

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова

НАТАРОВ ДЕНИС МИХАЙЛОВИЧ

УДК 537.86 : 535.417.2

**ПЛАЗМОННІ ТА ГРАТКОВІ МОДИ В РОЗСІЯННІ, ПОГЛИНАННІ ТА
ВИПРОМІНЮВАННІ СВІТЛОВИХ ХВИЛЬ СКІНЧЕННИМИ
РЕШІТКАМИ З НАНОНИТОК**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Носич Олександр Йосипович
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
НАН України (м. Харків)
головний науковий співробітник, лабораторія мікро- і
нанооптики відділу квазіоптики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Кокодій Микола Григорович
Національний фармацевтичний університет
МОН України (м. Харків)
професор кафедри фізики

доктор фізико-математичних наук, професор
Фітьо Володимир Михайлович
Національний університет «Львівська політехніка»
МОН України
професор кафедри фотоніки

Захист відбудеться 04 квітня 2019 р. о 15 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Ак. Проскури 12.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Ак. Проскури 12.

Автореферат розісланий 28 лютого 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І.В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дану роботу присвячено аналізу розсіяння та поглинання світла скінченними решітками різних форм, побудованих з нанорозмірних діелектричних та срібних ниток, а також аналізу власних мод, їх частот та порогів самозбудження для таких решіток як скінченно-періодичних відкритих резонаторів. Аналіз проводиться за допомогою граничних задач для гармонійних в часі лінійних рівнянь Максвелла, які зводяться до матричних рівнянь Фредгольма другого роду.

Актуальність теми. Загальна тенденція розвитку радіофізики рухається в напрямку освоєння більш короткохвильових діапазонів, тобто терагерцевого, інфрачервоного та світлового. Розвиток нанотехнологій дозволив контрольованим чином створювати решітки з об'єктів, що менші за довжину хвилі навіть у світловому діапазоні. Також створення нанорозмірних матеріалів та приладів дало поштовх розвитку таких нових напрямків, як нанофотоніка та нанооптика. Резонансні явища при розсіянні та поглинанні світлових хвиль металевими нанорозмірними об'єктами пов'язані, головним чином, зі збудженням поверхневих плазмонних резонансів, та мають широкий спектр практичних застосувань. Наприклад, при розробці біосенсорів плазмонні ефекти дозволяють суттєво посилити можливості виявлення та ідентифікації біологічних речовин, наявних в малих концентраціях.

Завдяки сучасним технологіям напилення, осадження та витравлювання, тонкі нанонитки та нанострічки з благородних металів стали важливими складовими багатьох приладів терагерцевого та світлового діапазонів довжин хвиль, наприклад, наноантен та біосенсорів. При цьому періодичні структури, тобто решітки з нанониток та нанострічок, привертають особливу увагу. Це пов'язано з нещодавно виявленими для них ефектами аномального відбиття, проходження, поглинання й випромінювання світла, а також гігантських ефектів Фарадея, Керра, Керкера, нелінійної генерації другої гармоніки та ін. В загальному випадку такі явища мають вигляд резонансів типу Фано та спостерігаються поблизу аномалій Релея відповідних нескінченних решіток. На даний момент теоретичне вивчення цих явищ на моделях нескінченних решіток показало, що вони зумовлені існуванням специфічних високочастотних мод, що отримали назву ґраткових мод. Вони вивчалися, зокрема, у роботах В.О. Белоброва, Т.Л. Зіненко, О.В. Шаповал та О.Й. Носича. Важливо відмітити, що подібне вивчення ґраткових мод для скінченних решіток з нанониток раніше не проводилося.

В даній дисертаційній роботі досліджуються розсіюючі та поглинаючі властивості решіток, що складаються з десятків та сотень нанониток. Для цього використовується широко відоме, у наш час класичне, розкладання функції поля в ряди Фур'є по азимутальним експонентам в локальних координатах кожної нитки. Використовуючи теореми додавання для циліндричних функцій та застосовуючи граничні умови на поверхні кожної нитки, ми отримуємо скінченно-блочне матричне рівняння, в якому кожен блок є нескінченним. Проте на відміну від більшості робіт, що використовували цей спосіб, для того,

щоб розв'язок мав гарантовану збіжність, у даній роботі невідомі коефіцієнти перенормовуються у такий спосіб, щоб нескінченне матричне рівняння було рівнянням Фредгольма другого роду – тоді кожен його блок може бути усіченим до скінченного числа, і чим більшим буде це число, тим розв'язок буде ближчим до точного.

Останнім часом також з'явився новий напрямок досліджень в нанофотоніці, пов'язаний з плазмонними модами – це аналіз та розробка плазмонних нанолазерів, де нанорозмірні металеві частинки, такі як нитки, пластинки чи трубки, є відкритими резонаторами, а активна зона формується різними способами. У даній дисертаційній роботі розглянуті властивості власних мод срібних нанониток та нанотрубок, а також решіток з них. Проведено аналіз лазерних мод, їхніх полів, порогів самозбудження та частот за допомогою «лазерної задачі на власні значення», яка була введена та сформульована на початку 2000-х років в роботах О.І. Смотрової та О.Й. Носича. Цей підхід дозволяє знайти лазерні моди, їхні частоти та пороги самозбудження за допомогою апарату класичної електродинаміки. У даній роботі знайдено також ґраткові моди нанолазерів на основі решіток з нанониток, що мають низькі пороги самозбудження та представляють величезний інтерес для розробників подібних пристроїв.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дана робота виконана в лабораторії мікро- і нано- оптики відділу квазіоптики ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України в рамках наступних держбюджетних науково-дослідних робіт, а також цільових і конкурсних програм та тем:

1. Конкурсна наукова тема Міністерства освіти і науки України «Інноваційне чисельне моделювання квазіоптичних фокуруючих систем» (шифр «Фокус», номер держреєстрації 0109U005351, 2009-2010, виконавець).
2. Державна конкурсна цільова програма "Нанотехнології та наноматеріали": «Фундаментальні математичні та чисельні дослідження оптичних електромагнітних полів окремих та зв'язаних мікрорезонаторних лазерів з нанорозмірними активними кулями, нитками та стрічками» (шифр «Світло», номер держреєстрації 0110U004737, 2010 -2014, виконавець).
3. Держбюджетна науково-дослідна робота ІРЕ ім. А. Я. Усикова НАН України: «Розробка методів оптики та квазіоптики для встановлення закономірностей та особливостей взаємодії терагерцевого випромінювання з фізичними та біологічними об'єктами» (шифр «Ореол», номер держреєстрації 0111U001079, 2012-2016, виконавець).
4. Держбюджетна науково-дослідна робота ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України: «Розвиток та застосування оптичних і квазіоптичних методів для дослідження процесів генерації і перетворення електромагнітних хвиль терагерцевого, інфрачервоного і видимого діапазонів» (шифр «Ореол-1», номер держреєстрації 0117U004036, 2017-2019, виконавець).
5. Програма наукового обміну НАН України з Держкомітетом з наукових і технічних досліджень Туреччини, спільно з Університетом Бількент, Анкара («Innovative electromagnetic modeling of multielement quasioptical focusing systems-mm and terahertz ranges», № 106E209, 2007-2009).

6. Програма європейського наукового фонду «New frontiers in millimeter and sub-millimeter wave integrated dielectric focusing systems» спільно з Інститутом електроніки та телекомунікацій Університету м. Ренн 1, Франція. Тема «Resonances in the scattering and focusing of waves by periodically structured ensembles of metal and dielectric wires» («Newfocus», 2010).
7. Програма європейського наукового фонду «New approaches to biochemical sensing with plasmonic nanobiophotonics» спільно з Інститутом фотоніки та електроніки АНЧР, Прага, Чеська республіка. Тема: «Modes of core-shell nanowire and nanotube plasmonic lasers» («Plasmon-Bionanosense», 2015).

Робота також була частково підтримана наступними конкурсними міжнародними стипендіями:

- «Resonant scattering of electromagnetic waves by finite periodic configurations of sub-wavelength circular wires», IEEE APS стипендія для аспірантів, 2011.
- «Broadband resonance absorption and scattering of light for ultrathin plasmonic solar cells and biosensors: modelling and optimization», Міжнародний Вишеградський фонд, Європейський Союз, спільно з Інститутом телекомунікацій, м. Варшава, Польща, 2012-2013.
- «Plasmon and periodicity assisted wideband absorbers for solar cells and biosensors», Rennes Metropole Mobility Grant спільно з Інститутом електроніки та телекомунікацій Університету м. Ренн 1, Франція, 2013.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження, по-перше, є вивчення особливостей та закономірностей розсіяння плоских електромагнітних хвиль скінченними решітками (одно- та двоперіодичними, у формі дискретного кута, хреста, параболічного рефлектора, у «хмарі» з довільно розташованими нитками) з діелектричних або срібних нанониток кругового перерізу в оптичному діапазоні довжин хвиль, по-друге, є вивчення власних мод нанолазерів на основі срібної нанонитки та нанотрубки з активними оболонкою та сердечником (для трубки) та на основі решіток зі скінченного числа квантових (тобто активних) та срібних, з активною оболонкою, нанониток.

У першому випадку розглядаються розсіяння та поглинання плоских хвиль двох поляризацій, вивчаються їхні закономірності та особливості при зміні параметрів решіток. У другому випадку шукаються власні поля лазерних мод структур, що вивчаються, і відповідні їм частоти та пороги самозбудження, досліджуються закономірності та особливості їхньої динаміки при зміні параметрів ниток, трубок та решіток з них.

Задля досягнення цих цілей було розглянуто наступні задачі:

- побудова двовимірної математичної моделі розсіяння Н- та Е-поляризованих плоских хвиль на довільному ансамблі зі скінченного числа паралельних діелектричних або срібних ниток кругового перерізу на основі збіжного методу;
- розроблення чисельних алгоритмів для розрахунку характеристик розсіяння та поглинання хвиль, а також полів у ближній та дальніх зонах структур, що вивчалися;

- систематичний розрахунок характеристик резонансного розсіяння та поглинання хвиль, а також резонансних полів у ближній та дальній зонах;
- розроблення чисельних алгоритмів для розрахунку власних полів, частот та порогів самозбудження мод нанолазерів на основі одиночної срібної нитки й трубки з активною зоною та решіток зі скінченного числа квантових і срібних ниток;
- розрахунок власних полів, частот та порогів самозбудження мод таких нанолазерів.

Об'єктом дослідження є явища розсіяння та поглинання плоских електромагнітних хвиль скінченними періодичними решітками з круглих матеріальних нанониток, а також випромінювання електромагнітних хвиль відкритими активними резонаторами на основі нанониток та решіток з них.

Предметом дослідження є резонансні характеристики розсіяння та поглинання хвиль скінченними періодичними решітками з круглих матеріальних нанониток, а також власних мод таких решіток, тобто спектри частот та порого самозбудження лазерних мод відкритих резонаторів на основі нанониток та решіток з них, разом з їх власними полями.

Методи дослідження. В роботі використовуються методи теорії граничних задач класичної електродинаміки. Задача розсіяння хвиль ставиться як гранична задача для функції поля, що задовольняє рівнянням Максвелла з точними граничними умовами, умові випромінювання на нескінченності та умові локальної обмеженості енергії. За допомогою часткового розділення змінних та використання теореми додавання для циліндричних функцій задача пошуку коефіцієнтів розкладання полів зводиться до блочного матричного рівняння Фредгольма другого роду. Кожен блок такого рівняння є нескінченним, але він може бути усіченим до скінченного числа, і чим більше це число, тим розв'язок рівняння ближчий до точного. Лазерна задача на власні значення ставиться з такими ж умовами за відсутності падаючого поля, а частоти та порого самозбудження лазерних мод відшукуються з контрольованою точністю як корені відповідного детермінантного рівняння.

Наукова новизна одержаних результатів

- вперше знайдено надвисокодобротні ґраткові резонанси при розсіянні Н-поляризованих хвиль скінченними решітками з діелектричних нанониток та показано, що їхня добротність збільшується при збільшенні кількості ниток в решітці;
- продемонстровано наявність двох типів резонансів: на плазмонних та ґраткових модах при розсіянні та поглинанні Н-поляризованих електромагнітних хвиль скінченними решітками з металевих нанониток у світловому діапазоні, та вперше вивчено їхній взаємний вплив та вплив геометричних і матеріальних параметрів решітки на характеристики розсіяння та поглинання;
- вперше продемонстровано електромагнітно-індуковану прозорість в характеристиках розсіювання таких решіток при збігу частот плазмонного та ґраткового резонансів;

- вперше проведено порівняльний аналіз коефіцієнтів відбиття скінченних решіток з металевих нанониток з відповідними нескінченними; зроблено висновок, що навколо частот ґраткових резонансів для наближення значень коефіцієнта відбиття скінченної решітки до значень для нескінченної потрібно значно більше елементів решітки (не менше 100), ніж у всьому іншому діапазоні (порядка 10);
- встановлено спроможність фокусування світлових хвиль дискретними параболічними рефлекторами з металевих нанониток за умови збудження плазмонного резонансу на кожній з ниток; на відміну від цього, показано, що ґраткові резонанси не відіграють ролі у фокусуванні;
- вперше продемонстровано «ознаку періодичності», що з'являється на рельєфах перерізу повного розсіяння як функції довжини хвилі та кута падіння при наявності періодичного ланцюжка з нанониток у «хмарі» з довільно розташованими нитками;
- вперше знайдено та класифіковано власні моди нанолазерів на основі срібної нанонитки та нанотрубки з активними оболонкою та сердечником, встановлено вплив геометричних параметрів таких нанолазерів на частоти та пороги самозбудження їхніх власних мод;
- вперше знайдено ґраткові лазерні моди решіток зі скінченного числа діелектричних або срібних нанониток, що мають низькі пороги самозбудження, та встановлено вплив геометричних і матеріальних параметрів на їхні частоти та пороги самозбудження.

Практичне значення одержаних результатів. Запропонований в даній роботі метод та розроблені на його основі чисельні алгоритми можна застосовувати для вивчення та аналізу характеристик розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль, ближніх та дальніх полів, а також частот та порогів самозбудження лазерних мод ансамблів будь-якої конфігурації зі скінченного числа матеріальних ниток, отримуючи результати з заданою точністю.

Наведені в роботі результати чисельного аналізу характеристик розсіяння та поглинання світлових хвиль різноманітними решітками з кругових нанониток мають фундаментальне значення. Крім того, решітки з металевих та діелектричних нанониток знаходять широке застосування при проектуванні наноантен, біосенсорів, поглиначів у сонячних батареях тощо.

ґраткові моди знаходять своє використання у нанолазерах. Ця група приладів тільки-но почала бурхливий розвиток, тому закономірності, що знайдено у даній дисертаційній роботі при вивченні плазмонних мод нанолазерів на основі одиночних срібних нанониток та нанотрубок, а також ґраткових мод решіток з нанониток, мають допомогти при створенні нових більш ефективних нанолазерів з низькими порогами самозбудження.

Особистий внесок дисертанта. Основні результати, що наведено в дисертації, належать автору. В написаних у співавторстві роботах [1-4,6-9] цей внесок полягає у виведенні основних рівнянь, розробці чисельних алгоритмів та написанні відповідного програмного коду, а також систематичному розрахунку характеристик розсіювання та поглинання, діаграм розсіювання, полів у

ближній зоні для решіток зі скінченного числа нанониток, разом з інтерпретацією отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися і обговорювалися на наступних наукових семінарах: Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (кер. проф., академік НАН України П.М. Мележик), Інституту досліджень з електромагнітної теорії ім. Дж. Гріна Університету м. Ноттінгем, Великобританія (кер. проф. Т.М. Бенсон), Інституту телекомунікацій, м. Варшава, Польща (кер. проф. М. Марчіняк), Інституту фотоніки та електроніки АН Чеської республіки, м. Прага (кер. проф. І. Чтирокі), Токійського технологічного університету, м. Токіо, Японія (кер. проф. Т. Ямасакі). Крім того, вони доповідалися на наступних міжнародних наукових конференціях, воркшопах та симпозиумах:

- Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Мюнхен (2010), Стокгольм (2011), Картагена (2013),
- International Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub millimeter Waves (MSMW), Харків (2010, 2013)
- Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC), Тояма (2010),
- IEEE Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), Київ (2010), Харків (2012), Львів (2016),
- Conf. Theoretical and Comput. Nanophotonics (TACONA), Бад Хонейф (2011),
- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Прага (2012),
- Conference on Near-Field Optics (NFO), Сан Себастьян (2012),
- Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Нагоя (2012),
- IEEE Conf. Electronics and Nanotechnol. (ELNANO), Київ (2013, 2014, 2015),
- Conf. Microwaves, Radar and Wireless Com. (MIKON), Гданськ (2014),
- URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI-GASS), Пекін (2014),
- IEEE Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL-LFNM), Севастополь (2010), Харків (2011), Судак (2013), Одеса (2016),
- Young Scientist Forum on Applied Physics (YSF), Харків (2016),
- IEEE Conference UKRCON, Київ (2017),
- Workshop on Direct and Inverse Problems of EM and Acoustic Wave Theory (DIPED), Тбілісі (2018).

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 37 наукових працях, в тому числі в 7 статтях у наукових журналах [1-7] та в 30 роботах у збірниках праць міжнародних конференцій, основні з них [8-13].

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, списку використаних літературних джерел та двох додатків. Її повний обсяг складає 187 сторінок. Дисертація містить 88 рисунків. Список використаних джерел на 17 сторінках нараховує 162 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, наведено її загальні дані.

Розділ 1 присвячено огляду літератури за темою дисертації. В ньому подано огляд досліджень розсіяння електромагнітних хвиль скінченними решітками з ниток кругового перерізу. Наведено декілька найбільш поширених методів аналізу цієї проблеми, а також їхні недоліки та обмеження. Далі надано загальні відомості про плазмонні ефекти, що спостерігаються при розсіянні світла на металевих частинках. Також наведено залежності дійсної та уявної частин діелектричної проникності срібла від довжини хвилі в світловому діапазоні, які пораховані за допомогою кількох аналітичних моделей на основі формули Друде, а також експериментальних даних Джонсона й Крісті, апроксимованих сплайнами. Далі описано існування ґраткових мод (ГМ) в періодичних структурах. Наведено характеристики розсіяння та поглинання, що мають бути розраховані, а також оптичну теорему, що пов'язує перерізи повного розсіяння (ППР), поглинання (ПП) та екстинкції. Далі сформульовано лазерну задачу на власні значення для аналізу власних мод нанолазерів, як метало-діелектричних резонаторів з активними зонами.

У **розділі 2** вивчається задача розсіяння та поглинання світлових хвиль лінійною решіткою зі скінченного числа нанониток. Поперечний переріз такої решітки приведено на Рис. 1. Перш за все розглядається загальна двовимірна задача розсіяння Е- або Н- поляризованої плоскої хвилі на M паралельних нитках кругового перерізу. Вона розв'язується шляхом розкладання функції поля, що задовольняє двовимірному рівнянню Гельмгольца з коефіцієнтами $k^2\alpha^2$ всередині кожної нитки (де k – хвильове число, α – комплексний показник заломлення матеріалу нитки) та k^2 ззовні, в ряди Фур'є в кожній з областей у локальних координатах кожної нитки з урахуванням умов випромінювання Зоммерфельда та локальної обмеженості енергії. Після застосування граничних умов, які полягають у неперервності тангенціальних компонент поля на границі кожної нитки, задача зводиться до матричного рівняння з $M \times M$ блоків, кожен з яких є нескінченним, для вектора X невідомих коефіцієнтів розкладання поля:

$$[I + A(\alpha, ka, kd_{qj})]X = B, \quad A = \left\{ A_{m,n}^{(q,j)} \right\}_{\substack{m,n=-\infty \\ q,j=1}}^{+\infty}, \quad B = \left\{ B_m^{(q)} \right\}_{m=-\infty}^{+\infty}, \quad X = \left\{ x_m^{(q)} \right\}_{m=-\infty}^{+\infty}. \quad (1)$$

Важливим моментом є те, що невідомі коефіцієнти було перенормовано таким чином, що матричне рівняння (1) є системою лінійних алгебраїчних рівнянь Фредгольма 2-го роду, що витікає з нерівностей,

$$\sum_{\substack{m,n=-\infty \\ q,j=1}}^{+\infty} \left| A_{mn}^{(q,j)} \right|^2 < \infty, \quad \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \left| B_m^{(q)} \right|^2 < \infty. \quad (2)$$

Це гарантує збіжність коренів рівняння (1), в якому кожен блок є усіченим до N елементів, до точного розв'язку при зростанні N . Це дозволяє всім результатам, наведеним у даній дисертаційній роботі, бути збіжними та мати контрольовану точність, яку ми обмежили трьома-чотирма десятковими знаками.

Розрахунок розсіяння Н-поляризованої плоскої хвилі на одиночній срібній нанонитці у світловому діапазоні (довжина хвиль 300-500 нм) демонструє широкий пік плазмонного резонансу на графіках залежності ППР та ПП від довжини хвилі. Цей пік дещо зсунутий у червоний бік спектру від довжини хвилі, на якій дійсна частина діелектричної проникності срібла дорівнює протилежній по знаку дійсній частині діелектричної проникності зовнішнього простору. Він має низьку добротність, що визначається втратами у сріблі. Розповсюджена думка, що плазмонні резонанси пов'язані з нанорозмірними металевими розсіювачами, змусила нас дослідити виникнення цих резонансів на нитках радіусу, більшого за 100 нм. В результаті ми показали, що плазмонні резонанси спостерігаються й на великих нитках до тих пір, поки довжина затіненої частини зовнішньої границі нитки не почне значно перевищувати довжину поширення поверхневої плазмонної хвилі, яка росте з λ у вільному просторі, однак обмежена десятками й кількома сотнями λ .

Далі розглядається розсіяння хвиль лінійними розрідженими решітками з M діелектричних та срібних нанониток радіусу від 30 нм до 70 нм. При розсіянні хвиль діелектричною решіткою (без втрат) з періодом $p > 4a$ у світловому діапазоні в залежностях ППР спостерігаються високодобротні резонанси на довжинах хвиль, близьких до аномалій Релея (для відповідної нескінченної решітки) $\lambda_{RA}^{\pm m} = (\cos \varphi_0 \pm 1)p / m$, $m = 1, 2, \dots$, добротність яких зростає з M . Це є резонанси на ГМ, а їхніми характерними особливостями є Фано форма у характеристиках розсіяння та поглинання (якщо є втрати), та наявність стоячої хвилі вздовж решітки, яка сформована квазігармоніками Флоке, що поширюються, і яка близька до функції $\cos(2\pi x / p)$. Для решіток з діелектричних ниток резонанси на ГМ спостерігаються для обох поляризацій, але в випадку Е-поляризації їхня добротність знижується приблизно у ϵ^2 разів, а

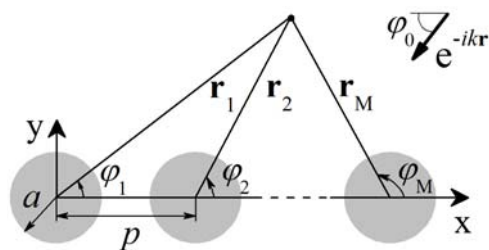


Рисунок 1 – Поперечний переріз лінійної решітки з круглих нанониток, що освітлюються плоскою хвилею

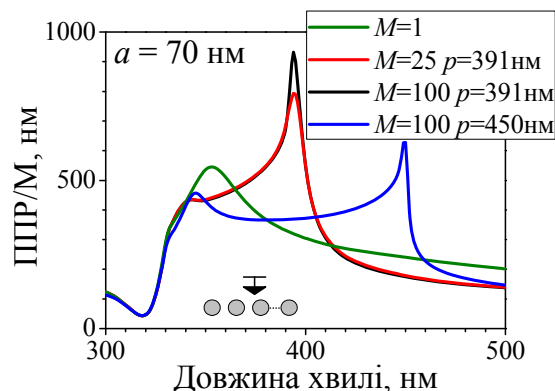


Рисунок 2 – Залежності ППР від довжини хвилі для лінійних решіток зі срібних нанониток

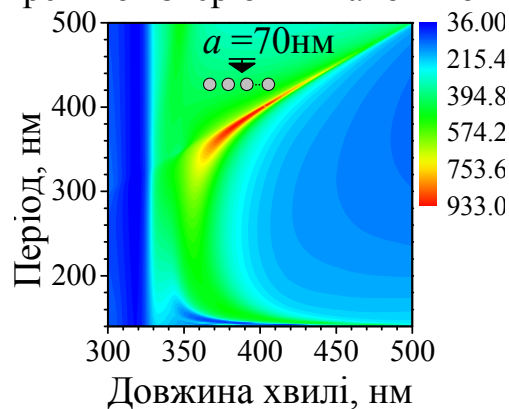


Рисунок 3 – Рельєф ППР в залежності від довжини хвилі та періоду для лінійної решітки зі 100 срібних нанониток

також з'являються яскраво виражені мінімуми ППР, поле в яких відповідає полю відповідної нескінченної решітки в аномалії Релея.

При розсіянні Н-поляризованої плоскої хвилі на решітці зі срібних нанониток у характеристиках розсіяння та поглинання виникають як плазмонні, так і граткові резонанси (див. Рис. 2, 3). Ми показали, що, змінюючи період решітки, можна досягти такого резонансу ППР, добротність якого суттєво більша у порівнянні з добротністю плазмонного резонансу, але при збігу довжини хвилі плазмонного резонансу й періоду решітки (при нормальному падінні), спостерігається явище електромагнітної індукованої прозорості і «переріз відбиття» (див. нижче) сягає мінімуму. У Е-поляризації плазмонні та граткові резонанси в характеристиках розсіяння та поглинання таких решіток не виникають, а на довжинах хвиль, близьких до аномалій Релея, виникає придушення розсіяння та поглинання, як і для діелектричних решіток.

Також проводилося порівняння розсіяння скінченними та нескінченними решітками. Було встановлено, що порівнювати потрібно коефіцієнти відбиття, які для скінченної решітки можна назвати «перерізами відбиття», тобто частиною ППР, що відповідає потужності, яка розсіяна у верхній півпростір, нормованої на кількість ниток M та їхній діаметр $2a$, а для нескінченної – коефіцієнтами відбиття, нормованими на величину $2a/p$. На Рис. 4 представлено залежності таких коефіцієнтів відбиття для решіток з нанониток радіусу 70 нм та періодом 450 нм від довжини хвилі. Порівняння показало, що решітки з 10 ниток достатньо для того, щоб ці величини співпадали з точністю $\pm 10\%$ у всьому дослідженому діапазоні довжин хвиль, окрім околу резонансу на ГМ, де необхідно від 100 до 500 ниток, аби досягти такого ж ефекту.

Розділ 3 присвячено дослідженню характеристик розсіяння та поглинання Н-поляризованих хвиль світлового діапазону різноманітними періодично-структурованими конфігураціями зі скінченного числа срібних нанониток. Розглядаються конфігурації у вигляді дискретного кута, дискретного хреста, двошарові та тришарові решітки, одношарові решітки з

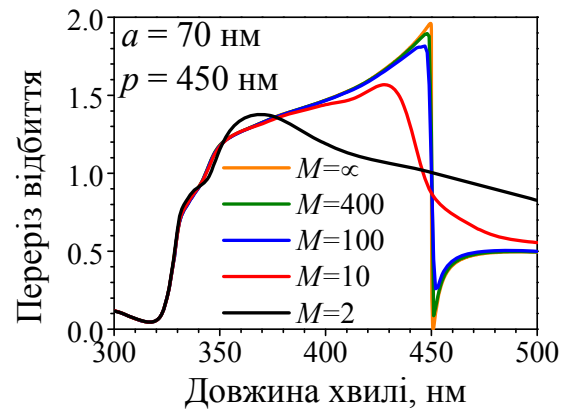


Рисунок 4 – Порівняння нормованих коефіцієнтів відбиття як функції довжини хвилі для скінченних та нескінченних решіток зі срібних нанониток

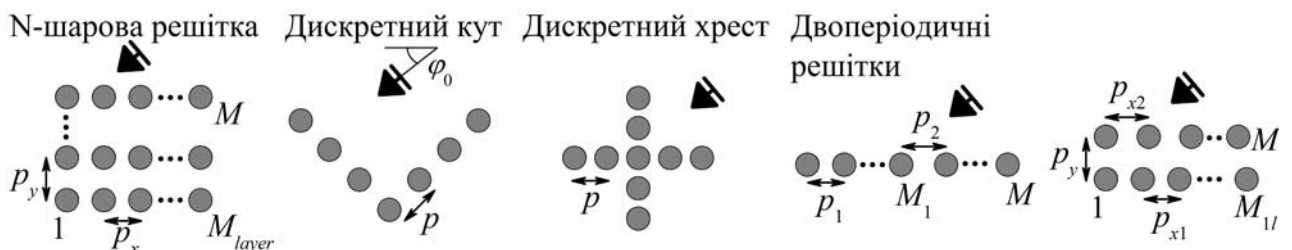


Рисунок 5 – Конфігурації решіток, розглянутих у розділі 3

двома періодами. Всі вони схематично зображені на Рис. 5. Крім того, моделюється дискретний параболічний рефлектор (ДПР) з нанониток. Також вивчається спроможність виявлення періодичної структури у безладі, для чого моделюється розсіяння хвиль лінійною решіткою з нанониток, яка знаходиться в «хмарі» з таких самих, псевдовипадковим чином розташованих, нанониток.

Нами було продемонстровано, що при розсіянні світла на всіх розглянутих структурах, у частотних залежностях ППР та ПП виникають плазмонні та граткові резонанси. При цьому, плазмонний резонанс завжди виникає поблизу довжини хвилі 338 нм та має невелику добротність, а резонанси на ГМ виникають неподалік довжин хвиль аномалій Релея, які залежать від кута падіння, а їхня добротність різниться й, насамперед, залежить від кількості ниток в решітці. Наприклад, для багат шарової решітки додавання шарів зменшує максимальні значення нормованих на M ППР та ПП у плазмонному резонансі, що викликано затіненням фронтальним шаром нижніх.

Дискретні кути та дискретні хрести цікаві тим, що для їхнього симетричного опромінення плоска хвиля падає під кутом 45° відносно кожного з їхніх плеч. Таким чином, довжина хвилі резонансу на ГМ зсувається від значення періоду решітки (близько якого вона знаходиться при нормальному падінні), а добротність резонансів на ГМ зростає. На Рис. 6 наведено рельєфи залежності ППР від довжини хвилі та періоду решітки з нанесеними також лініями +1-ї та +2-ї аномалій Релея для дискретних хрестів зі 101 срібної нанонитки радіусу 30 нм для двох варіантів опромінення: коли плоска хвиля падає вздовж плеча хреста ($\varphi_0 = 90^\circ$, якщо хрест розташований так, як на Рис. 5) та коли вона падає вздовж його діагоналі ($\varphi_0 = 45^\circ$).

Потрібно зазначити, що амплітуди ближнього поля сягають більш високих значень у максимумах не в плазмонному резонансі, а в резонансі на ГМ. Це вказує на перспективність застосування цього типу резонансів, замість більш традиційного плазмонного, при розробці різноманітних сенсорів й оптичних наноантен, де найбільш важливим є посилення ближнього поля.

Крім того, проектування сенсора коефіцієнта заломлення середовища, заснованого на резонансі на ГМ, приваблює тим, що його об'ємна чутливість порівняна з чутливістю традиційних сенсорів на плазмонному резонансі, але

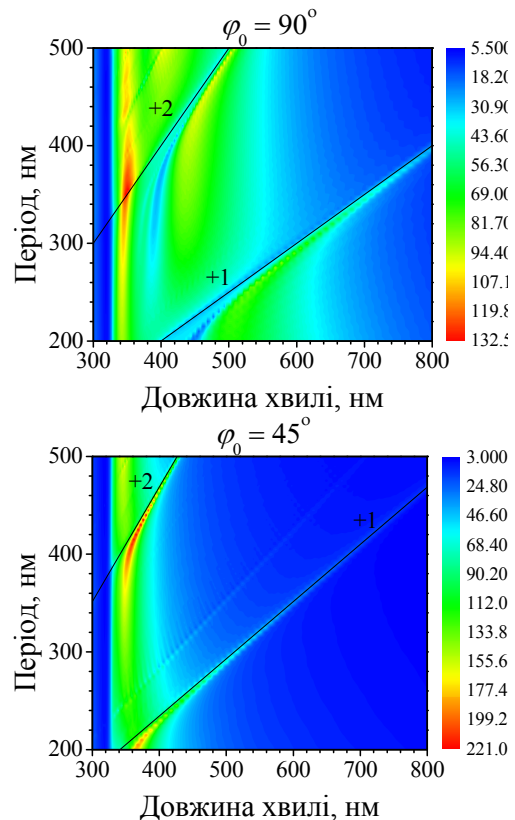


Рисунок 6 – Рельєфи ППР в залежності від довжини хвилі та періоду для дискретних хрестів зі 101 срібної нанонитки радіусу 30 нм

добротність може бути значно більшою, якщо число періодів перевищує 100. Це робить показник якості такого сенсора (добуток чутливості та добротності) більшим, ніж у традиційних сенсорів, при умові, що речовина, яка аналізується, заповнює шар, більший за довжину хвилі. Якщо сенсор використовує кут чи хрест з наночастинок замість лінійної решітки, то можливо просторово роз'єднати напрями освітлення та прийому розсіяного світла.

Високодобротні резонанси на ГМ також привабливі для розробки нанорозмірних тонких поглиначів для сонячних батарей. Це пов'язано з тим, що такі резонанси можливо налаштовувати на певні довжини хвиль шляхом вибору періоду. Тим самим можливо створювати смуги підвищеного поглинання на тих ділянках спектру, де відсутні плазмонні резонанси. Додаткові можливості можуть з'явитися при використанні більш складних конфігурацій, які мають не одну, а кілька субрешіток з різними періодами.

Нами було розглянуто дві конфігурації таких решіток: коли два ланцюжки з нанониток з періодами p_1 та p_2 розташовані поруч на одній лінії, а також коли вони розташовані один над іншим. Як і очікувалося, такі решітки демонструють резонанси на ГМ, пов'язаних з кожним періодом.

Фокусування хвиль з використанням цільних металевих рефлекторів широко використовується в оптиці та квазіоптиці, а параболічні рефлектори є найбільш поширеними й ефективними з них. Як було продемонстровано, ППР одиночної нанонитки стрімко зростає у плазмонному резонансі. Тому цікаво перевірити, наскільки ефективно фокусує світло ДПР зі срібних нанониток.

ДПР – це структура з M паралельних нанониток, центри перерізу яких розташовані симетричним чином на параболічній кривій на відстані p між сусідніми. ДПР моделювався таким чином, що центральна нитка співпадала з вершиною параболи, тому число M – непарне. Фокус параболи знаходиться у точці $(0; f)$, а парабола має апертуру D і фокусну відстань f та задається рівнянням $\bar{y} = a\bar{x}^2 / 4f$, де $\bar{y} = ya$, $\bar{x} = xa$. Рефлектор освітлюється нормально падаючою вздовж осі у плоскою хвилею. Як відомо, для звичайних суцільних рефлекторів оптимальним є значення $f/D = 0,25$. Ми вивчали фокусуючі властивості ДПР, а саме вплив на них плазмонного резонансу срібних нанониток, а також наявності квазіперіодичності, за допомогою нормованого на M коефіцієнту відбиття. Наше дослідження показало, що найкраще фокусує ДПР з $f/D = 0,25$ у плазмонному резонансі на кожній нитці. На Рис. 7 наведено картину ближнього поля у плазмонному резонансі для такого ДПР з 51 нитки радіусу 70 нм і $p = 450$ нм. На ньому добре видно яскраву пляму з центром у геоме-

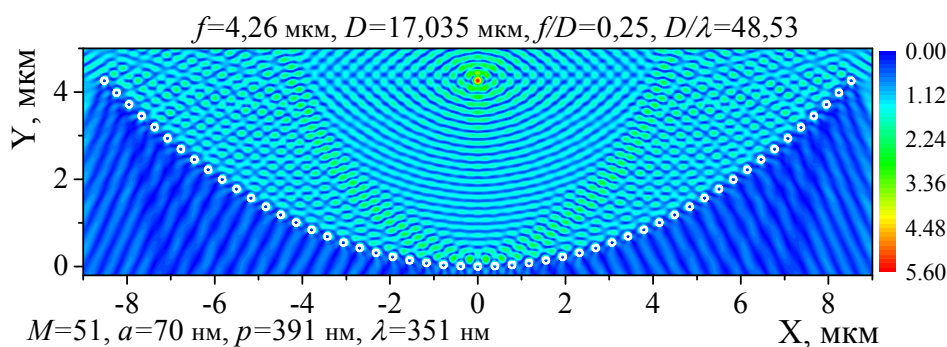


Рисунок 7 – Ближнє поле ДПР в плазмонному резонансі

тричному фокусі відповідної параболи. Що стосується резонансу на ГМ, то на довжинах хвиль, близьких до значення p , фокусування погіршувалося, тому що цей резонанс був відсутній на скривленій структурі.

У процесі вивчення резонансів на ГМ виникає природне питання, наскільки ці резонанси є чутливими до відхилень від періодичності, або навпаки, який ефект дає періодичне структурування довільного ансамблю ідентичних розсіювачів. Нами було розглянуто розсіяння плоскої хвилі на скінченній лінійній решітці з M_p срібних нанониток, яка знаходиться у «хмарі» з M_c подібних нанониток. Геометрію перерізу такої структури наведено на Рис. 8. Хмару, в центрі якої розташовували лінійну решітку, можна окреслити уявним колом діаметром 200 періодів. У ньому псевдовипадковим чином розташовувалися 200 ниток радіусу $a = 60$ нм, мінімальна відстань між якими становила $10,67a$, тобто хмара – розріджена. Лінійні решітки, які вставлялися у хмару, мали $M_p = 50, 100$ та 200 ниток з періодом $p = 450$ нм.

На Рис. 9 представлено рельєфи нормованого на M ППР як функції кута падіння та довжини хвилі для хмари зі 200 псевдовипадково розташованих ниток та такої ж хмари, у якій розташована решітка з 50 ниток. На Рис. 9 на верхньому рельєфі видно яскраву смугу плазмонного резонансу для всіх кутів падіння, ніяких інших ефектів не спостерігається. Далі видно, що коли у хмарі з'являється решітка з 50 нанониток, рельєф ППР змінюється настільки суттєво, що можна побачити характерну ознаку періодичності у вигляді W-образної області витягнутих уздовж ліній аномалій Релея смуг підвищеного розсіяння. Ця ознака стає більш виразною для більших M_p , а коли $M_p = M_c = 200$, смуга плазмонного резонансу навіть перестає бути видимою на фоні більш яскравої W-подібної області резонансів на ГМ. Крім того, на резонансних довжинах хвиль діаграми спрямованості таких структур демонструють гострі пелюстки в напрямках гармонік Флоке, що поширюються, а також інтенсивні пелюстки вздовж

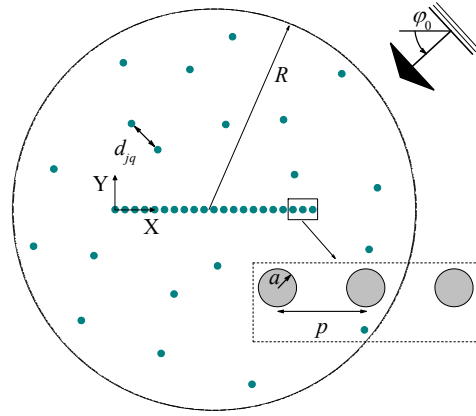


Рисунок 8 – Поперечний переріз решітки з нанониток у хмарі з подібних нанониток

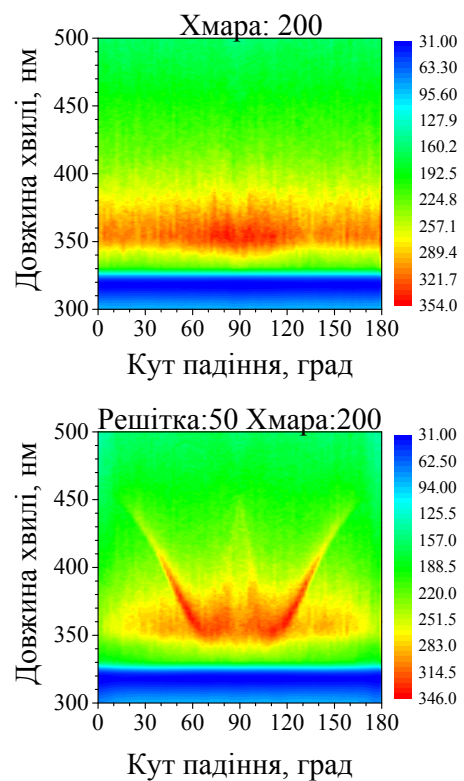


Рисунок 9 – Рельєфи ППР як функції довжини хвилі та кута падіння для хмари з 200 срібних нанониток та такої ж хмари, у центрі якої розташована решітка з 50 подібних ниток

площини решітки. Ці ефекти суттєво підсилюються разом зі збільшенням кількості елементів періодичної решітки.

Розділ 4 присвячено електродинамічному моделюванню за допомогою лазерної задачі на власні значення (ЛЗВЗ) двовимірних нанорозмірних лазерів на основі одиночних срібних нанониток та нанотрубок, а також періодичних решіток зі скінченного числа діелектричних та срібних нанониток. За допомогою такого моделювання ми знаходили частоти й пороги самозбудження, поля власних мод таких нанолазерів, а також проводили класифікацію знайдених мод.

Перш за все були розглянуті наноласери на основі одиночної срібної нанонитки з активною оболонкою, а також одиночної срібної нанотрубки з активними сердечником та оболонкою (Рис. 10). Оскільки такі

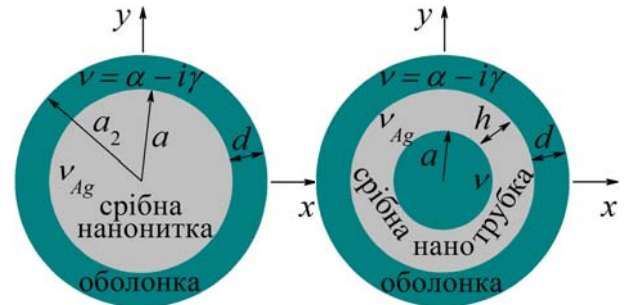


Рисунок 10 – Поперечні перерізи нанолазерів на основі срібної нанонитки та нанотрубки

наноласери цікаві перш за все плазмонними модами, то нами завжди розглядався випадок Н-поляризації, радіус субхвильових нанолазерів обирався ≤ 200 нм в діапазоні довжин хвиль від 190 нм до 700 нм. Позначимо функцією U компоненту магнітного поля H_z . Згідно лазерній задачі на власні значення, функція U має задовольняти двовимірному рівнянню Гельмгольца з комплексними показниками заломлення ν_s , де $s = 1, 2, 3 \dots S$ – це відповідна геометрії задачі концентрична область наноласера (в активних областях $\nu = \alpha - i\gamma$, де α – відомий показник заломлення, а γ – невідоме матеріальне посилення, яке дорівнює пороговому посиленню при стаціонарній генерації, тобто поріг самозбудження). Матеріальне посилення рівномірно розподілено по всій активній зоні й не залежить від довжини хвилі. На границях часткових областей має задовольнятися умова неперервності тангенціальних компонент поля, а також мають задовольнятися умови випромінювання Зоммерфельда на нескінченності та локальної обмеженості енергії.

Розділення змінних приводить до того, що всі моди розпадаються на незалежні ортогональні сімейства по азимутальному індексу m , а також по симетрії й антисиметрії відносно обраного напрямку $\varphi = 0$. При розв'язанні ЛЗВЗ розділення змінних дозволяє перейти до незалежних трансцендентних характеристичних рівнянь $\det \hat{T}(m, \lambda, \gamma) = 0$ для мод кожного індексу $m = 0, 1, 2 \dots$ та досліджувати їх окремо. Скінченновимірний матричний оператор \hat{T} характеристичного рівняння містить функції Бесселя та Ханкеля індексу m від аргументів, в які входять показники заломлення всіх матеріалів наноласера.

Для чисельного відшукування власних значень (λ, γ) – коренів характеристичного рівняння – ми використовували ітеративний алгоритм типу Ньютона, для якого необхідно задати початкові наближення шуканих величин. Через сильну дисперсію діелектричної проникності срібла, а також недослідженість мод подібних нанолазерів, ми брали початкові наближення

поблизу мінімумів на рельєфах функцій $|\det \hat{T}(m, \lambda, \gamma)|$. Діелектричну проникність срібла $\varepsilon_{Ag}(\lambda)$, як і у попередніх розділах, ми брали з експериментальних даних Джонсона і Крісті, які апроксимувалися сплайнами.

Аналіз порогів самозбудження та довжин хвиль власних мод нанолазерів на основі срібної нитки з активною оболонкою показав наявність кількох плазмонних мод з однаковим азимутальним індексом, а також мод оболонки, якщо товщина оболонки достатньо велика (> 80 нм). Найбільш важливою модою таких нанолазерів є дипольна плазмонна мода P_1^0 , довжина хвилі якої знаходиться у видимій частині спектру ($\lambda = 400 - 600$ нм) та яка має невисокі пороги самозбудження ($\gamma = 0,2 - 0,5$) порівняно з побічними плазмонними модами і модами оболонки, які по λ знаходяться в області високих втрат у сріблі. Оптимальний радіус срібної нанонитки для таких нанолазерів 40–60 нм, а товщина оболонки 60–100 нм.

Також нами було проведено порівняльний аналіз мод нанолазера на основі срібної нанонитки з використанням різних методів опису $\varepsilon_{Ag}(\lambda)$. Ми використовували аналітичні методи, а саме класичну формулу Друде та кілька її модифікацій, та експериментальні дані Джонсона і Крісті. Цей порівняльний аналіз показав, що використання класичної формули Друде призводить до зсуву довжини хвилі основної плазмонної моди в фіолетову частину спектру та відсутності побічних плазмонних мод. Використання модифікованих формул Друде дає хороший збіг з експериментальними даними, за виключенням частини діапазону, де $\text{Im}\varepsilon_{Ag}$ набуває від'ємних значень, в чому немає фізичного сенсу.

Конфігурація нанолазера на основі срібної нанотрубки з активними сердечником та оболонкою є більш привабливою, тому що окрім зовнішньої, існує ще й внутрішня границя між металом й активною зоною, яка також може підтримувати свої поверхневі плазмонні моди. Аналіз мод таких нанолазерів показав гібридизацію основних плазмонних мод, яка відбувається через наявність у нанотрубки двох границь. У результаті з'являються P_m^+ та P_m^- моди з максимумами поля біля обох границь трубки – внутрішньої та зовнішньої. Найбільш привабливою робочою модою таких нанолазерів є «різницева» дипольна P_1^- мода, яка випромінює у жовтій або зеленій частинах спектру та має невисокий поріг самозбудження (0.1). Оптимальною можна вважати конфігурацію з сердечником радіусу 30–50 нм й товщиною срібної нанотрубки 10 нм, вкритою 10 нм оболонкою. Збільшення товщини нанотрубки призводить до руйнування гібридизації основної плазмонної

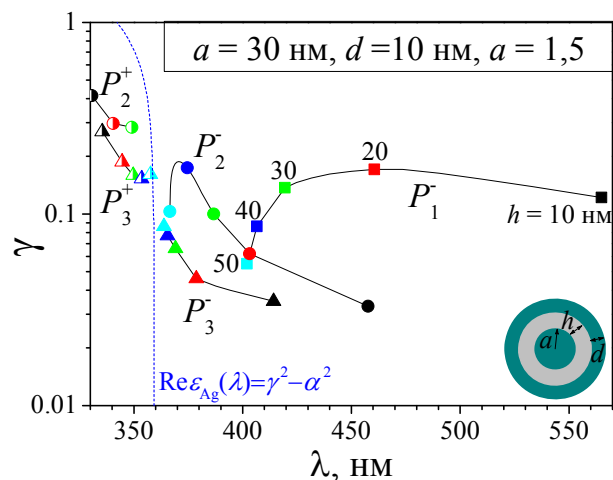


Рисунок 11 – Траєкторії власних значень мод лазера на основі срібної нанотрубки при зміні її товщини

моди. На Рис. 11 наведено траєкторії власних значень лазерних мод на площині (λ, γ) лазерів на основі нанотрубки при зміні її товщини.

Наявність високодобротних ґраткових резонансів при розсіянні світла решітками з діелектричних та срібних нанониток, що були досліджені у розділах 2 та 3, припускає наявність мод з низькими порогами самозбудження у відповідних задачах на власні значення. Тож далі нами було розглянуто ЛЗВЗ для нанолазерів на основі решіток з нанониток. Ми вивчали решітку з M квантових (тобто однорідних активних діелектричних) нанониток з комплексним показником заломлення $\nu = \alpha - i\gamma$, а також решітку з M срібних нанониток з показником заломлення $\nu_{Ag}(\lambda)$, вкритих активною оболонкою (з $\nu = \alpha - i\gamma$). Остання схематично представлена на Рис. 12. Розкладання в ряди поля в кожній з часткових областей, а також схема отримання системи рівнянь для знаходження невідомих коефіцієнтів розкладання поля для решітки з квантових ниток такі ж самі, як і для задачі розсіяння. З них потрібно лише виключити падаюче поле. Для решітки зі срібних ниток, вкритих оболонками, додається ще пара невідомих коефіцієнтів поля в оболонці. В результаті отримуємо однорідне блочне матричне рівняння Фредгольма 2-го роду. Цього достатньо, щоб його визначник існував як функція параметрів ЛЗВЗ – пари величин (λ, γ) , тобто довжини хвилі та порога самозбудження лазерної моди. Таким чином ЛЗВЗ зводиться до відшукування коренів нескінченного детермінантного рівняння,

$$\det \left\{ \delta_{mn} + A_{m,n}^{(q,j)}(\lambda, \gamma) \right\}_{\substack{m,n=-\infty \\ q,j=1}}^{\infty, M} = 0. \quad (3)$$

Корені рівняння (3) можна шукати різними чисельними методами. Ми використовували метод січних. Центр глобальної системи координат розташовувався в середині решітки (ми досліджували решітки з парного числа нанониток), яка має дві лінії симетрії – координатні осі x та y . Завдяки цьому можна зменшити матрицю рівняння (3) для більш ефективного чисельного розв'язання. Також важливу роль відіграє близькість початкового наближення

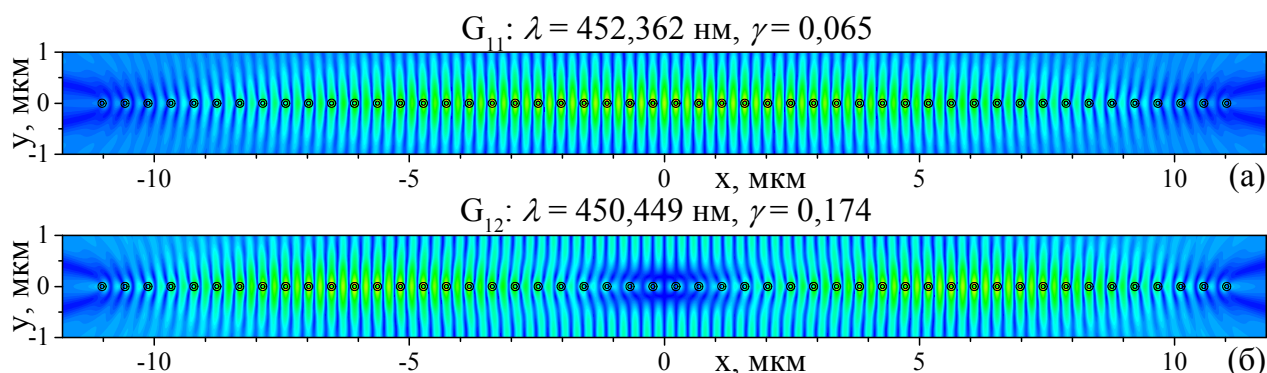


Рисунок 13 – Ближні поля ґраткових лазерних мод G_{11} та G_{12} решітки з 50 срібних нанониток радіусу $a = 40$ нм з активними оболонками з $\alpha = 1,414$ та товщиною $d = 40$ нм, період решітки $p = 450$ нм

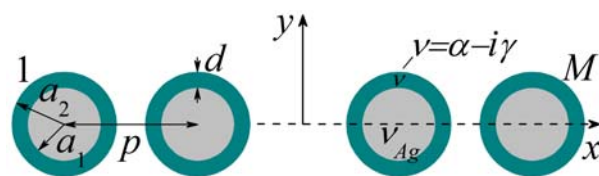


Рисунок 12 – Поперечний переріз решітки з M срібних нанониток з активними оболонками

до значення шуканого кореня. Для ґраткових мод джерелом початкових наближень λ для нас служили її резонансні значення з залежностей ППР відповідної задачі розсіювання нормально падаючої плоскої хвилі. Зазвичай збіг у значенні резонансної довжини хвилі з довжиною хвилі ГМ становив один-два десяткових знаки.

Таким чином, ми досліджували ґраткові моди, але загалом у світловому діапазоні решітки з нанониток мають велику кількість власних мод, яка зростає з ростом M . В цьому можна переконатися, побудувавши рельєф модуля детермінанта з (3). Але ґраткові моди якісно відрізняються від мод інших типів тим, що мають набагато нижчі пороги самозбудження (близько 10^{-2} – 10^{-3}). Ґраткові моди, довжина хвиль яких збігалася з довжиною хвиль відповідних резонансів на ГМ, мали найнижчі пороги самозбудження, а їхні поля, в яких світилася більшість ниток, були парними відносно обох координатних осей. Такі моди ми назвали основними ґратковими. Але в решітках з великим M окрім основної ГМ присутні також інші, які можна описати, ввівши цілий індекс n , який позначає, скільки частин, що «світяться», присутні в ближньому полі такої моди (для основної ГМ $n = 1$). На Рис. 13 наведено поле основної ГМ (G_{11}), а також моди з $n = 2$ (G_{12}), для решітки з 50 срібних нанониток радіусу 40 нм, вкритих активною оболонкою товщиною 40 нм з $\alpha = 1,414$, розташованих з періодом 450 нм. Також на Рис. 14 наведено траєкторії цих мод, коли змінюється M . По ним видно, що при збільшенні числа нанониток в решітці поріг самозбудження ґраткових мод істотно зменшується, причому найбільш швидке зменшення відбувається при зменшенні M до 200. Нами вивчалися і ґраткові моди таких решіток при зміні інших параметрів, таких як радіус нитки, товщина оболонки та її показник заломлення.

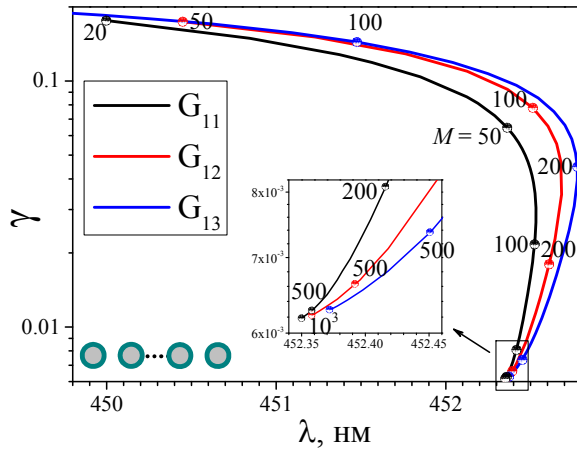


Рисунок 14 – Траєкторії власних значень мод G_{11} , G_{12} та G_{13} на площині (λ, γ) для решіток з Рис. 13 при зміні M

Висновки

У дисертаційній роботі розроблено математично обґрунтований чисельний алгоритм з гарантованою збіжністю для дослідження розсіяння електромагнітних хвиль скінченними решітками з матеріальних ниток кругового поперечного перерізу. Зазначену задачу зведено до розв'язання нескінченного блочного матричного рівняння Фредгольма другого роду, усічення кожного блоку якого до скінченного числа дозволяє отримати рішення з заданою точністю. Таким чином було досліджено характеристики розсіяння та поглинання, а також ближні поля лінійних решіток, дискретних кутів, хрестів та параболічних рефлекторів, багат шарових решіток та решіток з кількома періодами зі скінченного числа срібних та діелектричних нанониток. Крім того,

за допомогою детермінантних рівнянь на основі вищезазначених матричних рівнянь Фредгольма другого роду було досліджено власні моди плазмонних нанолазерів на основі срібної нанонитки та нанотрубки, а також решіток з діелектричних та срібних нанониток.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

- вперше чисельно досліджено з гарантованою точністю резонанси на високодобротних ґраткових модах в розсіянні та поглинанні електромагнітних хвиль скінченними решітками з діелектричних нанониток, досліджено їхні резонансні поля, продемонстровано, що добротність таких резонансів залежить від кількості ниток в решітці;
- продемонстровано наявність двох типів резонансів: на плазмонних та ґраткових модах при розсіянні та поглинанні Н-поляризованих ЕМ хвиль скінченними решітками з металевих нанониток у світловому діапазоні;
- вперше досліджено взаємний вплив резонансів на низькодобротних плазмонних модах та високодобротних ґраткових модах; показано, що при збігу дійсних частин їхніх власних частот спостерігається явище електромагнітної індукованої прозорості;
- досліджено можливість фокусування світлових хвиль квазіперіодичними дискретними параболічними рефлекторами з металевих нанониток при умові збудження плазмонного резонансу на кожній з ниток, а також продемонстровано відсутність ґраткових резонансів для таких рефлекторів;
- вперше проведено порівняння коефіцієнтів відбиття скінченних та нескінченних решіток зі срібних нанониток; продемонстровано, що в околі частот ґраткових резонансів для того щоб значення коефіцієнту відбиття скінченної решітки були близькими до значень для нескінченної решітки, необхідна набагато більша кількість ниток (≈ 100), ніж у решітці діапазону (≈ 10);
- вперше продемонстровано «ознаку періодичності», що з'являється на рельєфах перерізу повного розсіяння як функції довжини хвилі та кута падіння у вигляді областей високих значень цієї величини; ці області тягнуться вздовж ліній аномалій Релея відповідної нескінченної решітки з невеликим «червоним» зсувом; вони є добре видимими навіть для решітки з 50 срібних нанониток у «хмарі» з великого числа довільно розташованих таких самих ниток;
- вперше у межах класичної електродинаміки знайдено частоти, пороги самозбудження та поля власних мод нанолазерів на основі срібної нанонитки та нанотрубки з активними оболонкою та сердечником (у випадку нанотрубки); проведено класифікацію мод, у процесі якої було знайдено основну та кілька побічних плазмонних мод, досліджено вплив різних параметрів нанолазерів на частоти та пороги самозбудження їхніх власних мод;
- вперше знайдено та класифіковано ґраткові лазерні моди решіток зі скінченного числа діелектричних та срібних нанониток; продемонстровано, що їхні пороги самозбудження є набагато нижчими за пороги мод інших типів, а довжини хвиль з точністю до сотих нанометра співпадають з довжинами хвиль ґраткових резонансів у відповідній задачі розсіяння.

Список основных публикаций за темою дисертації

1. D.M. Natarov, V.O. Byelobrov, R. Sauleau, T.M. Benson, A.I. Nosich. Periodicity-induced effects in the scattering and absorption of light by infinite and finite gratings of circular silver nanowires // *Optics Express*. – 2011. - Vol. 19, No. 22. - P. 22176-22190.
2. D.M. Natarov, R. Sauleau, A.I. Nosich. Periodicity-enhanced plasmon resonances in the scattering of light by sparse finite grids of circular silver nanowires // *IEEE Photonics Tech. Letters*. - 2012. - Vol. 24, No. 1. - P. 43-45.
3. D.M. Natarov, R. Sauleau, A.I. Nosich. Resonance scattering and absorption of light by finite two-period gratings of circular silver nanowires // *Int. J. Semiconductor Physics, Quantum Electronics, and Optoelectronics*. – 2012. - Vol. 15, No. 3. - P. 204-208.
4. D.M. Natarov, R. Sauleau, M. Marciniak, A.I. Nosich. Effect of periodicity in the resonant scattering of light by finite sparse configurations of many silver nanowires // *Plasmonics*. – 2014. - Vol. 9, No. 2. - P. 389-407.
5. D.M. Natarov. Modes of a core-shell silver wire plasmonic nanolaser beyond the Drude formula // *IOP J. of Optics*. - 2014. - Vol. 16, No. 6. - P. 075002/6.
6. D.M. Natarov, M. Marciniak, R. Sauleau, A.I. Nosich. Seeing the order in a mess: optical signature of periodicity in a cloud of plasmonic nanowires // *Optics Express*. – 2014. - Vol. 22, No. 23. - P. 28190–28198.
7. E.A. Velichko, D.M. Natarov. Localized versus delocalized surface plasmons: dual nature of optical resonances on a silver circular wire and a silver tube of large diameter // *IOP J. of Optics*. – 2018. - Vol. 20, No. 7. – P. 075002/9.
8. D.M. Natarov, O.V. Shapoval, M. Marciniak, A.I. Nosich. Rayleigh anomalies in the E-polarized scattering by finite flat gratings of silver nanostrips or nanowires // *Proc. Int. Conf. Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-12)*, Kharkiv, 2012, pp. 44-47.
9. D.M. Natarov, M. Marciniak, R. Sauleau. Modeling of discrete parabolic reflector made of sub-wavelength plasmonic wires // *Proc. Int. Symp. Physics and Engineering of Microwaves, MM, and Sub-MM Waves (MSMW-13)*, Kharkiv, 2013, pp. 455-457.
10. D.M. Natarov. Electromagnetic analysis of a silver nanowire laser with a concentric active region // *Proc. URSI General Assembly and Scientific Symp. (URSI-GASS-2014)*, Beijing, 2014, BP1.37.
11. D.M. Natarov. Grating resonances in the scattering of light by periodically structured dielectric nanowires // *Proc. Int. Conf. Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET*2016)*, Lviv, 2016, pp. 236-238.
12. D.M. Natarov. Lasing thresholds of plasmonic modes of a silver tube nanolaser with active shell and core // *Proc. IEEE Ukraine Conf. Electrical Computer Eng. (UKRCON-2017)*, Kiev, 2017, pp. 748-751.
13. D.M. Natarov. Analysis of eigenmodes of laser based on finite quantum nanowire grating // *Int. Workshop Direct and Inverse Problems of Electromagn. and Acoustic Wave Theory (DIPED-2018)*, Tbilisi, 2018, pp. 76-79.

АНОТАЦІЯ

Натаров Д.М. Плазмонні та ґраткові моди в розсіянні, поглинанні та випромінюванні світлових хвиль скінченними решітками з нанониток. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2019.

Дану роботу присвячено аналізу характеристик розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль світлового діапазону скінченними решітками з діелектричних та срібних нанониток, а також аналізу частот, порогів самозбудження, полів власних лазерних мод таких решіток з активними зонами. Посилення у активній зоні моделюється через уявну частину коефіцієнту заломлення, яка має негативне значення. Її порогове значення – поріг самозбудження – разом з довжиною хвилі формують пару власних значень лазерної моди. Аналіз проводиться за допомогою граничних задач для гармонічних лінійних рівнянь Максвелла, які зводяться до матричних рівнянь Фредгольма другого роду, що дозволяє отримати результат з заданою точністю. В роботі вивчаються ґраткові резонанси в задачі розсіяння, а також ґраткові моди в лазерній задачі на власні значення, які відповідають комплексним полюсам функції поля періодичної структури. Демонструється посилення ефектів, пов'язаних з періодичністю, при збільшенні числа періодів в решітці, а також порівнюються скінченні та нескінченні решітки з нанониток. Для одиночних срібних нанониток та решіток з них вивчаються також плазмонні резонанси в задачі розсіяння та плазмонні моди нанолазерів на основі срібної нанонитки та нанотрубки з активними зонами. Проводиться класифікація лазерних мод, аналізуються їхні ближні поля і залежності порогів самозбудження та довжин хвиль від параметрів нанолазера.

Ключові слова: нанонитка, нанолазер, скінченна решітка, резонанс, плазмонна мода, ґраткова мода, активна зона, поріг самозбудження.

АННОТАЦИЯ

Натаров Д.М. Плазмонные и решеточные моды в рассеянии, поглощении и излучении световых волн конечными решетками из нанонитей. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2019.

Данная работа посвящена анализу характеристик рассеяния и поглощения электромагнитных волн светового диапазона конечными решетками из диэлектрических и серебряных нанонитей, а также анализу частот, порогов самовозбуждения, полей собственных лазерных мод таких решеток с активными зонами. Усиление в активной зоне моделируется через мнимую часть показателя преломления, которая имеет отрицательное значение. Ее пороговое значение – порог самовозбуждения – вместе с длиной волны

формируют пару собственных значений лазерной моды. Анализ проводится с помощью граничных задач для гармонических уравнений Максвелла, которые сводятся к матричным уравнениям Фредгольма второго рода, что позволяет получить результат с заданной точностью. В работе изучаются решеточные резонансы в задаче рассеяния, а также решеточные моды в лазерной задаче на собственные значения, которые соответствуют комплексным полюсам функции поля периодической структуры. Демонстрируется усиление эффектов, связанных с периодичностью, при увеличении числа периодов в решетке, а также сравниваются конечные и бесконечные решетки из нанонитей. Для одиночных серебряных нанонитей и решеток из них изучаются также плазмонные резонансы в задаче рассеяния и плазмонные моды нанолазеров на основе серебряной нанонити и нанотрубки с активными зонами. Проводится классификация лазерных мод, анализируются их ближние поля, а также зависимости порогов самовозбуждения и длин волн от параметров нанолазера.

Ключевые слова: нанонить, нанолазер, конечная решетка, резонанс, плазмонная мода, решеточная мода, активная зона, порог самовозбуждения.

SUMMARY

Natarov D.M. Plasmon and grating modes in scattering, absorption and emission of the optical waves by finite nanowire gratings. – Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate in Physics and Mathematics with the specialization 01.04.03 – radiophysics. – O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine, Kharkiv, 2019.

This work is dedicated to the analysis of characteristics of scattering and absorption of optical waves by finite gratings from dielectric and silver nanowires, as well as analysis of frequencies, self-excitation thresholds, fields of the lasing eigenmodes of such gratings with active regions. The gain in the active region is characterized by the imaginary part of refractive index, which is negative. Its threshold value – self-excitation threshold – with the wavelength form pair of the eigenvalues of the lasing mode. The analysis is performed using the boundary value problems for linear time-harmonic Maxwell's equations, which are reduces to the Fredholm second kind matrix equations, that guarantees controlled accuracy of numerical results. We study grating resonances in the scattering and absorption characteristics of the scattering problem, as well as the grating modes in the lasing eigenvalue problem, which correspond to the complex poles of the field function of a periodic structure. We demonstrate amplification of effects associated with periodicity with increasing number of periods in the grating, and compare finite and infinite gratings of nanowires. For stand-alone silver nanowires and gratings of them, we study plasmon resonances in the scattering problem and plasmon modes of nanolasers based on silver nanowires and nanotubes with active regions. We classify laser modes, analyze their near fields and the dependences of self-excitation thresholds and wavelengths on the parameters of a nanolaser.

Key words: nanowire, nanolaser, finite grating, resonance, plasmon mode, grating mode, active region, self-excitation threshold.

