

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**Сахненко Наталія Костянтинівна**

УДК 537.87

**НЕСТАЦІОНАРНІ ПРОЦЕСИ У ВІДКРИТИХ РЕЗОНАНСНИХ ТА  
ХВИЛЕВІДНИХ СТРУКТУРАХ**

01.04.03 – радіофізика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий консультант:** доктор фізико-математичних наук, професор **Нерух Олександр Георгійович**, Харківський національний університет радіоелектроніки МОН України, завідувач кафедри вищої математики.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор **Буц Вячеслав Олександрович**, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, керівник лабораторії;

доктор фізико-математичних наук, професор **Гандель Юрій Володимирович**, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна МОН України, професор кафедри математичної фізики та обчислювальної математики;

доктор фізико-математичних наук, професор **Тарапов Сергій Іванович**, Інститут радіофізики і електроніки ім. О.Я.Усікова НАН України, завідувач відділу радіоспектроскопії.

Захист відбудеться «23» травня 2013 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, Україна, м. Харків, пр. Леніна 14, зал засідань.

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

Автореферат розісланий «22» квітня 2013 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останні декілька років не згасає інтерес до мікро- і нано-розмірних резонаторів, що мають численні застосування при розробці мініатюрних вузькосмугових оптичних фільтрів, пристроїв повністю оптичного перемикачання, біосенсорів та лазерів з надзвичайно низьким порогом генерації. Подібні пристрої також активно досліджуються в терагерцевому діапазоні частот.

Використання оптично зв'язаних кластерів таких резонаторів (фотонні молекули, оптичні хвилеводи зі зв'язаних резонаторів) створює додаткові можливості зниження групової швидкості імпульсів, що важливо для таких застосувань як лінії затримки світла та пристрої зберігання інформації. Підвищення добротності резонансів веде до зниження порогу лазерної генерації в структурі з активними зонами; а також підвищує чутливість подібних резонансів до змін зовнішнього середовища, що необхідно для біосенсорних застосувань.

Нанорозмірні частинки і проводи з благородних металів також є предметом зростаючого інтересу у зв'язку з можливостями сильної локалізації світла за дифракційною межею за рахунок збудження поверхневих плазмонів. Вивчення плазмонних резонансів ініціювалося можливостями їх потенційного використання в розпізнаванні одиночних молекул, дослідженні біомолекулярних взаємодій, діагностики раку на ранніх стадіях, передачі світла через субхвильові отвори та ін. Якщо наночастинки перебувають у безпосередній близькості один від одного, утворюючи кластер впорядкованої структури, то, оптимізуючи його параметри, можна домогтися поліпшення спрямованості випромінювання (наноантенні застосування), і збільшення добротності (нанолазерні застосування).

Поряд з пасивними фотонними та плазмонними структурами, великий інтерес викликають і активні, тобто динамічні, системи: надшвидкі фотонні та плазмонні перемикачі, де основним параметром є високий контраст між станами «вкл» (on) та «викл» (off), динамічно контрольовані мікро- і наноантени, а також мікро- і нанолазери.

Незважаючи на те що, нестационарні процеси в мікро- і нано-розмірних структурах відіграють величезну роль, переважна більшість теоретичних публікацій сконцентрована на виявленні спектральних характеристик явищ, де розглядаються поля з гармонійною залежністю від часу. Однак для таких застосувань, як оптична пам'ять, повністю оптичне перемикачання, вихід на режим стабільної генерації, достовірне моделювання у часовій області є особливо важливим. Динамічні структури з контрольованими в часі властивостями надають більше ступенів свободи для моделювання нових і вдосконалення існуючих пристроїв. Більш того, динамічні структури з залежними від часу параметрами мають властивості, які не можуть бути реалізовані в стаціонарних структурах. Це зупинка і обернення в часі світлових імпульсів, обернений доплеровський ефект і зміна кольору світлових імпульсів.

Нестационарні процеси можуть також бути ініційовані імпульсним збудженням структури, що представляє особливий інтерес для передачі великих обсягів інформації в різноманітних широкосмугових пристроях. Крім того, останнім часом велика увага приділяється структурам з нових матеріалів із спеціальними частотно-залежними електромагнітними властивостями в діапазоні від'ємних значень діелектричної та магнітної проникності.

Як правило, чисельне моделювання у часовій області здійснюють за допомогою методу кінцевих різниць у часовій області (finite difference time domain method, FDTD), який є універсальним, але часто вимагає великих обчислювальних ресурсів. Крім того, у FDTD є проблеми з дослідженням високодобротних резонансів. Метод демонструє прийнятну точність, якщо застосовується далеко від них, але поблизу резонансних частот похибка може виявитися критичною. До слабких місць FDTD відноситься також дослідження саме відкритих структур і криволінійних границь. Крім того, результати, отримані прямим чисельним методом, не дають можливості швидко інтерпретувати результати.

Бурхливий розвиток технологічних можливостей виготовлення нано- та мікро-розмірних структур дозволяє досліджувати експериментально процеси на фемто- й атто-секундних часових інтервалах. Електромагнітні явища в таких структурах складні і недостатньо вивчені. Теоретичні ж дослідження, здатні пояснити експериментальні дані або запропонувати нові перспективні застосування нестационарних процесів, обмежуються прямими чисельними методами з усіма притаманними їм часто нездоланими труднощами: великі вимоги до комп'ютерних ресурсів, складність якісного аналізу явища, неможливість описати і дослідити його в цілому.

Таким чином, на даному етапі склалося *протиріччя*, яке, з одного боку, характеризується величезним проривом в технологічних можливостях управління параметрами матеріалів, а з іншого, відсутністю або недостатністю адекватних теоретичних описань нестационарних електромагнітних полів у відкритих структурах, матеріали яких змінюються за часом. Існує явна нестача теоретичного аналізу явищ, заснованого на строгих розв'язках задач, з точними і аналітично сформульованими початковими і граничними умовами, і всебічним аналізом полів, як у частотній, так і у часовій області. Незважаючи на те, що аналітичні розв'язки застосовні тільки для обмеженого кола канонічних проблем, саме вони дозволяють виявити фундаментальні особливості явищ, легко інтерпретувати спостережувані результати, гарантувати високу точність обчислень, а також досягти глибокого розуміння перехідних процесів і усталених режимів.

Тому є актуальною тема дисертаційної роботи, направленої на вирішення *проблеми* побудови єдиної чисельно-аналітичної теорії дослідження нестационарних явищ у відкритих структурах.

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

Робота частково пов'язана з виконанням конкурсної програми «Фундаментальне математичне та чисельне дослідження оптичних електромагнітних полів одиничних та зв'язаних мікрорезонаторних лазерів з нанорозмірними активними шарами, нитками та стрічками» відповідно до державної цільової програми «Нанотехнології та наноматеріали», постанови Кабінету Міністрів України від 12.10.09 №1231 «Про затвердження Державної цільової науково-технічної програми «Нанотехнології та наноматеріали» на 2010-2014 роки», та розпорядження Президії НАН України від 20.08.2010 № 524.

Робота частково пов'язана з виконанням міжнародних конкурсних проектів в рамках співробітництва ХНУРЕ з закордонними партнерами:

- «Investigation of electromagnetic field in a system of transparent cylinders with time-varying media», The Royal Society/NATO Fellowship, 2005-2006 р., університет м. Ноттінгем, Англія.

- «Modelling of transients in micro-cavities with time dependent material properties», NATO Reintegration Grant, CBP.EAP.RIG 981996, ХНУРЕ, 2006-2008, Харків.

- «Waveguides and resonators with time-varying material inclusions», The Royal Society International Joint Project, Nottingham, 2006-2008 р., університет м. Ноттінгем, Англія.

- «Theoretical Investigation of Linear, Parametric, and Nonlinear Properties of Coupled Microdisk Resonators» за підтримки Німецької служби академічних обмінів (Deutscher Akademischer Austausch Dienst, DAAD), 2010 р., університет м. Єна, Німеччина.

- «Dynamic Control of Sub-wavelength Field Confinement Using a Time Varying Homogeneous Lens of Simple Shape», за підтримки Європейського наукового фонду (ESF) Research Networking Programme NEWFOCUS, 2011 р., університет м. Єна, Німеччина.

- «Transient dynamics of the plasmon excitation in nanolaser consisting of metal nanowire with optically active shell», за підтримки Європейського наукового фонду (ESF) Research Networking Programme PLASMON-BIONANOSENSE, 2012 р., університет м. Єна, Німеччина.

Дисертаційна робота також частково пов'язана з виконанням держбюджетних науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки: № 176 «Аналітико-чисельний метод моделювання ультракоротких електромагнітних процесів в оптоелектронних структурах» 2005 – 2006 р. (№ 0197U014170); № 212-1 «Дослідження хвилеводів та резонаторів з нестационарними матеріальними включеннями» 2007 - 2008 р. (№ 0107U001567); № 248-2 «Моделювання нестационарних електромагнітних процесів в неоднорідних сферичних та циліндричних діелектричних структурах» 2009 – 2012 р. (№ 0110U002594); та конкурсної наукової теми Міністерства освіти та науки України: «Моделювання

нестационарних процесів в мікрорезонаторах з залежними від часу параметрами. RIG 981996» (2006-2008).

В усіх перелічених науково-дослідних роботах та проектах автор дисертації була виконавцем.

**Мета і задачі дослідження.** Дисертаційна робота присвячена створенню теорії нестационарних процесів у відкритих динамічних хвилевідних та резонансних структурах, заповнених як недиспергуючими середовищами, так і середовищами з дисперсією.

Для досягнення даної мети потрібно побудувати адекватний строгий математичний апарат, універсальність якого дозволяє розглядати нестационарні процеси в різних структурах, у тому числі і з високодобротними резонансами, і розв'язати наступні задачі:

- Розробити єдиний чисельно-аналітичний підхід, що дозволяє розглядати нестационарні процеси всередині і зовні відкритих об'єктів з простою геометрією в одно-, дво- і тривимірному випадку. Отримати основні рівняння, початкові та граничні умови для об'єктів заповнених різними нестационарними середовищами, як недиспергуючими, так і з дисперсією. Дослідити межі застосовності даного підходу. Адекватно описати перехідні процеси і усталені режими.

- Дослідити можливості динамічного управління електромагнітним гармонійним полем (плоска хвиля, поле джерела, хвильовий пучок) при його проходженні через нестационарний об'єкт, коефіцієнт заломлення якого стрибком змінюється у часі. Оцінити тривалість перехідного періоду і сталого режиму за допомогою розробленого математичного апарату.

- Розробити чисельний алгоритм дослідження: а) власних частот і полів мод відкритих діелектричних кругових і сферичних резонаторів, що підтримують моди галереї шептання (ГШ), б) власних частот колових багатопарових резонаторів і резонаторів зі включеннями; в) всіх можливих зв'язаних мод резонаторів у вигляді лінійного ланцюжка або фотонної молекули; г) власних плазмонних мод плазмового циліндра і лінійного ланцюжка плазмових циліндрів, а також плазмонних резонансів циліндра з лівостороннього метаматеріалу (ЛММ).

- Застосувати розроблений підхід до дослідження реакції моди ГШ, збудженої в дисковому резонаторі на зміну показника заломлення (стрибкоподібне, імпульсне, послідовність імпульсів), а також на зміну показника заломлення в частині резонатора. Застосувати розроблену методологію для розв'язку тривимірної задачі перетворення моди ГШ в нестационарному сферичному резонаторі.

- Дослідити реакцію моди ГШ в структурі, що складається зі зв'язаних резонаторів, на зміну в часі показника заломлення структури.

- Вивчити реакцію моди регулярного діелектричного хвилеводу на зміну показника заломлення в серцевині.

- Розробити математичну модель імпульсного комплексного точкового джерела у часовій області. Розглянути за допомогою такої моделі нестационарні задачі збудження імпульсним хвильовим пучком мод ГШ в діелектричному резонаторі, а також нестационарних плазмонів на межі метал-діелектрик та ЛММ-діелектрик.

Мета та задачі формулюють тему дисертації, яка є актуальною і важливою як для фундаментальної науки, так і для практичних застосувань.

*Об'єкт дослідження* – нестационарні електромагнітні процеси.

*Предмет дослідження* – характеристики нестационарних електромагнітних процесів у відкритих резонансних та хвилевідних структурах з простою геометрією, що ініційовані зовнішнім імпульсним збудженням або нестационарністю середовища.

*Методи дослідження.* В дисертаційній роботі систематично використовувався апарат математичної фізики, зокрема рівняння у частинних похідних і метод функцій Гріна; апарат теорії функцій комплексного змінного, зокрема операційне числення та теорія лишків; методи чисельного аналізу.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У даній роботі в результаті теоретичних досліджень і комп'ютерного моделювання вирішена актуальна проблема створення теорії нестационарних процесів, за допомогою якої проведені ефективні дослідження та аналіз електромагнітних полів в хвилевідних і резонансних структурах. Застосування розробленої теорії дало такі нові наукові результати:

- Вперше встановлено, що при часовому стрибку діелектричної проникності всередині деякої обмеженої області (циліндра або сфери) нестационарний процес складається з двох етапів: на першому етапі поле відповідає розв'язку початкової задачі, вплив границі області відчувається тільки на другому етапі нестационарності. Показано, що відповідний перехідний процес може бути описаний у вигляді суперпозиції збуджених власних коливань структури або у вигляді сукупності нестационарних хвильових фронтів, що перевідбиваються від границь. Асимптотично з часом поле набуває такого ж вигляду, як і у випадку розсіювання плоскої хвилі на відповідному стаціонарному об'єкті дифракції. Такий детальний опис еволюції поля можна отримати тільки на основі аналітичних розв'язків в частотній області, їх асимптотичних оцінок та математично обґрунтованого обернення у часовий простір за допомогою методів теорії функцій комплексного змінного.

- Вперше аналітично досліджено можливості динамічного управління електромагнітним полем поза межами прозорого об'єкта, діелектрична проникність якого змінюється в часі (нестационарна лінза). Вперше продемонстровані можливості управління положенням і розміром фотонного нанофакела (вузької фокальної плями з шириною меншою довжини хвилі), а також можливості зміни кута відхилення при проходженні хвильового пучка крізь об'єкт з нестационарними властивостями. Зроблені оцінки часу перебудови електромагнітного поля. Встановлено, що тривалість перехідного періоду

збільшується, якщо частота первинного поля наближується до одного з високодобротних резонансів.

- Вперше досліджено відгук високодобротної моди ГШ дискового резонатора на зміну показника заломлення. Встановлено, що мода перетворюється в суперпозицію мод резонатора, як високодобротних, так і низькодобротних, при цьому амплітуди збуджуваних низькодобротних мод малі порівняно зі збуджуваною модою ГШ. Показано, що при цьому спостерігається зсув частоти. У випадку імпульсної зміни властивостей середовища або серії збуджуючих імпульсів виявлено можливо управління часом життя моди в резонаторі.

- Вперше проаналізована еволюція електромагнітного поля в нестационарному неоднорідному резонаторі, ініційована появою в ньому круглої неоднорідності. Показано розщеплення частот і поворот структури поля моди ГШ при утворенні нестационарного включення.

- Класифіковані всі можливі моди коливань в лінійному ланцюжку зв'язаних резонаторів і всі можливі плазмонні резонанси ланцюжка зв'язаних металевих проводів. Показано розщеплення мод, їх гібридизація, зроблені кількісні оцінки добротності.

- Вперше досліджено нестационарний відгук мод зв'язаних резонаторів на зміну в часі властивостей матеріалу. Продемонстровано зсув частоти при збереженні просторового розподілу поля.

- Вперше показано, що в просторово-однорідному хвилеводі в результаті стрибка у часі показника заломлення серцевини можливе перетворення напрямної моди в моди випромінювання, що покидають хвилевід. Вперше вивчено перетворення частот при часовій зміні властивостей серцевини в хвилеводах з різними типами оболонок.

- Вперше модель імпульсного комплексного точкового джерела використана для задач збудження нестационарним хвильовим пучком біжних хвиль у структурах. Розглянуто збудження біжних хвиль ГШ, вперше проведена оцінка часового інтервалу, необхідного для встановлення моди ГШ, візуалізовано биття мод і показано розщеплення ультракороткого імпульсу в резонаторі. Продемонстровано збудження нестационарних плазмонів (плазмонних хвильових пакетів) на циліндричній границі метал-діелектрик та ЛММ-діелектрик. Показано суттєве уповільнення групової швидкості плазмонів, що рухаються вздовж границі ЛММ-діелектрик.

**Практичне значення одержаних результатів.** Представлена в дисертаційній роботі теорія дослідження нестационарних процесів у відкритих структурах дозволила вперше отримати ряд важливих результатів, що поглиблюють розуміння нестационарних явищ, а також відкривають принципово нові можливості динамічного управління електромагнітним полем.

Отримано нові знання про перехідні процеси і сталі режими у відкритих структурах, серед них, наприклад, такі:



1) власна мода резонансної структури (за умови відсутності зовнішнього поля) при зміні в часі показника заломлення зберігає свій просторовий розподіл, однак демонструє зміну частоти;

2) поле, зв'язане з зовнішнім стаціонарним джерелом, після зміни в часі показника заломлення всередині відкритої області на початковому етапі нестационарності зазнає як частотних, так і просторових змін, але при переході до сталого режиму повертається до частоти первинної хвилі, міняючи свій просторовий розподіл.

З урахуванням цього, розроблена теоретична основа для отримання швидкого і ефективного зміщення частоти в резонаторах, що підтримують коливання ГШ, що необхідно для пристроїв зв'язку, телекомунікацій та обробки інформації. Встановлено, що величина зсуву частоти залежить від величини стрибка показника заломлення та ступеня перекриття поля моди з нестационарної областю. Запропоновано шляхи збільшення зсуву частоти за рахунок використання систем зв'язаних резонаторів, вказані класи мод з найбільшою чутливістю до зміни в часі показника заломлення.

Розроблена теоретична основа динамічних лінз, що дозволяють управляти параметрами фотонного нанофакела і міняти напрям хвильового пучка.

Розвинуто методикау знаходження і класифікації всіх можливих мод ланцюжка зв'язаних резонаторів і всіх можливих плазмонних резонансів ланцюжка зв'язаних металевих нанопроводів. Визначення їх частот і добротностей має особливий прикладний інтерес для розрахунку параметрів оптичних і мікрохвильових сенсорів, мікро- і нанолазерів, біосенсорів та оптичних антен.

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні положення і результати дисертації розроблені автором самостійно. З робіт, опублікованих у співавторстві, в дисертації використані лише ті матеріали, які отримані автором особисто або у яких автор брала безпосередню участь. А саме, в монографії [1] автору належить матеріал глави 8 та частково матеріал глави 6. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора полягає в наступному: у роботах [2-5, 7-9, 11, 12, 14, 16-18, 24, 25, 27, 30, 32-34, 36-39, 42, 44-46, 48, 50, 51, 53, 54, 58, 60, 61, 66] автор брала участь у постановці задач, виборі методу, отриманні розв'язків, у виконанні чисельних розрахунків, обговоренні результатів та підготовці публікацій; у роботах [6, 10, 13, 15, 26, 28, 29, 31, 35, 40, 41, 43, 47, 49, 52, 55-57, 59, 62-65, 67-69, 71-74] автор брала участь у постановці задач, виборі методу, інтерпретації результатів та підготовці публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи обговорювалися і доповідалися на наступних наукових семінарах: відкритому семінарі ім. М.А. Хижняка «Інтегральні рівняння електродинаміки», що проводиться на кафедрі вищої математики Харківського національного університету радіоелектроніки у 2007 р. (кер. проф. Нерух О. Г.); інституту досліджень електромагнітної теорії

ім. Дж. Гріна, Університет м. Ноттінгем в 2005 і 2008 р. (кер. проф. Т.М. Бенсон); семінару «Фізика лінійних прискорювачів іонів і їх застосування», присвяченого 80-річчю з дня народження М.А. Хижняка ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» в 2009 р., інституту прикладної фізики університету м. Єна в 2010 р. (кер. проф. Т. Перч); лабораторії інформації та зв'язку, Ніхон Університет м. Токіо в 2010 р. (кер. проф. Т. Ямасакі); лабораторії електромагнітних хвиль і застосувань Чуо Університету м. Токіо в 2010 р. (кер. проф. К. Кобаяші), а також на наступних наукових конференціях і симпозиумах:

- Int. Conf. On Transparent Optical Networks (ICTON): Барселона (2005), Ноттінгем (2006), Рим (2007), Афіни (2008), Понта Дельгада (Португалія) (2009), Мюнхен (2010), Стокгольм (2011);
- Int. Workshop on Open Waveguide Theory and Numerical Modeling (OWTNM): Гренобль (2005), Варезе (2006), Копенгаген (2007), Ейндховен (2008), Єна (2009), Кембрідж (2010);
- Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (ММЕТ): Харків (2006, 2012), Одеса (2008), Київ (2010);
- Int. Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Mm and Sub-mm Waves (MSMW): Харків (2007, 2010);
- «Дни дифракции» DD: Санкт-Петербург (2007);
- Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL): Ялта (2005);
- Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC): Лоборо (Англія) (2007);
- Харківська конференція молодих науковців «Радиофізика та Електроніка»: Харків (2007);
- Харківська конференція молодих науковців «Low temperature physics»: Харків (2010);
- Progress in Applied Computational Electromagnetics: Верона (2007);
- Науковий Форум «Радиоелектроніка і молодь у 21 столітті»: Харків (2008, 2011, 2012);
- Int. Workshop on Theoretical and Computation Nano-Photonics (TaCoNa): Бад Хонейф (Німеччина) (2011, 2012);
- Asia Pacific Microwave Conf. (APMC): Йокогама (2010);
- Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT): Київ (2011);
- Int. Conf. on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM): Алушта (2008), Севастополь (2010), Харків (2011);
- Micro- and Nano- Photonics Materials and Devices (MINAP): Тренто (Італія) (2012);
- European Microwave Week (EuMW): Амстердам (2012);
- European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP): Прага (2012).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 74 наукових працях, в тому числі, одній монографії, 22 статтях в фахових журналах та 51 публікації у збірниках праць міжнародних та всеукраїнських конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків. Її загальний обсяг складає 347 сторінок, з них 276 сторінок основного тексту. Дисертація містить 139 рисунків. Список використаних джерел на 38 сторінках нараховує 329 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладено актуальність обраної теми, мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет дослідження та методи, що будуть використовуватися. Також наведено зв'язок роботи з науковими програмами. Показано наукову новизну і практичну значимість одержаних результатів, наведено дані про їх апробацію та публікації, де підкреслено особистий внесок автора.

**Перший** розділ присвячено огляду літератури за темою дисертації, зазначено, що нестационарні явища займають важливе місце в сучасних дослідженнях, як з точки зору фундаментальної науки, так і з прикладної точки зору. Сплеск зацікавленості спостерігається саме в останні роки, що викликано величезними технологічними успіхами у виготовленні мікро- і нанорозмірних структур і можливостями динамічного управління їх матеріальними властивостями.

Надано детальний огляд літератури, що стосується відкритих резонаторів із модами ГШ, та їх застосувань в різних областях від оптичного до мікрохвильового діапазонів. Електромагнітне поле в таких резонаторах багаторазово відбивається від границі, зазнаючи майже повного внутрішнього віддзеркалення, внаслідок чого добротність таких коливань надзвичайно велика. Власні частоти таких резонаторів комплекснозначні вигляду  $\omega = \omega' + i\omega''$ , де  $\omega'$  визначає частоту осциляцій, а  $\omega''$  затухання. Добротність таких коливань визначається формулою  $Q = \omega' / (2\omega'')$ .

Під динамічними пристроями зазвичай розуміють пристрої із контрольованими в часі матеріальними параметрами. Вони мають більш широкі можливості для управління полем, ніж їхні стаціонарні аналоги. Зміна в часі діелектричної проникності на практиці може бути реалізована, наприклад, за допомогою опромінювання світлом лазера, прикладанням напруги, іонізацією або зміною температурного режиму. Динамічні резонатори, в яких за допомогою впливу стороннього поля можлива зміна параметрів матеріалу, надають великі можливості для їх використання в системах уповільнення і зупинки світла, пристроях повністю оптичного перемикачання, перенастроюваних фільтрах.

Плазмонні резонанси, що виникають на границі розділу метал-діелектрик в зоні непрозорості металу (дійсна частина діелектричної проникності від'ємна) в даний час є предметом зростаючого інтересу спричиненого можливістю сильної локалізації світла на субхвильовому рівні. Збудження плазмонних резонансів можливо також на границі ЛММ (матеріалу з одночасно від'ємними діелектричною та магнітною проникностями) і діелектрика.

Поряд з плазмонними пасивними пристроями зростає інтерес до активних, тобто динамічних, систем: плазмонних перемикачів, динамічно керованих наноантен. Динамічне управління може бути реалізовано, якщо плазмонна наноструктура гібридизована з матеріалом, властивостями якого можна керувати у часі.

У даному розділі також надано огляд теоретичних підходів та методів, які використовуються для моделювання нестационарних процесів. Обґрунтовується необхідність створення єдиної чисельно-аналітичної теорії для дослідження перехідних процесів у відкритих структурах.

У **другому** розділі закладені основи теорії, що описує електромагнітні поля у відкритих структурах. На базі нестационарних рівнянь Максвелла записані відповідні диференціальні рівняння у частинних похідних, які в даній дисертаційній роботі є вихідними. Наприклад, у випадку недиспергуючого діелектрика з показником заломлення  $n(t)$  - це хвильові рівняння:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{e}(\vec{r}, t) + 1/c^2 \cdot \partial_u^2 (n^2(t) \vec{e}(\vec{r}, t)) = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{h}(\vec{r}, t) + 1/c^2 \cdot \partial_i (n^2(t) \partial_i \vec{h}(\vec{r}, t)) = 0, \quad (2)$$

де  $\vec{e}$  - вектор напруженості електричного поля,  $\vec{h}$  - вектор напруженості магнітного поля, символ радіус-вектора  $\vec{r}$  означає залежність від просторових координат,  $t$  - від часу,  $c$  - швидкість світла у вакуумі. Всі середовища у цьому розділі вважалися немагнітними.

Припускається, що всі зміни середовищ починаються в деякий момент часу, який, не зменшуючи загальності, можна вважати нульовим. Всі поля, що існували до нульового моменту часу, вважаються відомими. У даному розділі сформульовані початкові умови, які зв'язують електричні і магнітні поля до і після нульового моменту часу. Так, наприклад у випадку стрибкоподібної зміни показника заломлення від значення  $n_1$  до значення  $n_2$  ці умови мають вигляд:

$$\vec{e}(\vec{r}, t = +0) = n_1^2/n_2^2 \cdot \vec{e}(\vec{r}, t = -0), \quad \partial_i \vec{e}(\vec{r}, t = +0) = n_1^2/n_2^2 \cdot \partial_i \vec{e}(\vec{r}, t = -0), \quad (3)$$

$$\vec{h}(\vec{r}, t = +0) = \vec{h}(\vec{r}, t = -0), \quad \partial_i \vec{h}(\vec{r}, t = +0) = n_1^2/n_2^2 \cdot \partial_i \vec{h}(\vec{r}, t = -0). \quad (4)$$

У випадку диспергуючого середовища, в якості якого в цьому розділі розглянута холодна ізотропна плазма без поглинання, що утворюється у нульовий момент часу і після утворення має постійну плазмову частоту  $\omega_p$ , вихідні рівняння є рівняннями Клейна-Гордона

$$\nabla \times \nabla \times \vec{h}(\vec{r}, t) + 1/c^2 \cdot \partial_u^2 \vec{h}(\vec{r}, t) + \omega_p^2/c^2 \cdot \vec{h}(\vec{r}, t) = 0, \quad \vec{h}(\vec{r}, t) = \partial_t \vec{h}(\vec{r}, t), \quad (5)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{e}(\vec{r}, t) + 1/c^2 \cdot \partial_u^2 \vec{e}(\vec{r}, t) + \omega_p^2/c^2 \cdot \vec{e}(\vec{r}, t) = 0. \quad (6)$$

Початкові умови мають наступний вигляд:

$$\vec{e}(\vec{r}, t = +0) = \vec{e}(\vec{r}, t = -0), \quad \partial_i \vec{e}(\vec{r}, t = +0) = \partial_i \vec{e}(\vec{r}, t = -0), \quad (7)$$

$$\begin{aligned}\vec{h}(\vec{r}, t = +0) &= \vec{h}(\vec{r}, t = -0), \quad \partial_t \vec{h}(\vec{r}, t = +0) = \partial_t \vec{h}(\vec{r}, t = -0), \\ \partial_{tt}^2 \vec{h}(\vec{r}, t = +0) &= \partial_{tt}^2 \vec{h}(\vec{r}, t = -0).\end{aligned}\tag{8}$$

На основі цих рівнянь побудовані аналітичні розв'язки початкових задач електродинаміки для випадку зміни показника заломлення як у диспергуючому середовищі, так і в середовищі без дисперсії. Вивчено розщеплення первинної хвилі на «передану» в часі і «відбиту» в часі хвилі з новими частотами і амплітудами при зміні властивостей безмежного фонового середовища.

Для вивчення впливу утворення нестационарної області з простими границями (шар, коловий циліндр, сфера) на електромагнітне поле відповідне рівняння (1, 2, 5, 6) записувалось в прямокутній декартовій, циліндричній або сферичній системі координат. Рівняння розв'язувалися методом неповного розділення змінних. Для того щоб повністю відокремити часову змінну, до вихідних рівнянь було застосовано перетворення Лапласа, що дозволило отримати аналітичні вирази для функцій-зображень в припущенні стрибкоподібної зміни властивостей середовища. Розв'язки мають вигляд суперпозиції розв'язку початкової задачі, що задовольняє відповідним початковим умовам (3, 4, 7, 8) та доданків, що відповідають впливу границь і мають вигляд рядів з невідомими коефіцієнтами при відповідних власних функціях. Невідомі коефіцієнти знаходились із граничних умов, що були записані у цьому розділі у явному вигляді для кожного випадку окремо. Так, наприклад, у випадку зміни показника заломлення від значення  $n_1$  до значення  $n_2$  всередині циліндра радіуса  $a$  ці умови для перпендикулярно-поляризованого магнітного поля виглядають наступним чином:

$$H_z(\rho = -a, \varphi, p) = H_z(\rho = +a, \varphi, p),\tag{9}$$

$$\begin{aligned}n_1^2 \partial_\rho H_z(\rho = -a, \varphi, p) - i/\omega_0 n_1^2 \partial_\rho h_z(\rho = -a, \varphi, t = -0) = \\ = n_2^2 \partial_\rho H_z(\rho = +a, \varphi, p) - i/\omega_0 n_2^2 \partial_\rho h_z(\rho = +a, \varphi, t = -0),\end{aligned}\tag{10}$$

тут вісь  $Oz$  напрямлена уздовж осі циліндра,  $(\rho, \varphi)$  - полярні координати у поперечному перерізі циліндра,  $\omega_0$  - частота первинного поля,  $H_z(p)$  - це функція-зображення по Лапласу для магнітного поля  $h_z(t)$ ,  $p$  - змінна перетворення Лапласа. Варто зазначити, що на відміну від випадку стаціонарного циліндра, вираз (10) має додаткові доданки, що обумовлені нестационарністю середовища.

Особливі точки отриманих функцій-зображень зв'язані з власними частотами об'єктів, а криволінійні границі і дисперсія середовища ведуть до появи точок розгалуження. Часова динаміка відновлювалась за формулою Мелліна та теоремою Коші про лишки. Такий спосіб обернення дозволяє одержувати функції-оригінали з контрольованою точністю та забезпечує прозорість інтерпретації результатів.

У разі стрибкоподібної зміни показника заломлення від фонового значення всередині обмеженої області можна виділити два етапи

нестационарного перетворення поля. На початковому етапі нестационарності поле всередині області визначається розв'язком початкової задачі, демонструє зсув частоти, яка не залежить від форми границі, і збереження просторової структури. На другому етапі проявляється вплив нестационарної границі у вигляді хвиль, що на ній утворилися.

Хвильова динаміка перехідних процесів показана як сукупність нестационарних хвильових фронтів, що перевідбиваються від границь, а також як суперпозиція збуджуваних власних мод структури. Ці два підходи відтворюють двояку природу нестационарних хвильових процесів. На відміну від безмежного нестационарного середовища, зміна властивостей в обмеженій області призводить до зміни просторової структури поля та утворення цілого спектру хвиль, що містить і хвилю з частотою джерела. У сталому режимі вирази для полів збігаються з рішеннями задачі дифракції на відповідному об'єкті (шар, коловий циліндр, сфера).

У третьому розділі розглянуто низку прикладних задач про динамічний контроль зовнішнього падаючого поля за допомогою зміни в часі показника заломлення розсіювача на базі методології, розробленої у другому розділі. В якості нестационарного об'єкта дифракції розглянуто коловий циліндр, що дозволило описати фізичні особливості процесів у рамках скалярної двовимірної задачі. Отримано аналітичні вирази для функцій-зображень розв'язку задачі розсіювання зовнішнього гармонійного поля на циліндричній неоднорідності, показник заломлення якої зазнає стрибкоподібні зміни у часі. В якості зовнішнього поля розглянуті плоска хвиля, нитка зі струмом (точкове джерело) і хвильовий пучок (комплексне точкове джерело). Для випадку падіння плоскої хвилі розглянута як внутрішня (нестационарною є область всередині циліндричної границі), так і зовнішня (нестационарним є простір, в який занурено стаціонарний циліндр) задачі. Показано, що поле зазнає часових, частотних та просторових змін. При переході до сталого режиму відбувається повернення до частоті первинної хвилі (для внутрішньої задачі) і встановлення коливань на зміщеній частоті для зовнішньої задачі. Досліджено тривалість перехідного періоду в залежності від близькості частоти джерела до однієї з власних частот циліндра (до і після стрибка проникності), а також від добротності цих частот. Тривалість перехідного періоду значно збільшується поблизу високодобротних мод. На Рис. 1 відображена еволюція електричного поля, що випромінюється точковим джерелом, при зміні показника заломлення всередині циліндра від значення  $n_1 = 3.385$  до значення  $n_2 = 3.42$ . Зображення відповідають фіксованим моментам нормованого часу  $T = tc/a$  ( $t$  - реальний час,  $a$  - радіус циліндра,  $c$  - швидкість світла). Частота джерела знаходиться поблизу резонансних частот. До зміни показника заломлення це мода, поле якої має п'ять кутових варіацій та дві варіації вздовж радіусу, після зміни показника заломлення це високодобротна мода ГШ, яка має вісім кутових варіацій. Процес перебудови поля в цьому випадку доволі тривалий.

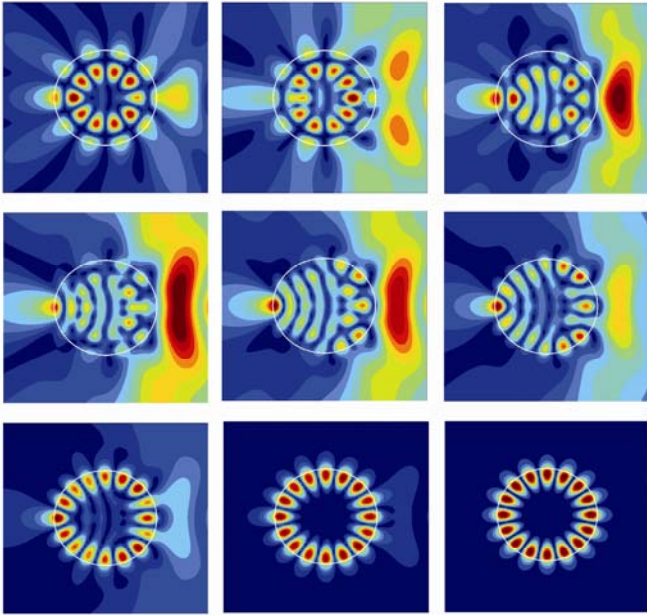


Рис. 1. Еволюція електричного поля в фіксовані моменти часу: (1) первинне поле; (2)  $T=30$ ; (3)  $T=60$ ; (4)  $T=90$ ; (5)  $T=200$ ; (6)  $T=400$ ; (7)  $T=1000$ ; (8)  $T=4000$ ; (9) усталений режим

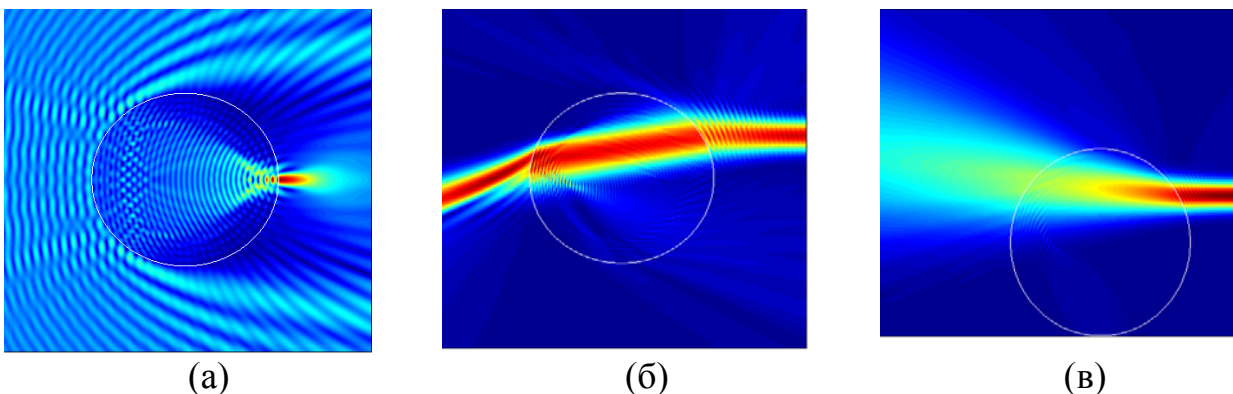


Рис. 2. Розподіл модуля електричного поля в ближній зоні: (а) формування нанофакела; (б) проходження хвильового пучка через діелектричну лінзу; (в) проходження пучка через плазмову лінзу

На основі отриманих аналітичних розв'язків вивчена можливість динамічного управління параметрами (положення, ширина) фотонного нанофакела (Рис. 2(а), тут показник заломлення циліндра  $n = 1.7$ , нормована частота джерела  $\omega_0 c/a = 10\pi$ ). Досліджено можливість контролю відхилення хвильового пучка при його проходженні через динамічну (діелектричну Рис. 2(б) або плазмову Рис. 2(в)) лінзу. Рис. 2(б) відповідає таким значенням параметрів:  $n = 1.5$ ,  $\omega_0 c/a = 20\pi$ ; Рис. 2(в):  $\omega_0 c/a = 30\pi$ ,  $\omega_p/\omega_0 = 0.5$ , де  $\omega_p$  - плазмова частота.

У четвертому розділі розроблена теорія застосована для дослідження відкритих нестационарних резонаторів з модами ГШ. Аналітично описано перетворення моди ГШ в одиночному тонкому дисковому резонаторі в результаті зміни властивостей матеріалу. Тривимірна задача замінена її двовимірним аналогом за допомогою методу ефективного показника заломлення. Досліджено нестационарний відгук моди ГШ на стрибкоподібну зміну показника заломлення, а також реакція моди на послідовність кінцевого числа імпульсів збудження властивостей середовища. Встановлено, що при стрибкоподібній зміні показника заломлення збуджується цілий спектр мод резонатора з тим же кутовим номером, що і початкова мода, проте їх амплітуди

надзвичайно малі порівняно з амплітудою первинної моди. Виняток становить тільки мода ГШ, що відповідає новому значенню показника заломлення. Амплітуда цієї моди порівнянна з амплітудою первинної моди. Таким чином, мода ГШ трансформується в моду ГШ з тим же розподілом поля і новою частотою.

Вивчено перетворення моди ГШ у разі імпульсного збудження показника заломлення в дисковому резонаторі. При поверненні показника заломлення до свого початкового значення, частота моди також повертається до свого початкового значення, але при цьому змінюється її амплітуда. Досліджено залежність амплітуди від величини зміни показника заломлення і тривалості інтервалу збудження. Вивчено можливості управління часом життя моди в резонаторі у випадку серії збуджуючих імпульсів параметрів середовища.

Побудовано аналітичні розв'язки у вигляді функцій-зображень при перетворенні початкового поля в результаті утворення нестационарного концентричного включення в центрі резонатора, а також уздовж його границі. Нестационарне концентричне включення веде до перетворення первинної моди ГШ в суперпозицію мод резонатора, однак амплітуди вищих мод нехтовно малі в порівнянні з первинною модою. Вивчена залежність зсуву частоти, який при цьому спостерігається, від ступеня перекриття області існування моди і нестационарної області.

Розглянуто задачу про зміну електромагнітного поля в результаті утворення неконцентричної круглої області всередині резонатора. Аналітичний розв'язок для функцій-зображень перетвореного поля отримано у вигляді рядів, коефіцієнти яких визначаються з рішень нескінченних матричних рівнянь. Досліджено розщеплення частот і особливості перетворення поля моди при розбіжності осей симетрії первинної моди і неоднорідності.

Отримано аналітичний розв'язок тривимірної задачі про відгук моди ГШ в сферичному резонаторі, коефіцієнт заломлення якого змінюється за часом. За допомогою розробленої методології зроблена оцінка внеску кожної збуджуваної моди в результуюче поле. Показано, що амплітуди вищих мод малі порівняно зі збуджуваною модою ГШ з таким же розподілом поля як і первинна мода. Вивчено зсув частоти для мод обох поляризацій, а також досліджено залежність зсуву частоти від просторового розподілу моди. На Рис. 3(а) наведений спектр до та після нульового моменту часу. Після стрибка проникності бачимо фіолетовий зсув резонансної частоти (верхній рисунок). Резонансний пік відповідає збуджуваній моді ГШ в резонаторі з новим показником заломлення. Рис. 3(а) (внизу) являє собою той же спектр в збільшеному масштабі. Тут можна побачити кілька додаткових піків, відповідних збудженим модам з більш високими радіальними індексами. Вставка в верхній рисунок зображує розподіл поля моди в екваторіальній і меридіанній площинах. Рис. 3(б) зображує часову еволюцію поля в різних точках спостереження. Тут  $r$  відстань від центру, нормована радіусом; нормований час такий же як і на Рис. 1. На невеликій відстані від центру добре видно сплески поля, викликані збудженням вищих мод, але перехідний процес нетривалий, тому що амплітуди цих мод незначні, а добротності таких мод



дуже малі. Моді ГШ локалізовані біля границі резонатора, в цій області нестационарні процеси проявляються дуже слабо (слід також звернути увагу на різні значення поля по вертикальній шкалі).

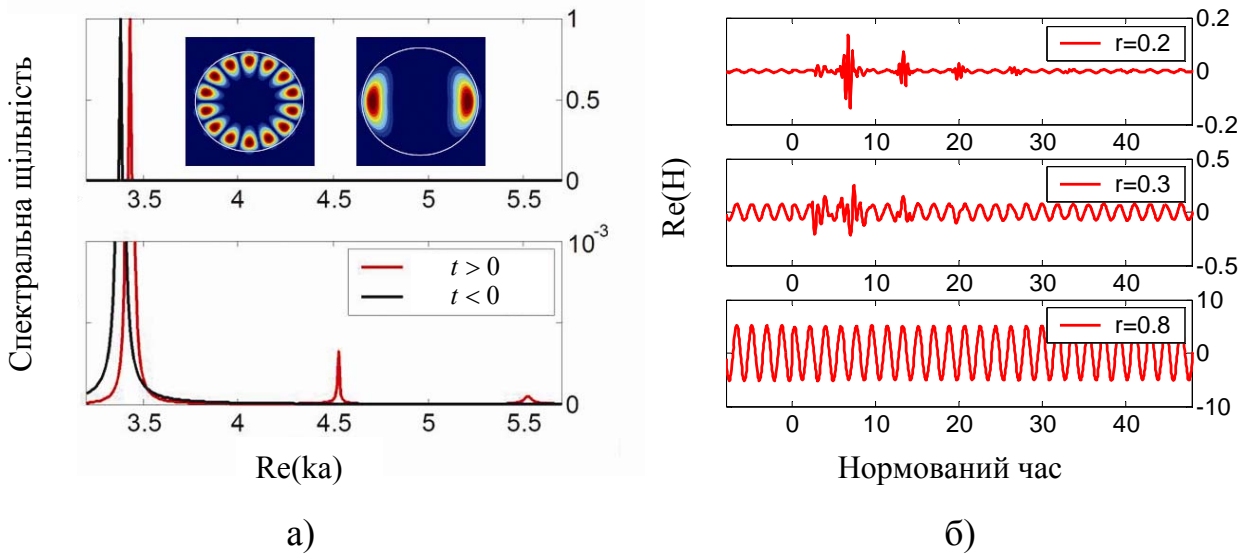


Рис. 3. Перетворення моди ГШ в наслідок стрибкоподібної зміни показника заломлення у сферичному резонаторі від значення  $n_1 = 3.4$  до значення  $n_2 = 3.35$ : а) спектр внутрішнього поля до та після стрибка проникності; б) еволюція магнітного поля за часом у різних точках спостереження

У **п'ятому** розділі детально досліджені відкриті структури, що складаються з декількох близько розташованих (зв'язаних) колових резонаторів, т.зв. фотонні молекули і лінійні ланцюжки кінцевої довжини. Отримані відповідні рівняння для знаходження власних значень і вирази для полів зв'язаних мод. На основі аналізу отриманих рівнянь і чисельного моделювання описані і класифіковані всі можливі моди лінійного ланцюжка зв'язаних резонаторів, знайдені власні частоти та добротності. Моди зв'язаних резонаторів лінійного ланцюжка являють собою симетричні і антисиметричні комбінації відповідних мод одиночного резонатора. Встановлено, що власні частоти зв'язаних мод наближаються до частоті одиночного резонатора при збільшенні відстані між резонаторами. Зі зменшенням відстані спостерігається все більше відхилення частот зв'язаних мод від моди відокремленого резонатора, відбувається так зване розщеплення мод. Дослідження добротностей показало, що добротність в лінійному ланцюжку можна істотно збільшити шляхом підбору відстаней між резонаторами.

За допомогою розробленої методології вивчений нестационарний відгук мод різних класів симетрії лінійного ланцюжка на зміну в часі матеріалу резонаторів. Встановлено, що мода ГШ при однорідному стрибку показника заломлення у всіх резонаторах трансформується в суперпозицію мод того ж класу симетрії, що і первинна мода. Як і у випадку одиночного резонатора, амплітуди збуджуваних мод малі в порівнянні з амплітудою первинної моди. Виняток становить тільки мода ГШ ланцюжка резонаторів з тим же

просторовим розподілом, що і первинна мода і амплітудою, порівнянню з амплітудою первинної моди. При цьому спостерігається зсув частоти

За допомогою чисельного моделювання встановлені класи мод, що найбільш чутливі до зміни властивостей матеріалу резонаторів і демонструють найбільший зсув частоти при одному і тому ж значенні величини стрибка показника заломлення. Показано, що найбільшу чутливість до зміни властивостей матеріалу мають повністю антисиметричні антизв'язані моди, поля яких максимально сконцентровані всередині резонаторів. Рис. 4 (вгорі) зображує просторове розподілення повністю антисиметричної антизв'язаної

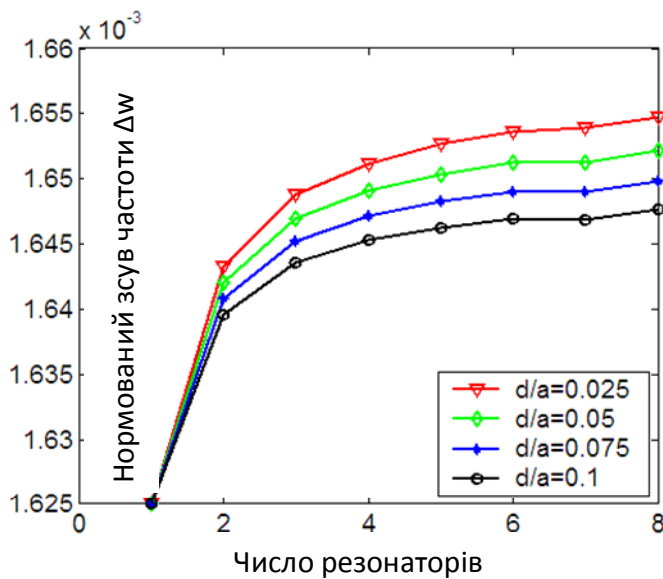
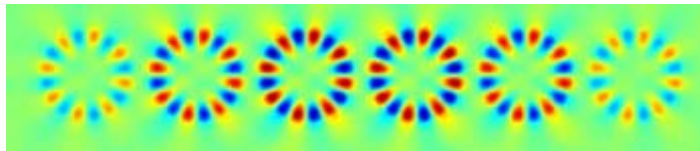


Рис. 4. Величина зсуву частоти для повністю несиметричної моди в залежності від числа резонаторів в ланцюжку ( $n_1=2.63$ ,  $n_2=2.631$ ). Вгорі зображене поле такої моди у ланцюжку із шести резонаторів

моди ГШ у лінійному ланцюжку з шести резонаторів. Рис. 4 (внизу) демонструє величину зсуву частоти для повністю несиметричної антизв'язаної моди в залежності від числа резонаторів в ланцюжку при стрибкоподібній зміні показника заломлення від значення  $n_1=2.63$  до значення  $n_2=2.631$ . Зсув частоти зростає із збільшенням числа резонаторів і зі зменшенням відстаней між ними. Тут  $d$  - відстань між резонаторами. Нормований зсув частоти  $\Delta w = \Delta \omega a / c$ ,  $\Delta \omega = \omega'_1 - \omega'_0$ , де  $\omega'_0$  - дійсна частина частоти первинної моди ГШ, а  $\omega'_1$  - дійсна частина частоти перетвореної моди ГШ.

Були вивчені моди фотонної молекули, що складається з резонаторів, розташованих у вершинах квадрата. Описано класи симетрії таких мод, знайдені власні частоти та добротності. Вивчено нестационарний відгук моди ГШ такої фотонної молекули на стрибок показника заломлення резонаторів. Зсув частоти, який при цьому відбувається, максимальний для повністю антисиметричних мод, поля яких максимально локалізовані всередині резонаторів.

Досліджено порушення симетрії фотонної молекули, що складається з двох зв'язаних резонаторів, в результаті зміни в часі властивостей середовища в одному з них. Показано, що стрибок показника заломлення в одному з резонаторів ініціює перерозподіл енергії первинної моди між двома класами мод, т.зв. парними і непарними модами, а саме, між відповідними модами ГШ

цих класів. Відмінною особливістю даного випадку від випадку симетричної нестационарної фотонної молекули є присутність у спектрі перетвореного поля двох домінуючих частот замість однієї.

У шостому розділі розроблений аналітичний підхід застосовано до дослідження нестационарних процесів у хвильоводах з нестационарною серцевиною. Отримано аналітичні вирази для функцій-зображень полів у регулярних хвильоводах (плоскому, круглому, а також багат шаровому) з нестационарною серцевиною, показник заломлення якої має вигляд східчастої функції від часу.

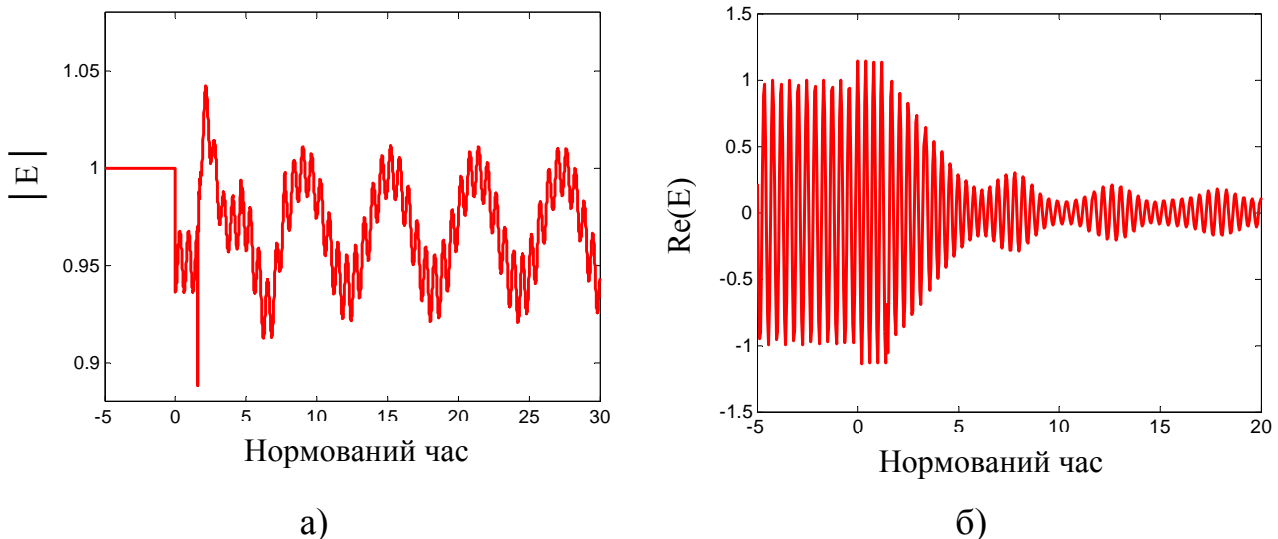


Рис. 5 (а). Залежність від часу модуля електричного поля при стрибкоподібній зміні показника заломлення в серцевині круглого хвильоводу від значення  $n_1 = 1.5$  до значення  $n_2 = 1.55$ , первинне поле -  $TM_1$  мода. (б) Залежність від часу дійсної частини електричного поля при стрибкоподібній зміні показника заломлення в серцевині круглого хвильоводу ( $n_1 = 1.6$ ,  $n_2 = 1.5$ , первинне поле - мода  $TM_6$ )

Вивчено нестационарний відгук напрямної моди (хвилі) хвильоводу на зміну в часі показника заломлення серцевини в разі одномодового і багатомодового режимів. В одномодовому режимі після стрибка проникності первинна мода перетворюється в суперпозицію прямої і зворотної хвиль, при цьому перетворюється її частота. Встановлено, що зміщення частоти залежить не тільки від величини стрибка показника заломлення, але і від поляризації моди, а також від величини поздовжньої постійної поширення. Продемонстровано биття збуджених мод у багатомодовому хвильоводі з нестационарною серцевиною (Рис. 5(а)). На прикладі круглого хвильоводу показано, що в просторово-однорідному хвильоводі в результаті стрибка у часі показника заломлення серцевини можливе перетворення напрямної моди в моди випромінювання, що швидко покидають хвильовід (Рис. 5(б)). Вивчено перетворення частот при часовій зміні властивостей серцевини в круглих хвильоводах з різними типами оболонок. Показано, що найбільший зсув частоти досягається в хвильоводі з відбиваючими стінками.

У **сьомому** розділі досліджено плазмонні резонанси, що збуджуються на колових циліндричних границях. Було отримано дисперсійне рівняння, що дозволило знайти частоти, добротності та розподіли полів плазмонних резонансів одиничного металевго нанопроводу. Незважаючи на те, що формально дисперсійне рівняння має розв'язки для довільного числа кутових варіацій поля, відмінних від нуля, показано, що в перерізі повного розсіювання спостерігається тільки декілька резонансних піків. Для оптично тонких проводів основний резонансний пік у поперечнику розсіювання відповідає дипольному плазмону, із збільшенням поперечного розміру проводу максимум перерізу розсіювання зміщується в бік мультипольних плазмонів.

Вперше зв'язані плазмонні резонанси ланцюжка металевих нанопроводів знайдені з розв'язку задачі на власні значення. Отримані відповідні дисперсійні рівняння у вигляді детермінантних рівнянь нескінченних блокових матриць. Виділено класи симетрії плазмонів, знайдені їхні частоти та добротності. Продемонстровані «яскраві» плазмони, які ефективно збуджуються плоскою хвилею, і «темні» плазмони, які не спостерігаються у поперечнику розсіювання. Встановлено, що при малих відстанях між нанопроводами (менших радіуса) спектр має дуже складний характер з одночасним збудженням декількох зв'язаних плазмонів. Це означає, що квазістатичне наближення, яке часто використовують при вивченні плазмонних резонансів, не можна застосовувати для близько розташованих проводів. Для малих відстаней між проводами необхідний неквазістатичний розгляд, який використовується в даній роботі. Встановлено, що при збільшенні кількості проводів у ланцюжку, можливе зростання добротності плазмонного резонансу при певних відстанях між проводами. Це означає, що при нанесенні активного покриття, поріг генерації нанолазерів з таких металевих нанопроводів, на відстані відповідній максимальній добротності, матиме мінімальне значення.

Вперше досліджені плазмонні резонанси циліндра, виготовленого з ЛММ. Частоти і добротності знайдені з розв'язку задачі на власні значення. Показано, що плазмонні резонанси циліндра з ЛММ більш локалізовані, в порівнянні з плазмовим циліндром, в той час як їхні добротності практично збігаються.

Показана можливість перефокусування випромінювання поля ниткоподібного струму, а також збудження субхвильових резонансів в циліндрі з ЛММ. Аналогічні властивості спостерігаються і в двошаровому циліндрі з «правою» серцевиною і «лівою» оболонкою, проте їхні прояви менш яскраві, фокальна пляма розмита, резонансні властивості не такі помітні. Продемонстровано тунельний ефект у двошаровому циліндрі з двох різних ЛММ, за умови що абсолютна величина діелектричної проникності оболонки більше, ніж серцевини.

У **восьмому** розділі поняття імпульсного комплексного точкового джерела було розвинене і вперше використане для дослідження збудження об'єктів зовнішнім нестационарним хвильовим пучком. В основі такої моделі лежить ідея аналітичного продовження функції поля звичайного точкового джерела в комплексний простір. При обчисленні оберненого перетворення Лапласа формула Мелліна була модифікована з урахуванням «комплексного

часового запізнювання». Цей вид джерела є дуже зручною моделлю для опису збудження біжних хвиль. В якості об'єкта, в якому збуджувалися нестационарні біжні хвилі, розглянуті колові циліндри з: (1) діелектрика; (2) плазми; (3) ЛММ.

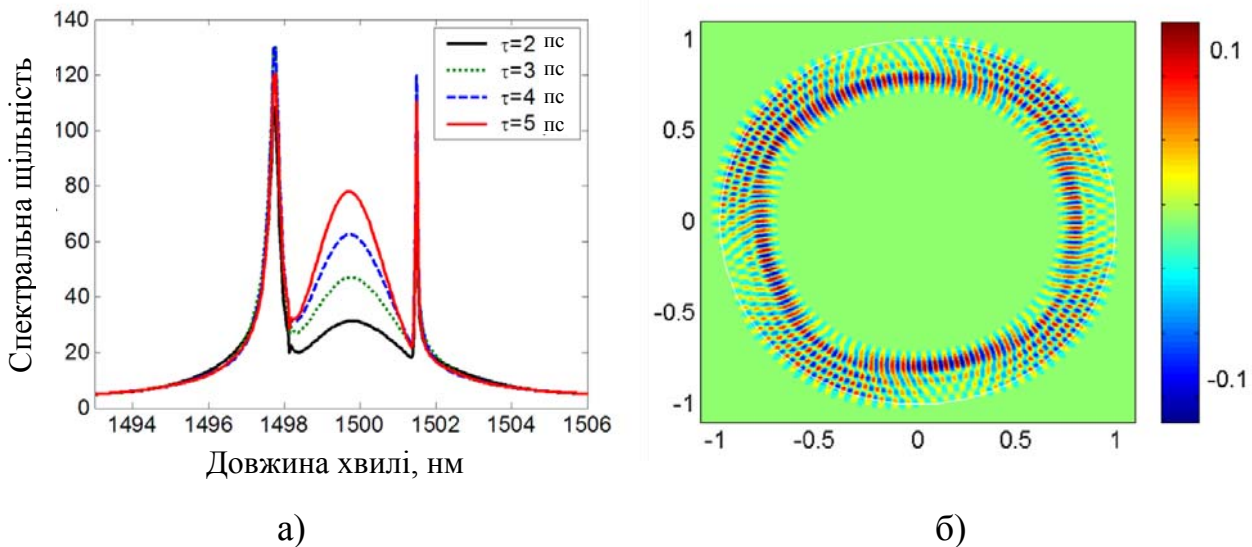


Рис. 6. Биття мод у коловому діелектричному резонаторі (довжина хвилі джерела  $\lambda = 1500$  нм, радіус резонатора  $a = 19.36$  мкм, ефективний показник заломлення  $n = 1.4595 - i \cdot 10^{-5}$ ,  $\tau$  - тривалість імпульсу): (а) спектральна щільність; (б) дійсна частина магнітного поля у момент часу  $t = 33$  пс,  $\tau = 5$  пс

При збудженні діелектричного резонатора імпульсами вивчено зв'язок між добротністю моди і тривалістю часового інтервалу, необхідного для того, щоб мода встановилася в резонаторі. Встановлено, що цей часовий інтервал пропорційний до добротності та часу життя відповідної моди. Досліджено розщеплення імпульсу всередині резонатора, якщо його тривалість менше часу одного обходу. Також продемонстровано ефект биття мод для випадку, коли довжина імпульсу порівнянна з часом декількох обходів, а його частота розташована між двома частотами з приблизно однаковими добротностями (Рис. 6). Рис. 6(а) відображає спектр, що відповідає одночасному збудженню двох мод нестационарним імпульсом. На Рис. 6(б) наведена візуалізація биття мод в момент часу 33 пс при збудженні даного резонатора імпульсом, що направлений по дотичній до границі резонатора і має тривалість 5 пс. Такий розподіл поля є результатом інтерференції декількох одночасно збуджуваних мод.

На основі отриманих аналітичних розв'язків досліджено збудження поверхневих плазмонів нестационарними імпульсами на границі плазмового і ЛММ циліндрів. Для моделювання застосована модель Друде:  $\varepsilon = 1 - \omega_{pe}^2 / (\omega^2 - i\omega\gamma_e)$  для плазми,  $\varepsilon = [1 - \omega_{pe}^2 / (\omega^2 - i\omega\gamma_e)] \times [1 - \omega_{pm}^2 / (\omega^2 - i\omega\gamma_m)]$  для ЛММ, де  $\omega_{pe}$  та  $\omega_{pm}$  відповідні плазмові коливання, а  $\gamma_e$  і  $\gamma_m$  - поглинання. На Рис. 7(а) наведено спектр коливань, що збуджуються імпульсом без частоти.

Для розрахунків використані такі величини  $\omega_{pe} a/c = \omega_{pm} a/c = 5$ ,  $\gamma_e/\omega_{pe} = \gamma_m/\omega_{pm} = 10^{-3}$ ,  $ka = \omega a/c$  - нормована комплексна частота,  $T = tc/a$  - нормований час.

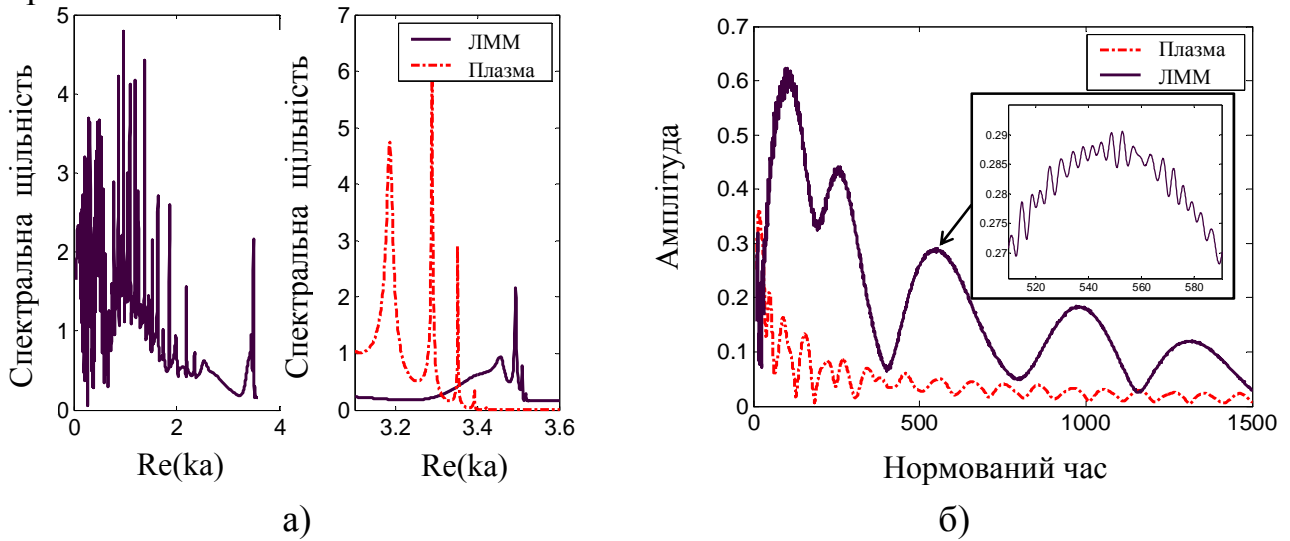


Рис. 7. Збуджувані плазмони на границі плазмового та ЛММ циліндрів: (а) спектральна щільність; (б) еволюція поля за часом

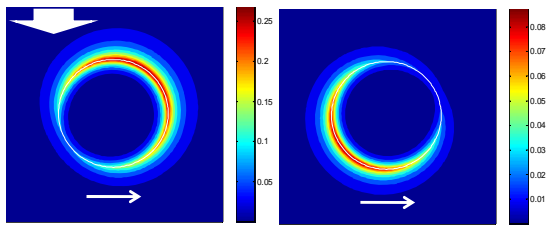


Рис. 8. Миттєві зображення імпульсу, що рухається вздовж циліндричної границі (дійсна частина магнітного поля):  $T = 150\pi$ ,  $T = 550\pi$

імппульсу  $\tau = \pi a/2c$ , нормована частота  $\omega_0 a/c = 3.5$ ).

Очевидно, що поверхнева хвиля вздовж границі ЛММ рухається в 3-4 рази повільніше. Вставка в Рис. 7(б) відображає збільшене зображення графіка для циліндра з ЛММ. Осциляції або «дзвін» пояснюються тим, що в ЛММ, крім плазмонів, збуджуються ще й власні моди.

Биття одночасно збуджуваних плазмонів призводить до збудження асиметричної поверхневої хвилі, що біжить по поверхні циліндра (Рис. 8). На цьому малюнку наведено розподіл магнітного поля для плазмового циліндра для двох моментів нормованого часу. Стрілки вказують напрямок падіння хвильового пучка і напрямок руху поверхневої хвилі.

У циліндрі з ЛММ збуджуються як поверхневі плазмони, так і власні моди. Частоти плазмонів зосереджені поблизу величини  $Re(ka) = 3.5$ , а частоти власних мод належать інтервалу  $0 < Re(ka) < 2.7$ . У циліндрі з ЛММ поверхневі плазмони більш локалізовані. На Рис. 7(б) наведена часова динаміка імпульсу, що поширюється по поверхні ЛММ та плазмового циліндрів. Точка спостереження розташована поблизу границі поза циліндром (тривалість

## ВИСНОВКИ

У даній роботі вирішена актуальна наукова *проблема* створення аналітичної теорії нестационарних процесів у відкритих резонансних та хвилевідних структурах. Ця теорія складається з математично строгого і фізично адекватного підходу до формулювання і розв'язку задач, всебічному аналізі явищ і процесів. Вона гарантує контрольовану точність обчислень та прозорість інтерпретації результатів. Теоретичні дослідження і комп'ютерне моделювання дозволили створити достатньо повну фізичну картину нестационарних явищ в таких структурах та відкрили нові можливості динамічного управління полем.

*Основні результати та висновки роботи полягають у наступному:*

1. На базі нестационарних рівнянь Максвелла отримано відповідні рівняння, що описують електромагнітні поля з довільною залежністю від часу. Для недиспергуючого діелектрика - це хвильові рівняння, для холодної ізотропної плазми без втрат - рівняння Клейна-Гордона, а для холодної ізотропної плазми з втратами - інтегро-диференціальне рівняння. Сформульовані відповідні початкові і граничні умови, що враховують нестационарність границь.
2. Побудовано алгоритм розв'язання цих рівнянь, що базується на методі неповного розділення змінних у відповідній системі координат: декартовій прямокутній, циліндричній, сферичній. Часова змінна відокремлена після застосування перетворення Лапласа. Показано, що в разі стрибкоподібної зміни в часі властивостей середовища, рівняння допускає побудову аналітичного розв'язку.
3. Показано, що знаходження оберненого перетворення Лапласа за формулою Мелліна з використанням теореми Коші про лишки не тільки гарантує обернення у часову область з контрольованою точністю, але й забезпечує простоту інтерпретації результатів.
4. За допомогою розробленої методології розв'язано ряд задач для об'єктів з простою геометрією (шар, круговий циліндр, сфера). В рамках двовимірної моделі розглянуті випадки шаруватого колового резонатора, резонатора з коловим неконцентричним включенням, а також різних структур зі зв'язаних резонаторів. У рамках такого підходу в подальшому можуть бути досліджені довільні шаруваті структури з плоско-паралельними границями, шаруваті сфери, сфери із включеннями і комбінації сфер.
5. Розглянуто перетворення полів в разі стрибкоподібної зміни показника заломлення, імпульсного та скінченної послідовності прямокутних імпульсів збудження середовища. Показано, що довільна залежність показника заломлення від часу може бути апроксимована за допомогою суперпозиції східчастих функцій.
6. На основі отриманих аналітичних розв'язків і всебічного аналізу явищ продемонстровані можливості динамічного управління зовнішнім полем за допомогою варіювання у часі параметрів матеріалу розсіювача. На прикладі циліндричної динамічної лінзи (діелектричної та плазмової) показано

відхилення напряму ходу хвильового пучка, зсув положення і зміни ширини фокальної плями (фотонного нанофакела).

7. Досліджено відгук моди ГШ одиночного діелектричного колового резонатора на зміну властивостей матеріалу. Показано ефективність механізму зсуву частоти, що супроводжується низькими втратами і швидкою перебудовою поля при стрибкоподібній зміні показника заломлення. У разі серії збуджуючих імпульсів продемонстрована можливість контролю часу життя моди в резонаторі. Розв'язані задачі про перетворення моди ГШ в результаті утворення в резонаторі нестационарного концентричного включення і досліджено питання про залежність зсуву частоти від ступеня перекриття області існування моди і нестационарної області. У разі максимального перекриття зсув частоти максимальний.

8. Вперше розв'язана задача про перетворення електромагнітного поля в результаті утворення нестационарної неконцентричної колової області всередині резонатора. Показано розщеплення частот і поворот поля моди ГШ при розбіжності осей симетрії первинної моди і неоднорідності.

9. Досліджено моди ГШ сферичного резонатора з показником заломлення, що має вигляд східчастої у часі функції. Розгляд тривимірної моделі дозволив встановити, що при одній і тій же величині зміни показника заломлення, Н-поляризовані моди демонструють більший зсув частоти.

10. На основі строгих аналітичних розв'язків описані і класифіковані моди лінійного ланцюжка зв'язаних колових резонаторів, а також фотонної молекули, що складається з таких резонаторів, розташованих у вершинах квадрата. Досліджено їхні власні частоти, добротності і розподіли полів. Встановлені класи мод ГШ, що найбільш чутливі до зміни в часі властивостей матеріалу резонаторів і демонструють найбільший зсув частоти при одному і тому ж значенні величини стрибка показника заломлення. Показано, що найбільшу чутливість до зміни властивостей матеріалу мають повністю антисиметричні антизв'язані моди, поля яких максимально локалізовані всередині резонаторів. При несиметричній зміні показника заломлення в одному із двох зв'язаних резонаторів встановлено перерозподіл енергії між двома домінуючими модами.

11. Розроблений аналітичний підхід був застосований для вивчення відкритих хвилевідних структур. У хвилеводі з нестационарною серцевиною продемонстровано можливості перетворення напрямної моди як в суперпозицію напрямних мод, що «пройшли» в часі і «відбилися» в часі, так і в моди випромінювання, що швидко покидають хвилевід. Показано, що в хвилеводах з нестационарною серцевиною і різними оболонками, найбільший зсув частоти досягається в хвилеводі з відбиваючим покриттям.

12. Вперше плазмонні резонанси одиничного нанопроводу і лінійного скінченного ланцюжка зв'язаних металевих нанопроводів знайдені з розв'язку задачі на власні значення, що дозволило відшукати як «яскраві», так і «темні» плазмони, описати їх розподіли полів, знайти власні частоти та добротності. Вперше досліджені плазмонні резонанси циліндру, виготовленого з ЛММ. Показана можливість перефокусування випромінювання поля ниткоподібного струму, а також збудження субхвильових резонансів у коловому циліндрі з



ЛММ. У циліндрі, складеному з двох різних ЛММ, продемонстровано наявність тунельного ефекту, якщо абсолютна величина діелектричної проникності оболонки більше, ніж серцевини.

13. Розроблена методологія була застосована для дослідження нестационарних процесів, пов'язаних зі збудженням відкритих структур зовнішніми імпульсними джерелами. У даній роботі вперше для дослідження збудження структури зовнішнім нестационарним джерелом було використано поняття імпульсного комплексного точкового джерела. Для цього функція Гріна звичайного точкового джерела була аналітично продовжена в комплексний простір. В якості об'єкта, в якому збуджувалися нестационарні поля, розглянуті діелектричний, плазмовий і ЛММ циліндри.

14. У діелектричному резонаторі встановлено зв'язок між добротністю моди і тривалістю часового інтервалу, необхідного для того, щоб мода встановилася в резонаторі, продемонстровано розщеплення імпульсу всередині резонатора, а також биття мод. Вперше досліджено збудження зовнішніми нестационарними імпульсами поверхневих плазмонів, що рухаються по границі циліндра з плазми та ЛММ. Показано суттєве уповільнення групової швидкості плазмонного хвильового пакету на поверхні циліндра з ЛММ.

*Перспективними напрямками подальших досліджень* можуть бути вивчення динаміки плазмонів у відкритих структурах, які складаються з металевих нанопроводів або сферичних наночастинок. Наприклад, використовуючи даний підхід, можливо вивчити реакцію біосенсора в режимі «реального часу» на зміну показника заломлення навколишнього середовища, викликаного зміною концентрації біоматеріалу на поверхні нанопроводу (наночастинки). Іншим перспективним напрямком буде дослідження нанопроводів (часток) з матеріальними оболонками, властивості яких можуть бути керовані у часі, для застосувань в області плазмонних перемикачів. Ще одним перспективним напрямком є вивчення періодичних структур, наприклад, шаруватих, які мають заборонену зону. Варіювання в часі властивостей матеріальних параметрів поблизу забороненої зони імовірно призведе до зупинки світла. В рамках розробленого підходу також можливо дослідження ЛММ з керованими властивостями, що відкриває ще більші перспективи для динамічного контролю електромагнітного поля.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Монографія

1. Non-stationary electromagnetics / [Nerukh A. G., Sakhnenko N. K., Benson T. M., Sewell P.]. – Singapore: Pan Stanford Publishing, 2012. – 596 p.

### Список статей:

2. Terahertz sensing of non-equilibrium microplasmas / J. H. Brownell, A. G. Nerukh, N. K. Sakhnenko, S. Zhilkov, A. A. Aleksandrova // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2005. – V. 38. – P. 1658 - 1664.

3. Transient transformation of whispering gallery resonator modes due to time variations in dielectric permittivity / N. K. Sakhnenko, T. M. Benson, P. Sewell, A. G. Nerukh // *Optical and Quantum Electronics*. - 2006. - Vol. 38. – P. 71 - 81.
4. Investigation of 2-D electromagnetic transients in a circular cylinder with time discontinuity in permittivity via the resolvent method / N. K. Sakhnenko, A. G. Nerukh, T. Benson, P. Sewell // *Optical and Quantum Electronics*. - 2007. – Vol. 39. - N. 10 - 11. – P. 825 - 836.
5. Frequency conversion and field pattern rotation in WGM resonator with transient inclusion / N. Sakhnenko, A. Nerukh, T. Benson, P. Sewell // *Optical and Quantum Electronics*. – 2007. – Vol. 39. - N. 9. – P. 761 - 771.
6. An assessment of coherent coupling through radiation fields in time varying slab waveguides / E. V. Bekker, A. Vukovic, P. Sewell, T. M. Benson, N. K. Sakhnenko, A. G. Nerukh // *Optical and Quantum Electronics*. – 2007. – Vol. 39. - N. 7. – P. 533 - 551.
7. Whispering gallery mode transformation in a switched micro-cavity with concentric ring geometry / N. Sakhnenko, A. Nerukh, T. Benson, P. Sewell // *Optical and Quantum Electronics*. – 2008. - Vol. 40. - N. 11-12. - P. 813 - 820.
8. Сахненко Н. К. Установление волн шепчущей галереи при возбуждении импульсным источником / Н. К. Сахненко, Е. К. Семенова, А. Г. Нерух // *Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. – техн. сб.* – 2008. – Вып. 155. – С. 262 - 267.
9. Nerukh A. Formation of point source image by time change of the medium / A. Nerukh, N. Sakhnenko // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. - 2009. - V. 15. - N. 5. - P. 1368 - 1373.
10. Nerukh A. Frequency change of partial spherical waves induced by time change of the medium permittivity / A. Nerukh, T. Remayeva, N. Sakhnenko // *Optical and Quantum Electronics*. – 2009. - V. 41. - N. 4. - P. 327 - 335.
11. Сахненко Н. К. Рассеяние плоской волны на цилиндре с меняющейся во времени диэлектрической проницаемостью / Н. К. Сахненко, А. Г. Нерух // *Радиоэлектроника и информатика: научно-технический журнал*. - 2009. - № 1 (44). - С. 23 - 27.
12. Трофименко И. В. Излучений линейного тока вблизи двухслойного цилиндра, составленного из материалов с положительной/отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостями / И. В. Трофименко, Н. К. Сахненко, А. Г. Нерух // *Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. – техн. сб.* – 2009. – Вып. 157. – С. 60 - 66.
13. Стогний Н. П. Моделирование процессов в электромагнитном поле при образовании плазменного шнура / Н. П. Стогний, Н. К. Сахненко, А. Г. Нерух // *Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. – техн. сб.* – 2010. – Вып. 162. – С. 41 - 47.
14. Sakhnenko N. Near-field patterns images of a cylindrical plasma column / N. Sakhnenko, N. Stogniy, A. Nerukh // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2011. - Vol. 39. - N. 11. - P. 2552 - 2553.
15. Стогний Н. П. Плазмонные резонансы в изолированном и паре связанных плазменных цилиндров / Н. П. Стогний, Н. К. Сахненко // *Вестник*

Харьковского национального университета. Радиофизика и электроника. – 2011. – № 983. – Вып. 19. – С. 84 - 90.

16. Modeling of transient dynamics in two-dimensional circular microresonators using the pulsed complex source point beam concept / N. K. Sakhnenko, A. Chipouline, C. Schmidt, A. Nerukh, T. Pertsch // Journal Optical Society of America A. – 2012. – Vol. 29. - N. 10. – P. 2197 – 2203.

17. Sakhnenko N. Rigorous analysis of whispering gallery mode frequency conversion due to time variation of refractive index in a spherical resonator / N. Sakhnenko, A. Nerukh // Journal Optical Society of America A. – 2012. – Vol. 29. - N. 1. – P. 99 - 104.

18. Sakhnenko N. Modeling of frequency conversion in a chain of coupled resonators due to time change in permittivity / Sakhnenko N., Nerukh A. // Scientific and Technical Journal: Radioelectronics and Informatics. – 2012. – V. 1. – P. 4 - 8.

19. Сахненко Н. Моделирование преобразования частоты в фотонных молекулах с меняющимся во времени показателем преломления // научно - технический журнал «Радиоэлектроника и информатика». – 2012. - N. 3 (58). – С. 3 - 7.

20. Sakhnenko N. Complex source point concept in modelling of dynamic control of beam deflection // Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics (Institute of Semiconductor Physics NASU). - 2012. – Vol. 15. - N. 3. – P. 209 - 213.

21. Сахненко Н. Представление решения начально-краевой задачи с цилиндрической симметрией в виде рядов Дебая и Рэлея // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Серія “Радиофізика та електроніка.” - 2012. - № 1010. - Вып. 20. – С. 84 - 90.

22. Сахненко Н. Нестационарный отклик моды круглого волновода на изменение диэлектрической проницаемости в сердцевине // Радиофизика и электроника (ИРЭ НАНУ). - 2012. –Т. 3(17). - № 3. – С. 24 - 29.

23. Сахненко Н. Круговой резонатор с меняющейся по произвольному закону диэлектрической проницаемостью // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. – техн. сб. – 2012. – Вып. 170. – С. 79 - 85.

#### **Список тез доповідей на конференціях:**

24. Transformation of the resonator modes due to abrupt time change in dielectric permittivity / N. Sakhnenko, T. Benson, P. Sewell, A. Nerukh // Proc. International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling (OWTNM – 2005), Grenoble, France. – 8 - 9 April 2005. - P25.

25. Transient inclusions in circular dielectric resonators / N. Sakhnenko, T. Benson, P. Sewell, A. Nerukh // Proc. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON - 2005), Barcelona, Spain. – 3 - 7 July 2005. –Vol. 2. – P. 333 - 336.

26. Microcavities: an inspiration for advanced modelling techniques / T. M. Benson, P. Sewell, S. V. Boriskina, V. Janyani, A. Al-Jarro, A. Vukovic, N. Sakhnenko, E. I. Smotrova, A. I. Nosich, A. G. Nerukh // Proc. International

- Conference on Transparent Optical Networks (ICTON - 2005), Barcelona, Spain. – 3 - 7 July 2005. – Vol. 2. – P. 272 - 275.
27. Effects of the refractive index time variation on 2D circular resonator modes / N. Sakhnenko, T. Benson, P. Sewell, A. Nerukh // Proc. International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2005), Yalta, Ukraine. – 12 - 17 Sept. 2005. – P. 156 - 158.
28. Micro-resonators: simulation and application / T. Benson, S. Boriskina, P. Sewell, A. Vukovic, A. Nosich, V. Janyani, A. Al-Jarro, N. Sakhnenko, E. Smotrova, A. Nerukh // Proc. International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2005), Yalta, Ukraine. – 12 - 17 Sept. 2005. – P. 6 - 11.
29. Nerukh A. Possibility of frequency transformation in time-varying dielectric structures / A. Nerukh, N. Sakhnenko // Proc. International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling (OWTNM – 2006), Varese, Italy. – 20 - 21 Apr. 2006. – P. 67.
30. Sakhnenko N. K. Comparison of frequency transformation in time-varying dielectric plane waveguide and circular resonator / N. K. Sakhnenko, A. G. Nerukh // Proc. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2006), Nottingham, UK. – 18 - 22 June 2006. – P. 233 - 234.
31. Modelling of terahertz driven MQW electroabsorption modulators / E. V. Bekker, A. Vukovic, N. Sakhnenko, P. Sewell, T. Benson // Proc. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2006), Nottingham, UK. – 18 - 22 June 2006. – P. 232 - 233.
32. Semenova E. Establishing of whispering gallery modes in 2D circular resonator excited by transient source / E. Semenova, N. Sakhnenko // Proc. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2006), Nottingham, UK. – 18 - 22 June 2006. – P. 142 - 145.
33. Sakhnenko N. WGM resonator illuminated by temporally switched external source / N. Sakhnenko, A. Nerukh, E. Semenova // Proc. International Conf. On Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET – 2006), Kharkov, Ukraine. – 26 - 29 June 2006. – P. 491 - 493.
34. Sakhnenko N. Control of near-field pattern in 2D circular resonator by adjusting in time of media parameters / N. Sakhnenko, A. Nerukh // Proc. International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling (OWTNM 2007), Copenhagen, Denmark. – 27 - 28 Apr. 2007. – P. 89.
35. Nerukh A. Dual representation of field evolution in dielectric waveguide with time discontinuity / A. Nerukh, N. Sakhnenko // Proc. Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC 2007), Loughborough, UK. – 2 - 3 Apr. 2007. – P. 175 - 180.
36. Sakhnenko N. Electromagnetic field transformation in circular waveguiding and resonant structures with time-varying permittivity / N. Sakhnenko, A. Nerukh // Proc. International Conf. Days on Diffraction 2007 (DD 2007), Saint Petersburg, Russia. – 29 May-1 June 2007. – P. 72.
37. Sakhnenko N. Resonant stratified cylindrical structures with time discontinuity in permittivity / N. Sakhnenko, A. Nerukh // Proc. International Kharkov Symposium

- on Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW – 2007), Kharkov, Ukraine. – 25 - 30 June 2007. – P. 357 - 359.
38. Sakhnenko N. Early time fields in stratified microdisk resonators with time discontinuity in permittivity / N. Sakhnenko, A. Nerukh // Proc. International Conf. On Transparent Optical Networks (ICTON 2007), Rome, Italy. – 1 - 5 July 2007. – P. 149 - 150.
39. Sakhnenko N. Waveguiding and resonant cylindrical structures with time-varying permittivity / N. Sakhnenko, A. Nerukh // Proc. International Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON 2007), Rome, Italy. – 1 - 5 July 2007. – P. 254 - 257.
40. Modeling nonlinear interactions between RF and optical field in traveling wave modulators using a hybrid approach / A. Vukovich, E. Bekker, P. Sewell, T. Benson, J. Paul, N. Sakhnenko, A. Nerukh // 23<sup>rd</sup> Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, Verona, Italy. – 19 - 23 March 2007. – P. 532 - 537.
41. Трофименко И. В. Двумерная задача рассеяния поля точечного источника на круговом двухслойном цилиндре, составленном из материалов с одновременно положительными/отрицательными  $\varepsilon$  и  $\mu$  / И. В. Трофименко, Н. К. Сахненко, А. Г. Нерух // VII Харьковская конференция молодых ученых “Радиофизика и Электроника”, Харьков. – 12-14 дек. - 2007. – С. 113.
42. Трофименко И. В. «Туннельный эффект» в круговом двухслойном цилиндре, составленном из материалов с отрицательными  $\varepsilon$  и  $\mu$  / И. В. Трофименко, Н. К. Сахненко, А. Г. Нерух // Материалы международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков. – 2008. – С. 89.
43. Nerukh A. Alternative calculations of initial value problem for electromagnetic field in dielectric waveguide / A. Nerukh, H. Semenova, N. Sakhnenko // Proc. International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling (OWTNM 2008), Eindhoven, The Netherlands. – 13-14 June 2008. - P. 27.
44. Modelling of 2D transient responses in stratified cylindrical structures / N. Sakhnenko, A. Nerukh, T. Benson, P. Sewell // Proc. International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling (OWTNM 2008), Eindhoven, The Netherlands. – 13 - 14 June 2008. - P. 44.
45. Optical coupling of two microcavities with time discontinuity in permittivity / N. Sakhnenko, A. Nerukh, T. Benson, P. Sewell // Proc. International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2008), Alushta, Crimea, Ukraine. – 2 - 4 October 2008. – P. 86 - 88.
46. Modelling of transients in microcavities with time-varying material properties / N. Sakhnenko, A. Nerukh, T. Benson, P. Sewell // Proc. Int. Conference on Mathematical Method in Electromagnetic Theory (MMET 2008), Odesa, Ukraine. – 29 June – 02 July 2008. – P. 92 - 95.
47. Nerukh A. Two ways for calculation of field evolution in dielectric waveguide: via Brillouin- or eigen-waves / A. Nerukh, H. Semenova, N. Sakhnenko // Proc. Int. Conference on Mathematical Method in Electromagnetic Theory (MMET 2008), Odesa, Ukraine. – 29 June – 2 July 2008. – P. 276 - 278.

48. Optical coupling of two microcavities with time-varying properties / N. Sakhnenko, A. Nerukh, T. Benson, P. Sewell // Proc. International Conf. On Transparent Optical Networks (ICTON 2008), Athens, Greece. – 22 - 26 June 2008. - P. 21 - 22.
49. Nerukh A. Calculation of field evolution in dielectric waveguide by progressive and oscillatory approaches / A. Nerukh, H. Semenova, N. Sakhnenko // Proc. International Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON 2008), Athens, Greece. – 22 - 26 June 2008. - P. 259 - 262.
50. Channeling effect in two-layered cylinder composed from double-negative materials / N. Sakhnenko, I. Trofimenko, E. Semenova, A. Nerukh // Proc. International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling (OWTNM 2009), Jena, Germany. – 17 - 18 Apr. 2009. – P. 33.
51. Sakhnenko N. Cylindrical multilayer dielectric waveguide with time-varying material properties / N. Sakhnenko, A. Nerukh // Proc. International Conf. On Transparent Optical Networks (ICTON 2009), Ponta Delgada, Azores, Portugal. – 28 June - 2 July 2009. – Tu.C1.3.
52. Nerukh A. Scattering of Transformed Frequency on Partial Spherical Waves Induced by Time Change of the Medium / A. Nerukh, N. Sakhnenko, T. Remayeva // Proc. International Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON 2009), Ponta Delgada, Azores, Portugal. – 28 June - 2 July 2009. – Tu.C1.2.
53. Sakhnenko N. Linear chain of coupled resonators with time discontinuity in permittivity / N. Sakhnenko, A. Nerukh // Proc. International Conf. On Transparent Optical Networks (ICTON 2010), Munich, Germany. - 27 June - 1 July 2010. – Tu.A4.5.
54. Sakhnenko N. Frequency shift enhancement in linear chain of coupled resonators with time discontinuity in permittivity / N. Sakhnenko, A. Nerukh // Proc. Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW 2010), Kharkov, Ukraine. – 21 - 26 June 2010. - E15.
55. Stogniy N. Modeling of transients in cylinder with time varying plasma / N. Stogniy, N. Sakhnenko // Proc. Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW 2010), Kharkov, Ukraine. – 21 - 26 June 2010. - Y19.
56. Remayeva T. Y. Evolution of Waves after Plasma Ignition in a Sphere / T. Y. Remayeva, A. G. Nerukh, N. K. Sakhnenko // Proc. International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2010), Sevastopol, Ukraine. – 12 - 14 Sept. 2010. – P. 116 - 118.
57. Nerukh A. Oscillations in plasma sphere after its instant formation / A. Nerukh, T. Remayeva, N. Sakhnenko // Proc. International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling (OWTNM 2010), Cambridge, UK. – 9 - 10 Apr. 2010. – P. 70.
58. Sakhnenko N. Electromagnetic field evolution in a linear chain of coupled resonators with time discontinuity in permittivity / N. Sakhnenko, A. Nerukh // Proc. Int. Conference on Mathematical Method in Electromagnetic Theory (MMET 2010), Kiev, Ukraine. – 6 - 8 Sept. 2010. – NME-2.

59. Nerukh A. Role of boundary in electromagnetic transients caused by medium time-variation / A. Nerukh, N. Sakhnenko, T. Remaeva // Proc. Int. Conference on Mathematical Method in Electromagnetic Theory (MMET 2010), Kiev, Ukraine. – 6 - 8 Sept. 2010. – PL-6.
60. Sakhnenko N. Frequency shift in a single dielectric resonator and in a chain of coupled resonators due to time change in permittivity / N. Sakhnenko, A. Nerukh // Proc. Int. Conf. Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2010), Jokohama, Japan. – 7 - 10 Dec. 2010. – P. 853 - 856.
61. Sakhnenko N. Accurate analysis of transient processes in coupled WGM microcavities with time varying refractive index / N. Sakhnenko, A. Nerukh // The fourth international workshop on theoretical and computational nanophotonics (TACONA 2011), Bad-Honnef, Germany. – 26 - 28 Oct. 2011. - P. 171 - 173.
62. Stogniy N. P. Plane wave scattering on chain of silver nanowires / N. Stogniy, N. Sakhnenko // Proc. International Conference for Young Scientists “Low temperature physics”, Kharkiv, Ukraine. 6 - 10 June 2010. - P. 180.
63. Stogniy N. P. Coupled plasma cylindrical columns as subwavelength antenna / N. P. Stogniy, N. K. Sakhnenko // Proc. Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT 2011), Kyiv, Ukraine. – 20 - 23 Sept. 2011. – P. 103 – 105.
64. Stogniy N. Plasmon resonances in linear array of coupled silver nanowires / N. Stogniy, N. Sakhnenko, A. Nerukh // Proc. International Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON 2011), Stockholm, Sweden. – 26 - 30 June 2011. - We.P.8.
65. Стогний Н. Исследование электромагнитного поля при образовании плазменного шнура / Н. Стогний, Н. Сахненко // Материалы международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков. – 18 – 20 апреля 2011. – Т. 3. - С. 46 - 47.
66. Transient mode beating in disk microresonator at picosecond pulse excitation / N. K. Sakhnenko, A. G. Nerukh, A. Chipouline, C. Schmidt, T. Pertsch // Proc. International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2011), Kharkiv, Ukraine. – 5 – 8 Sept. 2011. – P. 1 - 2.
67. Stogniy N. Theoretical study of plasmon resonances in linear chain of silver nanowires / N. Stogniy, N. Sakhnenko // Proc. International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2011), Kharkiv, Ukraine. – 5 – 8 Sept. 2011. – P. 1 - 2.
68. Sakhnenko N. Hybridization of Plasmons in Coupled Nanowires / N. Sakhnenko, N. Stognii, A. Nerukh // Micro- and nano-photonic materials and devices (MINAP 2012), Trento, Italy. – 16 - 18 Jan. 2012. – P. 69 - 72.
69. Modeling of transient plasmon dynamics in metallic cylinders / N. K. Sakhnenko, N. P. Stognii, A. G. Nerukh, A. Chipouline, T. Pertsch // Proc. Int. Conference on Mathematical Method in Electromagnetic Theory (MMET 2012), Kharkiv, Ukraine. – 28 - 30 August 2012. – P. 35 - 38.
70. Sakhnenko N. K. Time varying cylindrical lens for dynamic control of sub-wavelength field confinement and beam steering // Proc. Int. Conference on Mathematical Method in Electromagnetic Theory (MMET 2012), Kharkiv, Ukraine. – 28 - 30 August 2012. – P. 263 - 266.

71. Stognii N. Bonding and antibonding combinations of plasmons in aggregates of plasma columns / N. Stognii, N. Sakhnenko // Int. workshop on theoretical and computational nanophotonics (TACONA 2012), Bad-Honnef, Germany. – 24 - 26 October 2012. – P. 164 - 166.
72. Stognii N. Spectral characteristics of coupled plasmonic modes in aggregates of plasma columns / N. Stognii, N. Sakhnenko // European Microwave Week (EuMW 2012), European radar conference, Amsterdam, The Netherlands. - 31 Oct. - 2 Nov. 2012. - P. 554 - 556.
73. Stognii N. Theoretical study of symmetric and antysymmetric plasmons in chains of coupled plasma cylinders / N. Stognii, N. Sakhnenko // Proc. European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2012), Prague, Czech. – 26 - 30 March 2012. - P. 999 - 1002.
74. Стогний Н. П. Увеличение добротности плазмонных резонансов в цепочке металлических нанопроводов / Н. П. Стогний, Н. К. Сахненко // Материалы международного форума «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке», Харьков, Украина. – 17 – 19 апреля 2012. – Т. 10. - С. 214 - 215.

## АНОТАЦІЯ

Сахненко Н. К. Нестационарні процеси у відкритих резонансних та хвилеводних структурах. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико - математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Харківський національний університет радіоелектроніки МОН України, Харків, 2013.

У даній роботі вирішена актуальна наукова проблема створення аналітичної теорії нестационарних процесів у відкритих резонансних та хвилевідних структурах. Ця теорія складається з математично строгого підходу до формулювання і розв'язку задач, всебічного аналізу явищ і процесів. Вона гарантує контрольовану точність обчислень та прозорість інтерпретації результатів. Теоретичні дослідження і комп'ютерне моделювання дозволили створити достатньо повну картину фізичних нестационарних явищ в таких структурах та відкрили нові можливості динамічного управління полем.

Були досліджені перехідні і усталені режими у динамічних резонаторах різної геометрії (диск, сфера, дисковий резонатор з концентричним і неконцентричним включеннями, лінійні ланцюжки дискових резонаторів, фотонні молекули), а також у хвилеводах з нестационарною серцевиною.

Були розглянуті різноманітні матеріали: недиспергуючий діелектрик, диспергуючий діелектрик (плазма без поглинання, плазма з поглинанням), а також лівосторонній метаматеріал.

**Ключові слова:** електромагнітне поле, нестационарне середовище, динамічний резонатор, діелектричний хвилевід з нестационарною серцевиною, динамічна лінза, фотонна молекула, нанопроводи, плазмони.



## АННОТАЦИЯ

Сахненко Н. К. Нестационарные процессы в открытых резонансных и волноводных структурах. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники МОН Украины, Харьков, 2013.

В данной работе решена актуальная научная проблема создания аналитической теории описания нестационарных процессов в открытых резонансных и волноводных структурах с простой геометрией, позволяющая рассматривать как зависящие от времени среды, так и иницирующие поля с негармонической зависимостью от времени.

С помощью разработанной теории решен ряд задач для объектов с простой геометрией (слой, цилиндр, сфера). В рамках двумерной модели рассмотрены случаи слоистого кругового резонатора, резонатора с круговым неконцентрическим включением, а также различных структур из связанных резонаторов. В рамках такого подхода могут быть исследованы произвольные слоистые структуры с плоско-параллельными границами, слоистые сферы, сферы с включениями и комбинации сфер.

Продемонстрированы возможности динамического управления полем источника с помощью изменения во времени материала рассеивателя. На примере цилиндрической динамической линзы (диэлектрической и плазменной) показано отклонение направления хода волнового пучка, а также возможности управления фотонным нанофакелом.

Изучен отклик моды шепчущей галереи одиночного тонкого дискового резонатора на изменение свойств материала. Исследована реакция моды на изменение свойств среды во всем резонаторе, а также в некоторой его круговой внутренней области. Исследованы моды шепчущей галереи сферического резонатора с показателем преломления, имеющим вид ступенчатой во времени функции. Систематически изучены преобразования полей и смещения частот.

Изучены моды линейной цепочки связанных диэлектрических резонаторов, исследованы их собственные частоты и добротности. Установлены классы мод шепчущей галереи в цепочке тонких дисков, обладающих наибольшей чувствительностью к изменению свойств материала резонаторов и демонстрирующих наибольший сдвиг частоты при одном и том же значении величины скачка показателя преломления. Показано, что наибольшей чувствительностью к изменению свойств материала обладают моды, поля которых максимально локализованных внутри резонаторов.

Разработанная теория была применена для изучения открытых волноводных структур с нестационарной сердцевиной. Изучены возможности преобразования волноводных направляемых мод в направляемые моды и в моды излучения.

Проведены систематические исследования плазмонных резонансов уединенного металлического провода и цепочки таких проводов. Исследованы

плазмонные резонансы на поверхности цилиндра из левостороннего метаматериала, а также возможности перефокусировки поля и возбуждения субволновых резонансов в метаматериале.

В данной работе впервые для исследования возбуждения структуры внешним нестационарным источником было использовано понятие импульсного комплексного точечного источника. С помощью этой модели продемонстрировано расщепление ультра короткого импульса внутри резонатора, а также эффект биения мод при возбуждении таким нестационарным источником кругового диэлектрического резонатора. Исследовано возбуждение плазмонных волновых пакетов поверхностных плазмонов на границе кругового цилиндра (плазменного и из левостороннего метаматериала).

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, нестационарная среда, динамический резонатор, диэлектрический волновод с нестационарной сердцевиной, динамическая линза, фотонная молекула, нанопровода, плазмоны.

## SUMMARY

Sakhnenko N. K. Transient processes in resonant and waveguiding structures with transparent boundaries. - Manuscript.

Thesis for Doctor of Science degree in Physics and Mathematics with the specialization 01.04.03 Radiophysics. – Kharkiv National University of Radio Electronics Min. of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2013.

New analytical theory for investigation of the transients in both resonant and waveguiding structures with transparent boundaries has been developed. This theory represents mathematically rigorous approach to the formulation and solution of problems, and implies comprehensive analysis of the phenomena. It provides controllable accuracy and allows gaining understanding and insight into the transient processes occurring in the structures. The theoretical studies and computer modeling have opened up new possibilities of dynamic control of the electromagnetic fields.

A variety of geometries have been considered (transient slab, cylinder, sphere, disc resonator with concentric and nonconcentric inclusions, linear chain of disk resonators, photonic molecule). A variety of the materials has been tested: nondispersive dielectric, dispersive dielectric (plasma without damping, damped plasma), metamaterial.

**Keywords:** electromagnetic field, transient medium, dynamic resonator, dielectric waveguide with transient core, dynamic lens, photonic molecule, nanowires, plasmons.