

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

БЕЛОБРОВ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 537.86 : 535.417.2

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ ТА ПОРОГИ
САМОЗБУДЖЕННЯ ПЕРІОДИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ З
КРУГОВИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ, МЕТАЛЕВИХ ТА
КВАНТОВИХ НИТОК У ШАРУВАТОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 2017

Дисертація на правах рукопису

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 нано
оптики відділу квазіоптики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Маслов Вячеслав Олександрович
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
завідувач кафедри квантової радіофізики

доктор технічних наук, професор
Сухаревський Олег Ілліч
Науковий центр Повітряних Сил
Харківського національного університету Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба,
провідний науковий співробітник

Захист відбудеться 19 жовтня 2017 р. о 15 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: вул. Ак. Проскури 12, Харків, 61085.

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

Автореферат розісланий «15» 09 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



І.В. Іванченко

Дана робота присвячена аналізу власних електромагнітних полів (мод), їх частот та порогів самозбудження для періодичних відкритих резонаторів, що містять діелектричні, металеві та квантові нитки і знаходяться, в загальному випадку, в плоскошаруватому діелектричному середовищі. В якості допоміжних, вивчаються також двовимірні задачі дифракції монохроматичних плоских хвиль на решітках з кругових діелектричних і металевих нанониток. Під квантовими нитками, згідно з прийнятою в нанотехнологіях термінологією, маються на увазі нанонитки з матеріалу, що має посилення. Такими матеріалами можуть бути напівпровідники, полімери з домішкою барвників, а також кристалічні речовини з добавками іонів рідкісноземельних елементів. Всі вони здатні посилювати спонтанну емісію світла при накачуванні за рахунок створення інверсної населеності квантових станів. Аналіз базується на граничних задачах для гармонійних в часі рівнянь Максвелла, які зводяться до матричних рівнянь Фредгольма другого роду.

Актуальність теми. Сучасні пристрої і системи передачі та обробки інформації за допомогою електромагнітних хвиль швидкими темпами освоюють короткохвильові діапазони від терагерцевих хвиль до ультрафіолетового випромінювання. Тому, в даний час активно розробляються різноманітні джерела таких хвиль. Електронно-вакуумні джерела в цих діапазонах або відсутні, або мають дуже малу потужність. Найбільш перспективними джерелами є лазери на основі монокристалічних, напівпровідникових і полімерних мікрорезонаторів (розміром від одиниць до декількох сотень мікрон) і решітки з нанорезонаторів (розмірами від декількох десятків до декількох сотень нанометрів). Активні зони в таких лазерах утворюються або завдяки квантовим властивостям напівпровідників, або шляхом добавки барвників в полімерну матрицю або іонів рідкісноземельних елементів в кристалічний матеріал. Надання потрібної форми резонаторам здійснюється методами нанотехнологій, такими як молекулярно-променева епітаксія і сухе або вологе травлення, а для накачування застосовується або оптичне випромінювання (фотонакачка), або інжекція носіїв заряду з електродів.

З усього вищесказаного ясно, що виробництво мікролазерів на основі як одиночних резонаторів, так і решіток з нанорезонаторів вимагає наявності надзвичайно коштовних технологій. Не менше проблем пов'язано з вимірюваннями їх характеристик, особливо в терагерцевому діапазоні хвиль. Тільки порівняно невелике число передових лабораторій в світі займається розробкою і експериментальними дослідженнями подібних лазерів. В Україні подібних технологій поки немає. В силу цих обставин, попереднє моделювання зазначених лазерів і оптимізація їх геометрії ще на етапі проектування, до їх виготовлення, набувають критичного значення.

Слід підкреслити, що розробка ефективних мікро- і нанолазерів вимагає точного обліку їх геометрії і матеріальних параметрів, оскільки їх розміри порівняні з довжиною хвилі випромінювання. Більш того, однією з

фундаментальних властивостей лазерів є те, що вони випромінюють світло на дискретних частотах. Це пов'язано з поняттям *власних мод* як дискретних станів електромагнітного поля в резонаторах. Тим самим, будь-який лазер можна розглядати як відкритий резонатор, що містить в своєму складі активну зону, здатну при накачуванні генерувати електромагнітні хвилі.

До недавнього часу методи моделювання лазерних резонаторів вичерпувалися пошуком комплексних частот власних мод в *пасивних* резонаторах без урахування наявності активної зони. Одним з найбільш широко використаних був метод геометричної оптики (ГО, або теорія більярду). Однак цей метод не може забезпечити достатню точність моделювання резонаторів розміром в десятки довжин хвиль, нездатний розрахувати втрати на випромінювання і добротності мод, і повністю непридатний для опису полів в періодичних резонаторах.

Інший популярний інструмент - чисельний метод кінцевих різниць у часовій області (МКРЧО), хоча і корисний в інших областях, непридатний для прямого дослідження власних мод. Згідно з ним в резонатор поміщають пульсуюче точкове джерело, розраховують змінне поле в деякій точці і знаходять добротності мод за допомогою чисельного перетворення Фур'є. Кожна з вказаних операцій привносить чималі та неконтрольовані похибки, і тому МКРЧО має невисоку точність.

Перераховані обставини вказують на необхідність моделювання мікролазерів, в тому числі і у вигляді решіток з нанорозмірних елементів, методами теорії граничних задач для гармонійних рівнянь Максвелла з точними граничними умовами та умовами випромінювання.

Разом з тим, будь-яке дослідження власних мод *пасивних відкритих резонаторів* істотно знецінюється тим, що в такій моделі відсутня будь-яка можливість опису ще однієї фундаментальної властивості лазера - наявності порога самозбудження (порогової потужності накачування). Відомі спроби опису порогів робилися на основі квантово-механічних нелінійних моделей, хоча фізично очевидно, що «на порозі» величина електромагнітного поля мізерно мала, і тому дослідження порогів самозбудження лазерів не повинно вимагати обліку нелінійних ефектів.

Зазначений недолік був подоланий, коли в 2000-х рр. в роботах О. Й. Носича і О. І. Смотрової вперше було запропоновано вивчати лазери як *відкриті резонатори з активними зонами*, заповненими матеріалом з посиленням. Тоді можна сформулювати модифіковану лазерну задачу на власні значення (ЛЗВЗ), в якій кожне власне значення - це пара дійсних чисел: частота випромінювання і граничне значення посилення в матеріалі активної зони. За допомогою такого підходу були досліджені моди двовимірних мікролазерів у вигляді циклічних фотонних молекул з активних кругових резонаторів, а також активних одиночних резонаторів складної форми. Однак в попередніх роботах ЛЗВЗ не застосовувалася для дослідження частот і порогів мод лазерів на основі періодичних структур. Тим часом, у зв'язку з розвитком нанотехнологій і нанофотоники, в останні

10-12 років стали дуже активно вивчатися ефекти аномального (тобто резонансного) проходження оптичних, інфрачервоних і терагерцевих хвиль крізь періодично перфоровані шари і їх аномального відбиття від розріджених решіток з наночастинок. Як стало видно, такі періодичні структури є своєрідними відкритими резонаторами, в яких існує цілий клас власних мод з дуже високою добротністю - граткових мод. Первісною областю їх застосування стали резонансні сенсори показника заломлення для біохімічних застосувань. Однак на теперішній час основні зусилля дослідників змістилися до проектування і дослідження нових лазерів на основі решіток з металевих, діелектричних або квантових часток, розташованих на підкладці. Робочими модами в них є саме граткові моди, тому подібні джерела іноді називають «плазмонними» або «гібридними» лазерами «з розподіленим зворотнім зв'язком». Число періодів в таких пристроях зазвичай велике, від сотень до тисяч, а сам період порівняний з довжиною хвилі - тому їх можна моделювати як нескінченні решітки.

В силу вищесказаного, тема дослідження сучасна і актуальна.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконувалася в лабораторії мікро і нано оптики відділу квазі-оптики ІРЕ ім. А. Я. Усикова НАН України в рамках наступних робіт:

1. Держбюджетної науково-дослідної роботи ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України: «Розробка та впровадження нових методів обчислювальної радіофізики, теоретичне та експериментальне дослідження трансформації електромагнітних полів гіга- і терагерцевого діапазонів в об'єктах і середовищах антропогенного та природного походження» (шифр «Буксир-3», номер держреєстрації 0106U011975, 2007-2010).
2. Держбюджетної науково-дослідної роботи ІРЕ ім. О. 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).
3. Конкурсної цільової програми НАН України „Наноструктурні системи, наноматеріали, нанотехнології”: «Мікро та нанорозмірне електродинамічне моделювання оптичних полів у резонаторах з активними зонами з квантових шарів, дротів та точок» (шифр «Поріг», номер держреєстрації 0107U003983, 2007–2009).
4. Державної конкурсної цільової програми "Нанотехнології та наноматеріали": проект «Фундаментальні математичні та чисельні дослідження оптичних електромагнітних полів одиничних та зв'язаних мікрорезонаторних лазерів з нанорозмірними активними шарами, нитками та стрічками» (шифр «Світло», номер держреєстрації 0110U004737, 2010 -2014).
5. Конкурсної наукової теми МОН України «Інноваційне чисельне моделювання квазіоптичних фокусуючих систем» (шифр «Фокус», номер держреєстрації 0109U005351, 2009-2010).

6. Програми наукового обміну НАН України з Королівським науковим товариством, Великобританія, разом з Університетом м. Ноттінгем, проекти «Modelling of micro and nano-scale resonators and lenses for dense photonic circuits» (2006-2007) та «Advanced modelling of single and periodic active dielectric resonators for microlasers» (2007-2009).
7. Програми наукового обміну НАН України з Держкомітетом з питань науки і техніки Туреччини, разом з Університетом Бількент, Анкара, проект «Innovative electromagnetic modeling of multielement quasioptical focusing systems for sub-mm and terahertz ranges» (#106E209, 2007-2009).
8. Програми наукового обміну НАН України з АН Чеської республіки, разом з Інститутом фотоніки і електроніки АНЧР, Прага, проект «Electromagnetic and numerical modelling of active and nonlinear microcavities for semiconductor lasers and all-optical switches» (2008-2009).

Робота також була пов'язана з наступними аспірантськими стипендіями міжнародних товариств та фондів:

- «Electromagnetic analysis of natural modes in distributed-Bragg-reflector resonators containing active regions», IEEE Antennas and Propagation Society Doctoral Research Award (2007);

- «Lasing modes in a dielectric slab microresonator with a periodic active region», Вишеградський фонд, спільно з ІФП АНЧР, Прага (2009-2010);

- «Modeling of frequency-selective polarizing reflectors made of sub-wavelength wire grids for millimeter-wave and THz applications» (2011-2012) та «Modeling of biosensors based on the periodic grating of silver nanoscale cylinders embedded in a dielectric layer» (2014), Європейський науковий фонд, спільно з Університетом м Ноттінгем.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження в дисертації є вивчення власних полів (мод) трьох типів відкритих діелектричних резонаторів з активними зонами. Перші - це одновимірні шаруваті діелектричні резонатори. Другі - це нескінченні решітки з діелектричних, металевих або квантових кругових нанониток у вільному просторі. І останні - це різні комбінації перших двох типів, тобто плоскошаруваті діелектричні структури, що містять решітки з срібних або квантових ниток. Для кожної моделі вивчається задача дифракції та лазерна задача на власні значення.

У першому випадку розглядається відбиття, проходження і поглинання плоских хвиль двох поляризацій, нормально падаючих на даний резонатор. У другому випадку діелектричний резонатор (з срібними елементами або без них), розглядається як структура з активною зоною. Тоді шукаються її власні електромагнітні поля і відповідні їм частоти і пороги самозбудження. Їх дослідження дозволяє вказати шляхи до зниження порогів. Для досягнення цих цілей розглядаються наступні завдання:

- Побудова ефективної математичної моделі для розрахунку розсіяння і поглинання плоских хвиль на нескінченній решітці з кругових ниток.
- Розрахунок коефіцієнтів відбиття, проходження і поглинання плоских хвиль, пошук резонансних явищ, пов'язаних з існуванням власних мод.

- Побудова математичної моделі, яка адекватно описує власні електромагнітні поля (моди) у періодичних відкритих резонаторах з нанониток.
- Розробка чисельних алгоритмів для розрахунку власних полів, частот і порогів самозбудження мод нескінченних решіток з квантових нанониток.
- Розрахунок власних електромагнітних полів (мод) та їх частот і порогів самозбудження для періодичних відкритих резонаторів, що містять діелектричні, металеві і квантові нанонитки.

Об'єктом дослідження є явища випромінювання і розсіяння електромагнітних хвиль періодичними відкритими резонаторами у вигляді решіток з кругових діелектричних, металевих і квантових ниток, які перебувають, в загальному випадку, в плоскошаруватому діелектричному середовищі.

Предметом дослідження в дисертації є власні електромагнітні поля, спектри їх частот і пороги самозбудження, а також резонансні дифракційні поля при розсіянні хвиль зазначеними вище решітками.

Методи дослідження. В основі роботи лежить теорія граничних задач електродинаміки періодичних структур з точними граничними умовами, умовою періодичності і умовою випромінювання. Ці задачі зводяться до нескінченних матричних рівнянь Фредгольма 2-го роду. Власні значення, тобто частоти і пороги самозбудження лазерних мод, відшукуються чисельно як коріння відповідних детермінантних рівнянь. Матеріальні властивості металів в оптичному діапазоні хвиль беруться з експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів

- вперше встановлена природа так званих ґраткових мод періодичних відкритих резонаторів, що містять нескінченні решітки з тонких діелектричних або металевих ниток;
- вперше встановлено, що в нескінченній решітці з квантових нанониток ґраткові лазерні моди мають наднизькі пороги самозбудження;
- вперше показано, що можна домогтися зниження порогів самозбудження ґраткових мод, збільшуючи відстань між квантовими нитками, зменшуючи їх показник заломлення, а також розміщуючи квантові нитки між розподіленими рефлекторами Брегга;
- продемонстровано, що в оптичному діапазоні в розсіянні і поглинанні хвиль на решітці з металевих нанониток і на бінарній решітці з діелектричних і металевих нанониток, спостерігаються резонанси на плазмонних модах і на ґраткових модах;
- вперше виявлено, що в бінарній решітці з квантових і металевих нанониток пороги самозбудження ґраткових мод можуть бути нижчими за пороги плазмонних мод;
- на підставі рівнянь Максвелла вперше встановлена теорема Пойнтинга для мод періодичного відкритого резонатора з нанониток, що зв'язує поріг самозбудження моди з характеристиками поля моди;
- вперше виведені асимптотичні вирази для частот і порогів самозбудження ґраткових мод нескінченної решітки з кругових квантових нанониток, справедливі, якщо радіус чи контраст ниток прагне до нуля.

Практичне значення одержаних результатів. Запропонований в даній роботі підхід і розроблені чисельні алгоритми можна використовувати для електродинамічного аналізу та оптимізації робочих мод лазерних мікрорезонаторів з періодично структурованими активними зонами або з ґратами з металевих нанониток. Встановлені характеристики мод значно поглиблюють розуміння поведінки порогів їх самозбудження при наявності періодичності. Вони також вказують можливі шляхи зниження порогів.

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертації належать автору. У написаних у співавторстві роботах [1-7,9-11], його внесок полягає у виведенні основних рівнянь, розробці комп'ютерних алгоритмів, розрахунках модових частот і порогів, а також в інтерпретації результатів для нескінченної решітки з нанониток; в оглядовій статті [8] він складається з розрахунків, що ілюструють резонанси на ґраткових і плазмонних модах при розсіянні хвиль решітками з срібних нанониток.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися на наукових семінарах Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України (кер. проф. П.М. Мележик), Харківського університету повітряних сил (кер. проф. О.І. Сухаревський), Інституту досліджень з електромагнітної теорії ім. Дж. Гріна Університету м. Ноттінгем, Великобританія (кер. проф. Т.М. Бенсон), а також на міжнародних конференціях:

- IEEE Mediterranean Microwave Symposium, Будапешт (2007)
- Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling, Копенгаген (2007), Ейндховен (2008), Барселона (2012), Лондон (2015)
- Theoretical and Computational Nanophotonics, м. Бад Хоффен (2008)
- SPIE Photonics Prague, Прага (2008)
- Transparent Optical Networks, Рим (2007), Афіни (2008), Понта-Делгада (2009), Мюнхен (2010), Стокгольм (2011), Ковентрі (2012), Картахена (2013)
- Asia-Pacific Microwave Conference, Йокогама (2010)
- European Microwave Conference, Манчестер (2011)
- European Conference on Microwave Integrated Circuits, Амстердам (2012)
- IEEE Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Харків (2012), Дніпро (2014), Львів (2016)
- IEEE Conference on Electronics and Nanotechnology, Київ (2013, 2016)
- Microwaves, Radar and Wireless Communications, Гданськ (2014)
- IEEE Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Алушта (2008), Севастополь (2010), Судак (2013), Одеса (2016)
- IEEE Conference UKRCON, Київ (2017)

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 48 наукових роботах, в тому числі 8 статтях в журналах [1-8] і 40 роботах в збірниках праць міжнародних конференцій, 2 з яких наведено у списку основних публікацій.

Структура і обсяг дисертації. Робота складається із вступу, п'яти розділів та списку використаних літературних джерел. Її повний обсяг складає 193 сторінки. Дисертація містить 80 рисунків та 2 таблиці. Список використаних джерел на 10 сторінках нараховує 143 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 наведено загальні відомості про різні підходи та попередні результати вивчення лазерів як відкритих резонаторів з активними зонами. Далі надано огляд досліджень одновимірних плоскошаруватих діелектричних резонаторів та методів їх обчислення, а також огляд методів і публікацій щодо розсіяння плоских хвиль нескінченними решітками з кругових ниток. Наведені недоліки та обмеження, які мають дослідження пасивних відкритих резонаторів. Формулюється лазерна задача на власні значення. Приведена оптична теорема для відкритого резонатора з активною зоною, пояснюється поведінка порогу самозбудження через його зв'язок з коефіцієнтом перекриття поля моди з активною зоною.

У розділі 2 вивчаються частоти та порогові мод плоскошаруватого діелектричного резонатора, який містить шар з активного матеріалу.

Перш за все, треба відзначити, що у сучасній фотоніці плоскошаруваті напівпровідникові мікрорезонатори з вбудованими в них активними шарами (так званими «квантовими колодязями» чи шарами «квантових точок») займають важливе місце. Зокрема, до таких структур відносять широко відомі лазери поверхневого випромінювання з вертикальним резонатором (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL).

У спрощеній моделі VCSEL, можна представити як структуру, що утворюється з резонатора з активним шаром та двох розподілених рефлекторів Брегга (distributed Bragg reflector, DBR), дивись Рис. 1. Для систематизації мод випромінювання треба, перш за все, вивчити власні моди шарового резонатора, який утворює ядро усього VCSEL. У літературі такий резонатор носить назву «еталона Фабрі-Перо».

Якщо бреггівські рефлектори відсутні, а активна зона розташована точно в середині резонатора, що робить структуру симетричною (тобто $b = 0$), то ЛЗВЗ можна звести до характеристичного рівняння $e^{-i2\kappa(\alpha_c - i\gamma)(w_a/w_c)} = R_1 R_2$, де $R_{1,2}$ - коефіцієнти відбиття від нижньої та верхньої

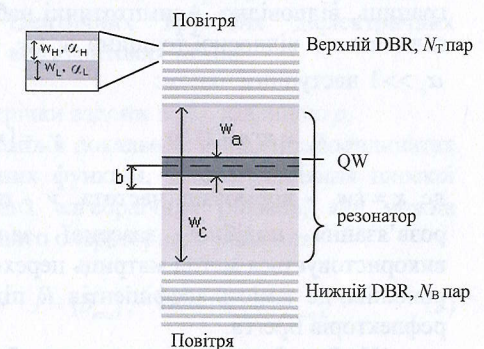


Рис. 1. Поперечний переріз плоскошаруватого діелектричного резонатора з активним шаром

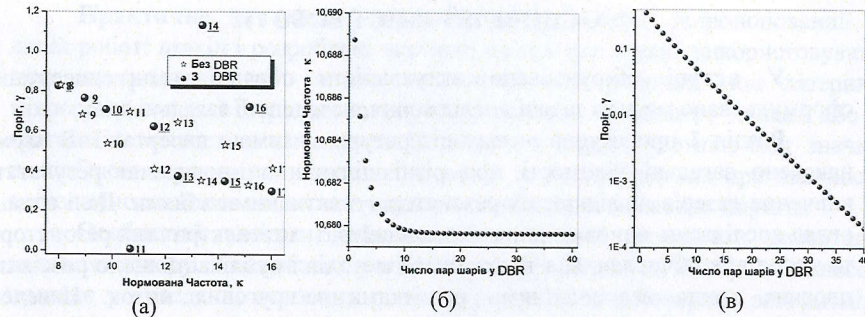


Рис. 2. Вплив брегговських рефлекторів на пороги самозбудження резонатора з GaAs з активним шаром у центрі: $w_H = 79.63$, $w_L = 69.48$. Залежності нормованої власної частоти (б) та порогу самозбудження (в) для моди E_{11} від кількості пар шарів, при $w_a = 0.1w_c$

границь, відповідно. Асимптотичні наближення для коренів цього рівняння залежать від відносної товщини w_a/w_c активної зони і показника заломлення $\alpha_c \gg 1$ наступним чином:

$$\kappa_n = \pi(n+1)/\alpha_c, \quad \gamma_n = [\kappa_n(w_a/w_c)]^{-1} \ln[(\alpha_c + 1)/(\alpha_c - 1)], \quad (1)$$

де $\kappa = \kappa w_c$ - нормована частота, γ - поріг самозбудження. Для чисельного розв'язання подібної лазерної задачі для повної моделі VCSEL використовується метод матриць переходу та модифіковане характеристичне рівняння, де замість коефіцієнтів R підставлені відомі коефіцієнти відбиття рефлекторів Брега.

На Рис. 2 показані результати обчислень лазерних власних значень для моделі з Рис. 1. Напівпровідниковий шар товщиною w_c , вироблений з GaAs, має показник заломлення $\alpha_H = 3.53$. Посередині цього шару знаходиться активний шар шириною $w_a = 1/10w_c$ з показником заломлення $\alpha = 3.53 - i\gamma$. Цей резонатор оточений двома симетричними рефлекторами Брега, що мають N пар діелектричних шарів GaAs та Ga_{0.8}Al_{0.2}, у останнього показником заломлення $\alpha_L = 3.08$, з товщинами $w_H = 79.36$, $w_L = 69.48$.

На Рис. 2 (а) на площині (κ, γ) зірками позначені лазерні власні значення для резонатора без рефлекторів Брега та крапками – з рефлекторами, що мають по 20 пар діелектричних шарів. Наявність рефлекторів майже не впливає на значення нормованої частоти випромінювання, проте поріг самозбудження зазнає значних змін, якщо частота лежить в зоні запирання рефлектора. Так, поріг моди 11 падає з 0,7 до $2 \cdot 10^{-4}$, якщо число пар кожного з двох шарів DBR зростає з 1 до 20. Показано, що знайдені власні значення задовольняють теоремі Пойнтинга з машинною точністю.

У розділі 3 вивчаються властивості решітки з діелектричних або квантових нанониток у вільному просторі. Спочатку досліджується задача розсіяння плоскої хвилі, що падає нормально на таку решітку (Рис. 3), припускаючи, що матеріал ниток є діелектрик без втрат з показником заломлення α , а потім - лазерна задача на власні значення, де $\nu = \alpha - i\gamma$. В такому випадку дві поляризації, E і H , можуть бути розглянуті роздільно за допомогою відшукування скалярної функції $U(x, y)$, яка є або E_z , або $Z_0 H_z$ компонентою електромагнітного поля, відповідно. Ця функція повинна задовольняти рівнянню Гельмгольца з різними коефіцієнтами: $k^2 \alpha^2$ або $k^2 \nu^2$ всередині циліндру, та k^2 ззовні її. Періодичність поля у присутності ґратки $U(x + p, y) = U(x, y)$ дає нам можливість звести кожен з задач до розглядання елементарної стрічки вздовж вісі y шириною p .

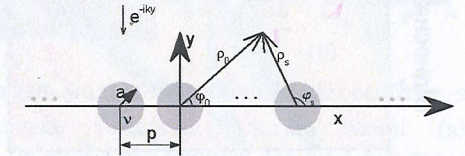


Рис. 3. Поперечний переріз нескінченної періодичної решітки з ідентичних кругових діелектричних або квантових ниток

За допомогою розділення змінних в локальних полярних координатах та теореми додання для циліндричних функцій, задача розсіяння плоскої хвилі зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь, яку можна компактно записати у вигляді наступного операторного рівняння:

$$[I + A(\kappa; \xi, \alpha)]X = Y, \quad I = \{\delta_{mn}\}, \quad A = \{A_{mn}\}_{m,n=-\infty}^{\infty}, \quad (2)$$

де $\kappa = \kappa a$ - нормована частота, $\xi = p/a$ - нормована відстань між нитками, $Y = \{y_m\}_{m=-\infty}^{+\infty}$ - відомий вектор збудження, та $X = \{x_m\}_{m=-\infty}^{+\infty}$ - вектор невідомих.

Матриця A_{mn} задовольняє умові Фредгольма другого роду. Тому чисельно отримане рішення з ростом параметру усікання N сходиться по нормі в l_2 . Гармоніки Флоке, що дозволяють побудувати поле у дальній зоні, отримуються з знайдених коефіцієнтів $\{x_n\}$ завдяки перетворенню Пуассона.

Треба зазначити, що значення нормованої частоти $\sigma = p/\lambda = 1, 2, 3, \dots$ відповідають точкам розгалуження поля як функції довжини хвилі λ ; ці точки прийнято називати аномаліями Релея.

На рельєфах модуля коефіцієнтів відбиття плоских хвиль від ґратки з нанониток, як функції нормованої частоти σ та нормованої відстані між нитками ξ при $\alpha = 1.4142$ (Рис. 4 (а)), можна побачити максимуми відбиття (яскраві "хребти"). Вони пов'язані з резонансами на власних модах різних типів, що існують у даному періодичному резонаторі. Ці резонанси зміщуються по частоті, якщо параметри ξ або α змінюються. Як відомо,

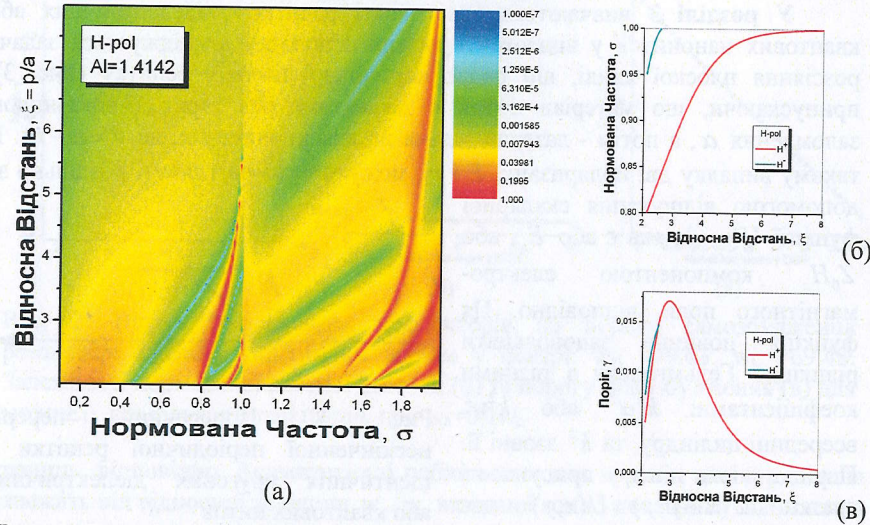


Рис. 4. Рельєфи модуля коефіцієнтів відбиття плоских хвиль від решітки з нанониток як функції нормованої частоти σ та відносної відстані між циліндрами ξ при $\alpha=1,4142$ для Н-поляризацій, (а). Залежності частот (б) та порогів самозбудження (в) ґраткових мод

$$\det[I + A(\kappa, \gamma; \xi, \alpha)] = 0, \quad A = \{A_{mn}\}_{m,n=-\infty}^{+\infty}. \quad (3)$$

Ці корені можна класифікувати за належністю до двох класів. Перший - це власні значення внутрішньої області кожної з нанониток, що близькі до нулів однієї з характеристичних функцій кругового діелектричного циліндра,

$$F_m^{E,H} = \alpha^\pm H_m(ka) J'_m(\alpha ka) - H'_m(ka) J_m(\alpha ka), \quad (4)$$

де $m=0,1,2,\dots$, але трохи змішених завдяки зв'язку з іншими нитками ґратки. Відповідні до них максимуми відбиття при збільшенні ξ перерізають вертикальні лінії, що відзначають аномалії Релея на Рис. 5 (а) і (б), як похилі широкі "хребти", оскільки для них $\kappa = ka \approx \text{const}$, тобто $\sigma_{m,n}^H \approx \text{const} \cdot \xi$. Будемо називати їх модами нанониток типу $H_{m,n}$.

Другий клас - це власні значення, для яких максимуми на Рис. 4 (а) не перерізають вказаних вертикальних прямих, а прямують до них при збільшенні відстані між нитками, ξ . Це означає, що відповідні їм полюси

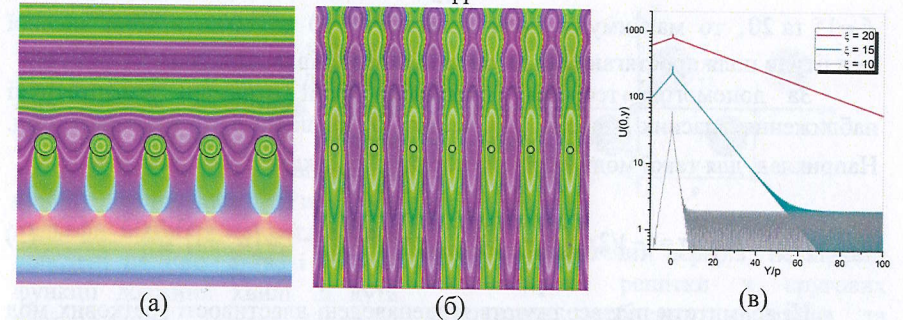


Рис. 5. Поле в резонансі на ґратковій моді GH_1^+ поблизу від решітки з нанониток ($\alpha=2,46$) для нормально падаючої плоскої хвилі (а) $\xi=5$, $\sigma=0,776658$, п'ять періодів та (б) $\xi=10$, $\sigma=0,9967$, сім періодів. Зрізи резонансного поля для різних значень ξ (в)

резольвенти прямують до точок галуження як $\sigma_{m,n}^{GH} \approx m - \text{const} \cdot \xi^{-q}$ ($q \geq 2$) при $\xi \rightarrow \infty$. Відповідні їм моди - це ґраткові моди $GH_{m,n}$.

Далі ми розглядаємо лазерну задачу, у якій немає падаючого поля, а показник заломлення вважається комплексним, $\nu = \alpha - i\gamma$ (з відомим α), та поріг підсилення γ шукається як власне значення разом із реальною власною частотою σ . На Рис. 4 (б, в) побудовані залежності частот та порогів самозбудження для двох нижчих ґраткових мод різної симетрії відносно лінії $y=0$, GH_1^+ та GH_1^- (б) від нормованої відстані між квантовими нанонитками, ξ . Можна побачити, що при збільшенні ξ частоти прямують до значення $\sigma=1$.

Власні частоти цих ґраткових мод при $\xi \rightarrow \infty$ прямують до аномалії Релея, $\sigma=1$. Найважливішим є те, що порogi самозбудження ґраткових мод при цьому знижуються до нуля. Така поведінка відрізняється від поведінки порогів самозбудження мод нанониток - вони залишаються скінченними та чималими, якщо нитки мають малий за довжину хвилі діаметр.

На Рис. 5 представлено поле поблизу решітки в резонансі на одній з ґраткових мод для плоскої хвилі, що нормально падає на решітку з нанониток з показником заломлення $\alpha=2,46$ для різних значень ξ . При $\xi=5$ (Рис. 5 (а)), максимуми поля знаходяться в нанонитках, а їх значення в декілька разів вище амплітуди хвилі, що падає. Рис. 5 (б) демонструє резонансне розсіяння на цій же моді для $\xi=10$, де поле має максимуми точно у нанонитках та у середині між ними, що є характерною формою для ґраткової моди. Дальність зони (у періодах решітки), де поле у резонансі має високу інтенсивність, продемонстровано на Рис. 5 (в). Тут представлено зрізи поля вздовж $x=0$ для трьох значень $\xi=10,15,20$ на частотах, що відповідають максимумам коефіцієнту відбиття. У першому випадку максимуми поля приблизно в 60 разів більші за амплітуду поля, що падає, а зона високої інтенсивності поля простягається на відстань 8 періодів. Якщо

$\xi = 15$ та 20 , то максимуми поля досягають 300 та 1000 , а зони високої амплітуди поля простягаються на 60 та 200 періодів, відповідно.

За допомогою теореми Гершгоріна були отримані асимптотичні наближення власних значень для частот σ та порогів γ ґраткових мод. Наприклад, для такої моди першого порядку H_1^+ , якщо $\xi \rightarrow \infty$ або $\alpha \rightarrow 1$, то

$$\sigma = 1 - 1/2\pi^8 (\alpha^2 - 1)^2 \xi^{-8}, \quad \gamma = 1/8\pi^4 (\pi - 1)\alpha (\alpha^2 - 1)^2 \xi^{-4}. \quad (5)$$

Ці асимптоти підтверджують вищенаведені властивості ґраткових мод та виявляють як саме відповідні власні значення прямують до аномалії Релея.

У розділі 4 вивчаються ефекти, що виникають у оптичних решітках за умови наявності нанониток з благородних металів. Спочатку вивчаються ефекти дифракції світла на решітці з срібних нанониток, потім на бінарній решітці, яка містить діелектричні та срібні нанонитки. Після цього досліджуються лазерні власні значення, пов'язані з плазмонними та ґратковими модами, що зумовлені періодичною природою структури, для бінарної решітки з квантових та срібних нанониток.

На Рис. 6 зображені залежності модулів коефіцієнтів відбиття та поглинання плоскої H -поляризованої хвилі, що падає нормально на решітку з срібних нанониток радіусом $a = 80, 90, \dots, 140, 150$ нм з періодом $p = 450$ нм. Можна побачити гострий резонанс поблизу $\lambda \approx 450$ нм, що відповідає періоду – це резонанс на ґратковій моді. Інший резонанс знаходиться на довжині хвилі $\lambda \approx 348$ нм, яка відповідає значенню діелектричної функції срібла, що задовольняє рівнянню (4) для $ka \ll 1$, $m \geq 1$, тобто $\varepsilon(\lambda) = -1$. Це плазмонний резонанс. Цікавість до нього викликана тим фактом, що його довжина хвилі майже не залежить від радіусу нанониток, якщо $a \ll \lambda$.

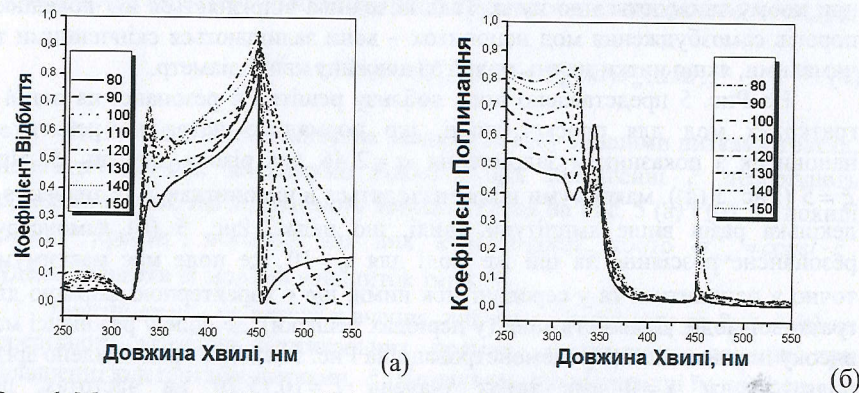


Рис. 6. Модуль коефіцієнту відбиття та коефіцієнт поглинання плоскої хвилі, що падає нормально на решітку з срібних нанониток з періодом 450 нм та перемінним радіусом від 80 нм до 150 нм

Зазначимо, що аналіз плазмонних ефектів у лазерній задачі з активною зоною до цього часу не був проведений. У цій роботі вивчається бінарна решітка, яка містить квантові та срібні нанонитки (Рис. 7). Рельєфи відбиття та поглинання наведені на Рис. 8 (а) і (б), як функції довжини хвилі та кута розташування ниток бінарної решітки, для ниток рівних радіусів $a_1 = a_2 = 50$ нм, що знаходяться на відстані 100 нм від локального центру під кутами повороту $\phi_1 = \phi$ та $\phi_2 = \pi + \phi$.

Можна побачити, що смуга довжин хвилі між плазмонним та ґратковим

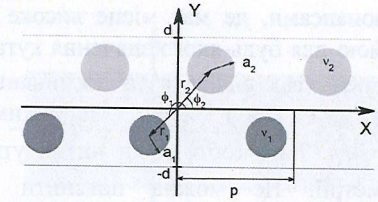


Рис. 7. Поперечний переріз нескінченної бінарної решітки з кругових нанониток, зроблених з срібла та діелектрика з різними показниками заломлення

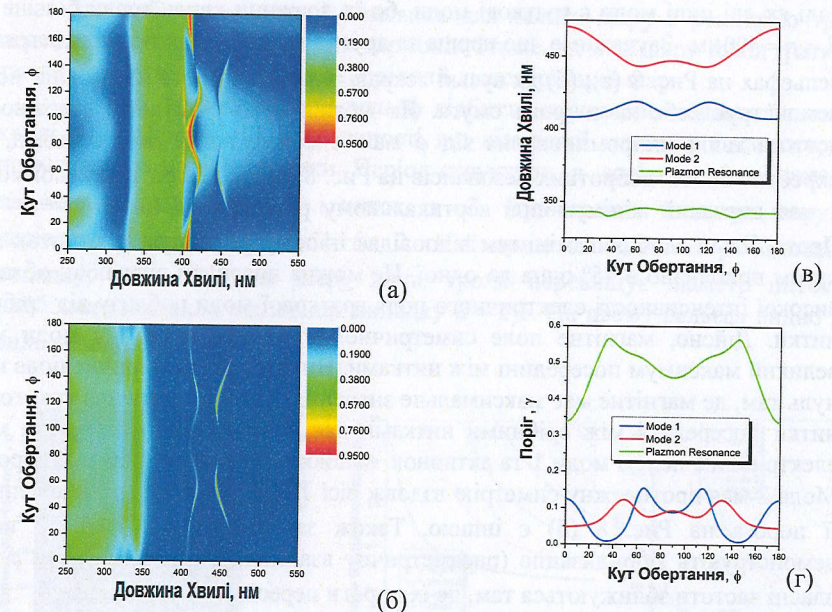


Рис. 8. Рельєфи модулів коефіцієнтів відбиття (а) та поглинання (б) як функції кута розташування діелектричної навколо срібної нитки та довжини хвилі, для плоскої H -поляризованої хвилі, що падає нормально на бінарну решітку з періодом $p = 400$ нм із срібних та діелектричних ниток радіуса $a_1 = a_2 = 50$ нм з $\alpha = 2,48$ і центрами ниток у $r_1 = r_2 = 100$ нм, $\phi_1 = \phi$, $\phi_2 = \pi + \phi$. Довжини хвилі (в) та порогові самозбудження (г) власних мод в залежності від кута повороту у бінарній решітці

резонансами, де має місце високе відбиття, зостається приблизно тією ж самою для будь-якого значення кута ϕ . Граткові резонанси визначають себе на рельєфах відбиття та поглинання як два «хребти» трохи праворуч від довжини хвилі $\lambda = p$. Зауважимо, що ці «хребти» зникають біля $\phi = 0, \pi/2, \pi$, тобто коли нитки утворюють конфігурацію з двома лініями симетрії. Це можна пояснити тим, що власні поля цих мод є антисиметричними відносно вісі Y , тобто вони не можуть бути збуджені нормально падаючою плоскою хвилею.

Для того щоб зробити порівняння плазмонної моди з гратковою, ми обчислюємо зміни лазерних власних значень при повороті пари ниток навколо центру інтервалу між ними на елементарному періоді. Рис. 8 (в) та (г) показують залежності власних значень для трьох різних мод від кута повороту, де геометрія бінарної решітки є такою ж, як у задачі розсіяння плоскої хвилі, характеристики якої продемонстровані на Рис. 8 (а) та (б).

Як і раніше, резонансна довжина хвилі дозволяє нам легко ідентифікувати відповідні моди: плазмонна мода зостається біля $\lambda \approx 340$ нм, тоді як дві інші моди є граткові моди, бо їх довжини хвиль трохи більше за $\lambda = p = 400$ нм. Зауважимо, що перша та друга граткові моди проявляються на рельєфах на Рис. 8 (а), (б) як вузькі яскраві «хребти», проте плазмонна мода демонструє себе як широка смуга. Як можна було очікувати, залежності довжин хвиль випромінювання від ϕ мають майже такий самий вигляд, як «хребти» високодобротних резонансів на Рис. 8 (а), (б). Поріг граткової моди 1 має виразний мінімум при вертикальному розташуванні ниток ($\phi = \pi/2$). Проте більш глибокий мінімум відповідає іншому розташуванню ниток під кутом приблизно в 45° одна до одної. Це можна пояснити вивчаючи області високої інтенсивності електричного поля граткової моди поблизу від срібної нитки. Дійсно, магнітне поле симетричної по вісі X граткової моди має великий максимум посередині між нитками. Відомо, що електричне поле має нуль там, де магнітне має максимальне значення. Тому розміщення квантової нитки посередині між срібними нитками дає неефективне перекриття між електричним полем моди 1 та активною зоною, що веде до високого порогу. Мода 2 має протилежну симетрію вздовж вісі Y при $\phi = \pi/2$, тому поведінка її порога на Рис. 8 (б) є іншою. Також зауважимо, що моди 1 та 2 демонструють гібридизацію (параметричну взаємодію) при зміні кута ϕ : їх власні частоти зближуються там, де їх пороги пересікають один одного.

Найважливішим результатом нашого дослідження мод бінарної решітки ми вважаємо те, що, як знайдено, поріг граткової моди може бути в 3-60 разів нижчим за поріг плазмонної моди, принаймні, якщо усі срібні та квантові нанонитки мають радіус 50 нм.

У розділі 5 вивчаються властивості решіток з діелектричних і срібних нанониток в шаруватих діелектричних структурах. Це викликано тим, що реалізація решітки найчастіше потребує занурення її у так звану «матрицю» - діелектричний шар відмінного показника заломлення.

Одна з таких періодичних структур показана на Рис. 9 - це діелектричний шар з показником заломлення α_s товщини d . Всередині цього шару знаходиться решітка з діелектричних ниток на відстанях d_1 і $d_2 = d - 2a$ від нижньої і верхньої межі, відповідно. Період решітки дорівнює p , радіус кожної нитки дорівнює a , а її показник заломлення α або $v = \alpha - i\gamma$ у лазерній задачі.

Для побудови матриці розсіяння для такого шару з решіткою треба перемножити матриці розсіяння гармонік Флоке від меж шару та від гратки, а також проходження їх через однорідний діелектричний шар.

На Рис. 10 зображений рельєф відбиття нормально падаючої плоскої хвилі в H -поляризації в залежності від відносної товщини і частоти, що нормована на період решітки. Період структури p дорівнює $4a$. Показник заломлення шару $\alpha_s = 1,6$ і ниток $\alpha = 2$. Відношення товщини шару до періоду варіюється від 0,51 до 2. Найменше значення d/p відповідає випадку, коли товщина шару лише трохи перевищує діаметр ниток, а найбільше значення відповідає випадку $d = 2p$. На цьому рельєфі видно два види резонансів.

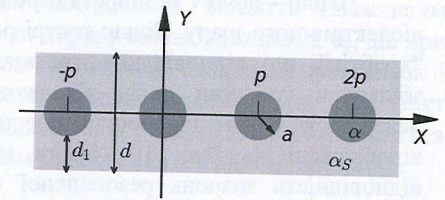


Рис. 9. Поперечний переріз нескінченної гратки з кругових нанониток у діелектричному шарі

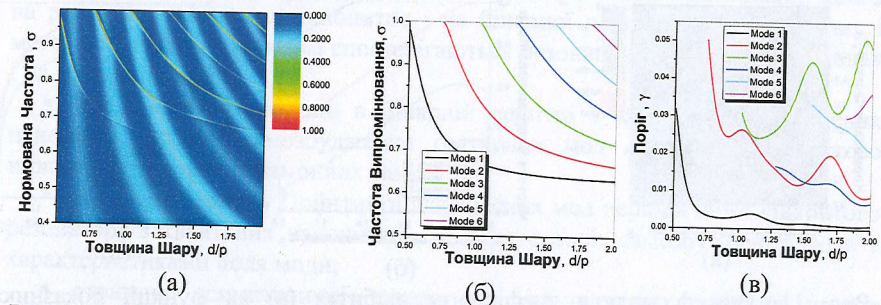


Рис. 10. Рельєф модуля коефіцієнту відбиття (а) як функції товщини шару з коефіцієнтом заломлення $\alpha_s = 1,6$ та довжини хвилі для плоскої, що падає нормально на гратку з періодом $p = 4a$ із діелектричних ниток з $\alpha = 2$. Власні частоти (б) та пороги (в) відповідної геометрії, H -поляризація

Перші - пологі та широкі горби, що відповідають резонансам на модах діелектричного шару. Більш гострі резонанси - це шість яскраво виражених "хребтів", що відповідають ґратковим модам. Варто зазначити, що при збільшенні товщини шару з'являються ґраткові моди вищого порядку. Залежності частот та порогів лазерних мод від нормованої товщини шару відображені на Рис. 10 (б) та (в). На їх прикладі можна побачити відповідність значень резонансної частоти у задачі дифракції та частот самозбудження у лазерній задачі. Натомість поведінка порогів випромінювання показує, що їх значення залежать від коефіцієнту перекриття квантових нанониток з електричним полем робочої моди.

Розглянемо залежність лазерних власних значень для ґраткових мод від показника заломлення шару. Нехай показник заломлення нанониток решітки дорівнює $\alpha = 2$, решітка розташована посередині шару, $d_1 = d_2 = d - 2a$, ширина шару дорівнює періоду, $d = p$, а показник заломлення шару варіюється в межах від 1 до 2. Тим самим моделюється трансформація структури від випадку решітки у вільному просторі до випадку однорідного діелектричного шару з показником заломлення $\alpha_s = \alpha = 2$. У всіх проміжних значеннях ми маємо діелектричний шар з вбудованою решіткою з нанониток, чий показник заломлення вище навколишнього матеріалу. На Рис. 11 (а) зображений рельєф коефіцієнта відбиття плоскої хвилі від такої структури в H -поляризації. Як було сказано вище, права межа відповідає випадку однорідного шару, де переріз рельєфу показує синусоїдальну поведінку, яка не залежить від поляризації. Пологі хребти, що починаються тут, відповідають резонансам на модах шару. На противагу їм, зліва йдуть гострі хребти ґраткових резонансів. Чим менше контраст між показниками заломлення шару і ниток решітки, тим вужчими ці резонанси стають.

Відповідні залежності лазерних власних значень для ґраткових мод решітки з квантових ниток, що занурена в шар діелектрика, представлені на Рис. 11 (б) і (в). На графіках власної частоти видно повний її збіг з

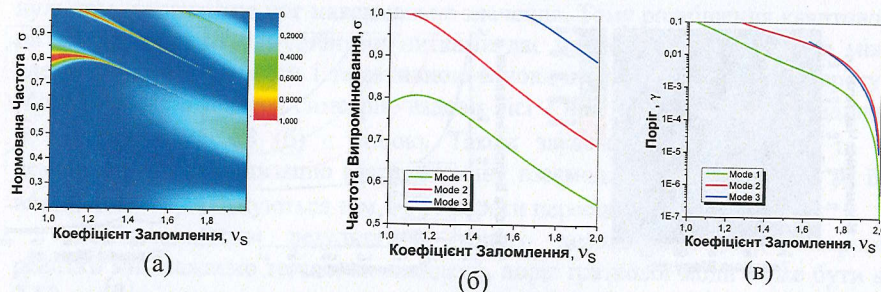


Рис. 11. Рельєф модуля коефіцієнту відбиття (а) як функції показника заломлення шару α_s та довжини плоскої хвилі, що падає нормально на ґратку з періодом $p = 4a$ із діелектричних ниток $\alpha = 2$. Власні частоти (б) та порогови (в) мод для решітки з квантових ниток у діелектричному шарі. H -поляризація

резонансною частотою на рельєфах коефіцієнта відбиття. Важливим результатом, який демонструють графіки порогу самозбудження, є те, що при зменшенні контрасту між показниками заломлення квантових нанониток і шару, в якому вони знаходяться, поріг швидко зменшується. Цей факт узгоджується з результатами, представленими в Розділі 3, де розглядається решітка з нанониток з малим показником заломлення у вільному просторі.

Висновки

У дисертаційній роботі досліджені актуальні задачі радіофізики, що полягають в розробці лінійної електродинамічної моделі, здатної описати частоти і порогови самозбудження власних електромагнітних полів в періодичних відкритих резонаторах з діелектричних та металевих нанониток з активними зонами у вигляді квантових нанониток. В рамках цієї моделі вивчена модифікована (лазерна) задача на власні значення для кількох важливих типів двовимірних періодичних резонаторів. Серед них - нескінченна решітка, що складається з квантових нанониток у вільному просторі або в плоскошаруватому середовищі, а також бінарна решітка, що складається з срібних та квантових нанониток. В якості допоміжних задач досліджувалися задачі розсіювання і поглинання плоских хвиль двох поляризацій на зазначених нескінченних ґратах.

Основні наукові та практичні результати полягають в наступному:

- отримані електромагнітні характеристики так званих ґраткових мод періодичних відкритих резонаторів з нанониток, частоти яких близькі до частот так званих аномалій Релея;
- встановлено, що в нескінченній решітці з тонких квантових нанониток ґраткові моди можуть мати як завгодно низькі порогови самозбудження; ці порогови можна понизити збільшуючи відстань між нитками, знижуючи їх показник заломлення, а також розміщуючи їх між рефлекторами Брегга;
- встановлено, що в світловому діапазоні в розсіянні і поглинанні хвиль на решітці з металевих нанониток і на бінарній решітці з діелектричних і металевих нанониток разом спостерігаються резонанси на плазмонних модах і на ґраткових модах;
- продемонстровано, що в бінарній решітці з квантових і металевих нанониток порогови самозбудження ґраткових мод можуть бути суттєво нижчими за порогови плазмонних мод;
- виведено теорему Пойнтинга для власних мод періодичного відкритого резонатора з квантових нанониток, що зв'язує поріг самозбудження моди з характеристиками поля моди;
- отримані асимптотичні вирази для комплексних власних частот ґраткових мод решітки з кругових діелектричних нанониток і порогів самозбудження для таких мод в решітці з кругових квантових ниток малого радіусу або малого оптичного контрасту з навколишнім середовищем.

1. V. O. Byelobrov, A. I. Nosich, "Mathematical analysis of the lasing eigenvalue problem for the optical modes in a layered dielectric cavity with a quantum well and distributed Bragg reflectors," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 39, no 10-11, pp. 927-937, 2007.
2. V. O. Byelobrov, J. Ctyroky, T. M. Benson, A. Altintas, R. Sauleau, A. I. Nosich, "Low-threshold lasing modes of an infinite periodic chain of quantum wires," *Optics Letters*, vol. 35, no 21, pp. 3634-3636, 2010.
3. E. I. Smotrova, V. O. Byelobrov, T. M. Benson, J. Ctyroky, R. Sauleau, A. I. Nosich, "Optical theorem helps understand thresholds of lasing in microcavities with active regions," *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. 47, no 1, pp. 20-30, 2011.
4. 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*, vol. 19, no 22, pp. 22176-22190, 2011.
5. V. O. Byelobrov, T. M. Benson, A. I. Nosich, "Binary grating of sub-wavelength silver and quantum wires as a photonic-plasmonic lasing platform with nanoscale elements," *IEEE J. Selected Topics Quantum Electronics*, vol. 18, no 6, pp. 1839-1846, 2012.
6. V. O. Byelobrov, T. M. Benson, "Extraordinary high-Q resonances in the scattering by a dielectric slab containing a grating of circular cylinders," *International Journal Semiconductor Physics, Quantum Electronics, and Optoelectronics*, ISP NASU Press, Kiev, vol. 17, no 1, pp. 100-105, 2014.
7. V. O. Byelobrov, T. L. Zinenko, K. Kobayashi, A. I. Nosich, "Periodicity matters: grating or lattice resonances in the scattering by sparse arrays of sub-wavelength strips and wires," *IEEE Antennas Propagation Magazine*, vol. 57, no 6, pp. 34-45, 2015.
8. T.L. Zinenko, V.O. Byelobrov, M. Marciniak, J. Ctyroky, A.I. Nosich, "Grating resonances on periodic arrays of sub-wavelength wires and strips: from discoveries to photonic device applications," in O. Shulika, I. Sukhoivanov (Eds.) *Contemporary Optoelectronics: Materials, Metamaterials and Device Applications*, Springer Ser. Optical Sciences, vol. 199, pp. 65-79, 2016.
9. V. O. Byelobrov, T. M. Benson, A. I. Nosich, "Near and far fields of high-quality resonances of an infinite grating of sub-wavelength wires," *Proc. European Conf. Microwaves (EuMC-2011)*, Manchester, 2011, pp. 858-861.
10. V.O. Byelobrov, T.M. Benson, A.I. Nosich, "Plasmon resonances of an infinite grating of silver wires coated with dielectric envelopes," *Proc. Int. Conf. Transparent Optical Networks (ICTON-2012)*, Coventry, 2012, Tu.A5.6.
11. V. O. Byelobrov, T. M. Benson, A. I. Nosich, "Modeling of extraordinary high-Q resonances in the scattering by periodically structured dielectric slab," *Proc. European Conf. Microwave Integrated Circuits*, Amsterdam, 2012, pp.550-553.

Белобров В.О. Электромагнитні поля та пороги самозбудження періодичних резонаторів з кругових діелектричних, металевих та квантових нанониток у шаруватому середовищі. – 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, 2017.

Дана робота присвячена аналізу власних електромагнітних полів (мод) та їх частот і порогів самозбудження для періодичних відкритих резонаторів, що містять діелектричні, металеві і квантові нанонитки і знаходяться, в загальному випадку, в шаруватому діелектричному середовищі. Під квантовими нитками, згідно з прийнятою в нанотехнологіях термінологією, маються на увазі нанонитки з матеріалу, що має посилення. Такі матеріали здатні посилювати спонтанну емісію світла при накачуванні, за рахунок створення інверсної населеності квантових станів. Посилення у активній зоні моделюється через коефіцієнт заломлення, який має негативну уявну частку - цей параметр називаємо порогом самозбудження. Разом з порогом, як власне значення, шукається частота випромінювання; пара цих величин утворює власне значення. Остання пов'язана з резонансною частотою з задачі дифракції, яка вивчається як допоміжна. Аналіз проводиться за допомогою граничних задач для гармонічних лінійних рівнянь Максвелла, які зводяться до матричних рівнянь Фредгольма другого роду, що гарантує точність отриманих результатів. Ретельно вивчені частоти, пороги та власні поля так званих ґраткових мод, що спостерігаються поблизу так званих аномалій Релея, а також плазмонних мод при наявності срібних нанониток.

Ключові слова: активна зона, кругові нанонитки, періодичний резонатор, плазмонні та ґраткові моди, поріг самозбудження, частота випромінювання.

АННОТАЦИЯ

Белобров В.А. Электромагнитные поля и пороги самовозбуждения периодических резонаторов из круговых диэлектрических, металлических и квантовых нанонитей в слоистой среде. – 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, 2017.

Данная работа посвящена анализу собственных электромагнитных полей (мод) и их частот и порогов самовозбуждения для периодических открытых резонаторов, содержащих диэлектрические, металлические и квантовые нанониты и находящиеся, в общем случае, в слоистой диэлектрической среде. Под квантовыми нитями, согласно с принятой в нанотехнологиях терминологией, понимаются нанониты из материала, имеющего усиление. Такие материалы способны усиливать спонтанную эмиссию света при накачке, за счет создания инверсной населенности

квантовых состояний. Усиление в активной зоне моделируется через коэффициент преломления, который имеет отрицательную мнимую часть - этот параметр называем порогом самовозбуждения. Вместе с порогом ищется частота излучения; пара этих величин составляет собственное значение. Последняя связана с резонансной частотой с задачи дифракции, которая изучается как вспомогательная. Анализ проводится с помощью граничных задач для гармонических линейных уравнений Максвелла, которые сводятся к матричным уравнениям Фредгольма второго рода, что гарантирует точность полученных результатов. Систематически изучены частоты, пороги и собственные поля так называемых решеточных мод, наблюдающихся вблизи так называемых аномалий Рэлея, а также плазмонных мод при наличии серебряных нанониток.

Ключевые слова: активная зона, круговые нанониты, периодический резонатор, плазмонные и решеточные моды, порог самовозбуждения, частота излучения.

SUMMARY

Byelobrov V.O. Electromagnetic fields and lasing thresholds of periodic resonators with dielectric, metallic and quantum nanowires in layered medium. – Manuscript of qualifying scientific work.

The thesis is aimed at earning the candidate degree in the major 01.04.03 "radiophysics" – O. Y. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine, Kharkiv, 2017.

This work is dedicated to the analysis of natural electromagnetic fields (modes) and their frequencies and self-excitation thresholds for periodic open resonators containing dielectric, metallic and quantum nanowires, placed, in general, into a layered dielectric environment. By quantum wires, using the nanoscience terminology, we refer to nanowires of a material that possesses gain. Such materials can enhance the spontaneous emission of light when pumped, by creating a population inversion of quantum states. The gain in the active region is characterized with the aid of the negative imaginary part of the refractive index, which is called the material threshold of lasing. It is sought together with the real valued frequency of emission; the pair of these quantities for each mode makes a lasing-problem eigenvalue. The mode frequency is related to the resonance frequency in the scattering problem for similar passive geometry that is analyzed as auxiliary problem. The analysis is performed using the boundary value problems for linear time-harmonic Maxwell's equations, which are reduced to the matrix equations of the Fredholm second kind that mathematically guarantees convergence and controlled accuracy of numerical results. Frequencies, thresholds and field patterns of the so-called grating modes, observed near to the Rayleigh anomalies, and the plasmon modes, in the presence of silver nanowires, are analyzed thoroughly.

Key words: active region, circular nanowires, periodic resonator, plasmonic and lattice modes, lasing threshold, frequency of emission.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. 392-17.
Підписано до друку 14.09.17. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ-ИЗДАТ[®]
ТИПОГРАФИЯ
www.stil-izdat.com