netherlands. – 31 October – 2 November 2012. - P. 554 – 557.

13. Stognii N. Bonding and antibonding combinations of plasmons in aggregates of plasma columns / Stognii N., Sakhnenko N. // International workshop on theoretical and computational nanophotonics (TACONA 2012), Bad-Honnef, Germany. – 24 – 26 October 2012. – P. 164 – 166.

14. Stognii N.P. Plasmonic Modes of coupled plasma columns cluster with triangular or square configurations / Stognii N.P., Sakhnenko N.K. // Proc. International Conference on Mathematical Method in Electromagnetic Theory (MMET 2012), Kharkiv, Ukraine. – 28 – 30 August 2012. – P. 451 – 454.

15. Sakhnenko N. K. Modeling of transient plasmon dynamics in metallic cylinders / Sakhnenko N. K., Stognii N. P., Nerukh A. G., Chipouline A., Pertsch T. // Proc. International Conference on Mathematical Method in

Electromagnetic Theory (MMET 2012), Kharkiv, Ukraine. – 28 – 30 August 2012. – P. 35 – 38.

16. Stognii N.P. Frequency characteristics of plasmonic modes in coupled plasma columns cluster with square configuration / Stognii N.P., Sakhnenko N.K. // Proc. International Conference for Young Scientists «Low temperature physics», Kharkiv, Ukraine. – 14 – 18 May 2012. – P. 212.

17. Стогний Н.П. Увеличение добротности плазмонных резонансов в цепочке металлических нанопроводов / Стогний Н.П., Сахненко Н.К. // Материалы XVI международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков. – 17 – 19 апреля 2012. – С. 214 – 215.

18. Stognii N. Theoretical study of symmetric and antysymmetric plasmons in chains of coupled plasma cylinders / Stognii N., Sakhnenko N. // Proc. European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2012), Prague, Czech. Republic. – 26 – 30 March 2012. – POST1.33.

19. Sakhnenko N. Hybridization of plasmons in coupled nanowires / Sakhnenko N., Stognii N., Nerukh A. // Micro- and nano-photonic materials and devices (MINAP 2012), Trento, Italy. – 16 – 18 January 2012. – P. 69 – 72.

20. Stognii N. Eigenvalue problem in a linear chain of coupled infinite-long plasma cylinders / Stognii N., Sakhnenko N. // Young Scientists Conf. (YSC 2011), Kharkiv, Ukraine. – 28 November – 2 December 2011. – THzW – 11.

21. Stogniy N. P. Coupled plasma cylindrical columns as subwavelength antenna / Stogniy N. P., Sakhnenko N. K. // Proc. International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT 2011), Kyiv, Ukraine. – 20 – 23 September 2011. – P. 103 –105.

22. Stogniy N. Theoretical study of plasmon resonances in linear chain of silver nanowires / Stogniy N., Sakhnenko N. // Proc. International Conference on Laser and Fiber – Optical Networks Modeling (LFNM 2011), Kharkiv, Ukraine. – 4 – 8 September 2011. – 043.

23. Stogniy N. Plasmon resonances in linear array of coupled silver nanowires / Stogniy N., Sakhnenko N., Nerukh A. // Proc. International Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON 2011), Stockholm, Sweden. – 26 – 30 June 2011. – We.P.8.

24. Stogniy N. P. Plane wave scattering on chain of silver nanowires / Stogniy N. P., Sakhnenko N. K. // Proc. International Conference for Young Scientists «Low temperature physics», Kharkiv, Ukraine. – 6 – 10 June 2011. – P. 180.

25. Стогний Н.П. Исследование электромагнитного поля при образовании плазменного шнура / Стогний Н.П., Сахненко Н.К. // Материалы XV международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков. – 18 – 20 апреля 2011. – Т. 3. – С. 46 – 47.

26. Stogniy N. Modeling of transients in cylinder with time varying plasma / Stogniy N., Sakhnenko N. // Proc. Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW 2010), Kharkov, Ukraine. – 21 – 26 June 2010. – Y19.

АНОТАЦІЯ

Стогній Н.П. Стаціонарні та нестаціонарні електромагнітні поля в системах металевих ниток. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків, 2014.

У даній дисертаційній роботі розв’язана актуальна наукова задача, що полягає в ефективному чисельно-аналітичному дослідженні стаціонарних і нестаціонарних полів у двовимірних структурах різноманітної просторової конфігурації, які складаються з металевих ниток кругового перерізу. Для розв’язання задачі застосований строгий математичний підхід, який дозволив виявити всі можливі плазмони конфігурацій без будь-яких обмежень на поперечний розмір та відстань між нитками. Цей підхід гарантував отримання результатів з контрольованою точністю, простоту інтерпретації явищ та створив повну фізичну картину нестаціонарних процесів, які спостерігаються в таких структурах.

Були розглянуті відокремлена металева нитка та трубка, лінійний ланцюжок, кластер трикутної або чотирикутної форми з ідентичних зв’язаних ниток. Описані та класифіковані всі можливі плазмонні моди ниток вказаних конфігурацій, отримані відповідні рівняння для знаходження комплексних власних значень, побудовані розподіли полів у ближній зоні, а також досліджені власні частоти та добротності. Визначені «яскраві» та «темні» плазмони.

Встановлені конфігурації ниток, які демонструють поліпшення спрямованості випромінювання, характеризуються найбільшою чутливістю до зміни властивостей навколишнього середовища та мають ділянки значної концентрації ближнього поля.

Здійснений аналітичний розв’язок задачі нестаціонарного відгуку поверхневого плазмону металевої нитки, що знаходиться в діелектрику, показник заломлення якого змінюється в часі стрибком. Показано, що внаслідок збудження структури імпульсним спрямованим джерелом, результативне поле являє собою асиметричну поверхневу хвилю, що біжить по поверхні структури.

Ключові слова: електромагнітне поле, поверхневий резонанс, плазмони, нанонитки, лінійний ланцюжок, кластер, комплексна власна частота, стаціонарне та нестаціонарне середовище, сенсор, наноантена.

АННОТАЦИЯ

Стогний Н.П. Стационарные и нестационарные электромагнитные поля в системах металлических нитей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2014.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача эффективного численно-аналитического исследования стационарных и нестационарных полей в системах двумерных структур различных пространственных конфигураций, состоящих из металлических нитей кругового сечения. Для решения задачи применен строгий математический подход, который позволил выявить все возможные плазмоны конфигураций без каких либо ограничений на поперечный размер и расстояние между нитями. Этой подход гарантировал получение результатов с контролируемой точностью, простоту интерпретации явлений и создал полную физическую картину нестационарных процессов, которые наблюдаются в таких структурах.

Исследованы поверхностные плазмоны уединенной металлической нити и трубки. Были рассмотрены как объемные, так и поверхностные плазмоны. Основное внимание уделено изучению поверхностных плазмонов, существующих в зоне непрозрачности металла и только для *H*-поляризованных полей. Исследованы их комплексные собственные частоты, добротности и распределения полей. Установлено, что в отличие от сплошной металлической нити, дисперсионное уравнение для трубки при каждом фиксированном числе вариаций поля по углу будет иметь уже не одно, а два различных решения.

Описаны и классифицированы все возможные моды ансамблей треугольной или четырехугольной конфигурации металлических нитей. Получены соответствующие уравнения для нахождения комплексных собственных значений, построены распределения полей в ближней зоне, а также исследованы собственные частоты и добротности. Определены «яркие» и «темные» плазмоны.

Исследована концентрация ближнего поля в линейной цепочке и ансамбле нитей. Установлено, что с ростом числа нитей в цепочке и уменьшением зазора между ними амплитуда поля увеличивается. В то же время в центре симметрии ансамблей также наблюдается увеличение концентрации поля, по амплитуде превосходящее соответственную величину увеличения в цепочке из того же числа нитей, но в этом случае участок концентрации поля менее локализован.

В работе было показано влияние пространственного расположения нитей из благородных металлов на чувствительность гибридных плазмонов при изменении свойств внешней среды. Установлено, что наибольшей чувствительностью обладают плазмоны серебряного треугольного кластера. Продемонстрирована концентрация дальнего поля в узкий волновой пучок в цепочке нитей из благородных металлов. Установлено, что с ростом числа нитей в цепочке направленность излучения улучшается.

Аналитически решена задача нестационарного отклика поверхностного плазмона металлической нити на скачкообразное изменение во времени

показателя преломления внешней среды. Показано, что после скачка показателя преломления исходный поверхностный плазмон преобразуется в поверхностный плазмон с новым значением показателя преломления окружающей среды, при этом изменяется его частота и амплитуда.

В данной работе впервые для исследования возбуждения поверхностных плазмонов металлической нити или трубки внешним нестационарным источником было использовано понятие импульсного комплексного точечного источника. Показано, что в результате возбуждения импульсным комплексным источником, результирующее поле имеет вид бегущей асимметричной поверхностной волны. В отличие от сплошной нити, распределение поля на поверхности трубки носит более сложный характер, так как при этом возбуждаются как четные, так и нечетные плазмоны с разными добротностями и распределениями полей.

Ключевые слова: электромагнитное поле, поверхностный резонанс, плазмоны, нанонити, линейная цепочка, кластер, комплексная собственная частота, стационарная и нестационарная среда, сенсор, наноантенна.

SUMMARY

Stognii N.P. Stationary and transient electromagnetic fields in systems of metal wires. – Manuscript.

Thesis for PhD of Science degree in Physics and Mathematics with the specialization 01.04.03 Radiophysics. – Kharkiv National University of Radio Electronics Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2014.

Actual problem of radiophysics associated with analytical study and effective numerical simulation of stationary and transient fields in 2D metal nanowire based structures has been solved.

The following structures have been considered: an isolated wire; a metal shell; a finite linear chain; a cluster of triangular or square configuration. All possible plasmon modes of the wire configurations have been described. Corresponding equations for finding of complex eigenvalues have been obtained. Field distributions in the near field, their frequency and quality factor have been studied. "Bright" and "dark" plasmons were revealed. Optimized configurations with enhanced sensitivity and directionally were founded.

The problem of transient plasmon transformation due to time change of the environment has been solved analytically. Besides, it has been shown that excitation of the nanowire by the directed pulsed beam leads to excitation of running asymmetric surface wave.

Keywords: electromagnetic field, surface resonance, plasmons, nanowires, linear chain, cluster, complex eigenvalues, stationary and transient environment, sensor, nanoantenna.