

**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Петровський Михайло Васильович**

УДК 621.385.6

**МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ В ПРОСТОРОВО-РОЗВИНУТИХ  
КВАЗІОПТИЧНИХ РЕЗОНАНСНИХ СТРУКТУРАХ ПРИЛАДІВ  
МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

**Суми – 2007**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті

Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** – доктор фізико-математичних наук, професор  
**Воробйов Геннадій Савелійович**,  
Сумський державний університет,  
декан фізико-технічного факультету.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
член-кореспондент НАН України,  
старший науковий співробітник  
**Мірошниченко Валентин Іванович**,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
заступник директора;

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Фісун Анатолій Іванович**,  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова  
НАН України,  
провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться “ 17 ” жовтня 2007 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 при Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, ауд. 236, корпус ЕТ.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розісланий “ 10 ” вересня 2007 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

А.С. Опанасюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Відкриті резонансні електродинамічні системи набувають широкого застосування в електроніці та техніці міліметрових і субміліметрових (МСМ) хвиль. На їхній основі створені елементна база, генераторні та підсилювальні пристрої даного діапазону хвиль. Подальший розвиток таких пристроїв у цей час вирішується шляхом застосування просторово-розвинутих структур різних модифікацій: зв'язаних відкритих резонаторів (ВР) з періодичними металевими структурами, відкритих хвилеводів (ВХ) з періодичною металевою структурою і діелектричним шаром, а також пристроїв з планарними періодичними металодіелектричними структурами (МДС), на яких можлива реалізація дифракційно-черенковських механізмів збудження хвиль. Використання просторово-розвинутих структур дозволяє поліпшити вихідні параметри приладів і розширити їхні функціональні можливості – збільшити ККД і діапазон електронної перебудови частоти, реалізувати режими посилення потужності і множення частоти, створити селективні пристрої МСМ хвиль. Однак дотепер повністю не вирішені питання оптимізації електродинамічних параметрів паралельно зв'язаних ВР, а також ВР з планарними МДС. Недостатньо також вивчена структура типу металодіелектричний канал (МДК), яка є аналогом генератора дифракційного випромінювання із квазіоптичним виведенням енергії, що становить інтерес з погляду мікромініатюризації приладів дифракційної електроніки. Перспективним є також питання регенеративного підсилення електромагнітних коливань на просторових гармоніках дифракційного випромінювання, збуджуваних у режимі резонансного (нормального) випромінювання у ВХ, що до цього часу не досліджено.

Із вищезазначеного випливає актуальність питання системного теоретичного та експериментального дослідження просторово-розвинутих квазіоптичних резонансних електродинамічних систем з періодичними металевими і металодіелектричними структурами.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана в науково-дослідній лабораторії “Нові технології у фізиці та техніці НВЧ” кафедри фізичної електроніки Сумського державного університету. Тематика роботи відповідає науковим програмам Міністерства освіти і науки України з фундаментальних досліджень. Основні результати роботи увійшли до звітів з держбюджетних тем “Радіаційні ефекти в нерелятивістській електроніці міліметрового діапазону хвиль” № 0100U003218 (2000 – 2002 рр.); “Хвильові процеси у відкритих електродинамічних системах при русі нерелятивістських електронів уздовж періодичних металодіелектричних структур” № 0103U000776 (2003 – 2005 рр.), а також у проміжний звіт держбюджетної теми “Фізика хвильових процесів у відкритих хвилеводно-резонаторних

металодіелектричних системах з розподіленими джерелами випромінювання” № 0106U001931 (2006 – 2008 pp.).

**Мета і задачі дослідження.** Мета цього дослідження – встановлення загальних фізичних закономірностей хвильових процесів у просторово-розвинутих квазіоптичних резонансних структурах, виробленню на цій основі практичних рекомендацій з реалізації нових модифікацій генераторів електромагнітних коливань і елементної бази різних пристроїв МСМ діапазону хвиль.

Відповідно до цього в роботі вирішувалися такі наукові задачі:

- розвиток теорії та чисельний аналіз енергетичних характеристик просторових гармонік дифракційно-черенковського випромінювання в металодіелектричному каналі із стрічковою дифракційною ґраткою та діелектричним шаром кінцевої товщини;
- чисельний аналіз взаємодії електронного потоку (ЕП) з полем електродинамічної системи плоскопаралельного відкритого хвилеводу з металодіелектричним шаром у режимі резонансного випромінювання дифрагованого поля;
- розвиток методики експериментального моделювання хвильових процесів у просторово-розвинутих квазіоптичних резонансних структурах приладів міліметрового діапазону для конкретних об'єктів шляхом заміни електронного потоку розподіленим джерелом випромінювання типу діелектричний хвилевід;
- експериментальне моделювання хвильових процесів у зв'язаних відкритих резонаторах і відкритих резонаторах з металодіелектричними включеннями при зміні їх геометричних і електродинамічних параметрів.

*Об'єкт дослідження* – хвильові процеси у просторово-розвинутих квазіоптичних резонансних структурах приладів міліметрового діапазону.

*Предмет дослідження* – енергетичні, просторові, спектральні і резонансні характеристики електромагнітних хвиль для заданого класу досліджуваних електродинамічних структур при зміні в широкому інтервалі значень їх параметрів.

Відповідно до поставлених задач використовувалися такі *методи досліджень*:

– теоретичні:

метод заданого струму; векторна теорія відкритих резонаторів; самоузгоджений метод розв'язування задач електроніки; чисельний ітераційний метод Ньютона;

– експериментальні:

метод моделювання хвилі струму просторового заряду електронного потоку поверхневою хвилею діелектричного хвилеводу; метод рухомої антени та зонда; класичні методи вимірювання амплітудних і частотних характеристик електромагнітних полів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі розвинуті і систематизовані методи дослідження хвильових процесів у просторово-розвинутих квазіоптичних

резонансних структурах приладів міліметрового діапазону хвиль. Такі електродинамічні системи є основою при створенні генераторів, підсилювачів і елементної бази нових модифікацій пристроїв МСМ діапазону хвиль із поліпшеними вихідними характеристиками.

У роботі отримані такі нові результати:

– вперше у наближенні заданого струму отримані співвідношення для щільності енергії дифракційного і черенковського випромінювань у резонансній періодичній металодіелектричній структурі кінцевої товщини; проведено чисельний аналіз гармонік випромінювання залежно від товщини діелектричного шару, відстані до металевих екранів та електродинамічних параметрів стрічкової дифракційної ґратки в інтервалі значень діелектричної проникності  $\varepsilon = 2 - 25$  та відносної швидкості електронного потоку  $\beta = 0,1 - 0,8$ ;

– у рамках лінійної самоузгодженої теорії вперше проведений аналіз дисперсійного рівняння для граничного випадку резонансного збудження електронним потоком відкритого хвилеводу з металодіелектричним шаром; визначено оптимальні значення електродинамічних параметрів системи для області регенеративного підсилення об'ємних хвиль і встановлена можливість збільшення інкремента наростання коливань у 35 разів у порівнянні з нерезонансним збудженням системи;

– щодо різних модифікацій просторово-розвинутих квазіоптичних структур: зв'язаних відкритих резонаторів з періодичними металевими структурами, відкритих резонаторів з планарними періодичними металодіелектричними структурами, у діапазоні частот  $f = 69 - 80$  ГГц розвинутий і реалізований метод експериментального моделювання хвилі струму просторового заряду електронного потоку поверхневою хвилею планарного діелектричного хвилеводу;

– вперше шляхом проведення і узагальнення експериментальних досліджень хвильових процесів у відкритих резонаторах із просторово-розвинутими структурами різних модифікацій встановлена можливість управління вихідними характеристиками таких систем: істотного збільшення смуги частот коливань у зв'язаних відкритих резонаторах, селекції типів коливань у резонаторах з періодичними металодіелектричними структурами, можливості виділення режимів аномального дифракційного та черенковського випромінювань.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати теорії, що ґрунтується на наближенні заданого струму, і експериментальних досліджень хвильових процесів у ВР із МДС служать основою для побудови самоузгодженої теорії і дозволяють встановити загальні фізичні закономірності збудження просторових гармонік дифракційно-черенковського випромінювання в обмежених МДС, а також дати практичні рекомендації з оптимізації вихідних параметрів однозв'язних і багатозв'язних електродинамічних систем з періодичними металевими та металодіелектричними структурами. На базі таких структур можуть бути реалізовані черенковські та дифракційно-черенковські генератори, а також селективні пристрої МСМ хвиль. У цей час

результати дисертаційної роботи використовуються при викладанні спеціальних курсів для студентів за спеціальністю “Фізична та біомедична електроніка” у Сумському державному університеті, а також були використані при виконанні госпдоговірних тем № 0106U001025 (2005 р.) та № 0106U001026 (2005 р.) з ІПФ НАН України.

**Особистий внесок здобувача.** У роботах, виконаних у співавторстві, автор брав участь у поставленні задач, теоретичних і експериментальних дослідженнях, обговоренні результатів і написанні статей. Особисто автору належать такі наукові результати.

1. У роботах [1, 4, 5] проведений чисельний аналіз впливу геометричних і електродинамічних параметрів відкритого хвилеводу з діелектричним шаром на умови збудження коливань у резонансному режимі. При безпосередній участі автора створена установка і розроблена методика експериментального моделювання хвильових процесів у відкритому хвилеводі з металодіелектричною структурою, а також досліджені просторові та амплітудні характеристики електромагнітних коливань. Особисто автором у статті [1] підготовлено розділ 2, у статті [4] підготовлено розділ 3, у статті [5] підготовлено розділ 2.

2. У роботі [2] проведені експериментальні дослідження спектральних і резонансних характеристик відкритих резонаторів з планарними металодіелектричними структурами різних модифікацій. Проаналізовано вплив діелектричних і металодіелектричних неоднорідностей на добротність і селективні властивості таких систем. Дано рекомендації з використання металодіелектричних структур у практичних пристроях типу ЛЗХ і дифракційно-черенковських генераторах. Стаття підготовлена особисто автором.

3. У роботі [3] отримані співвідношення для щільності енергії просторових гармонік дифракційно-черенковського випромінювання в металодіелектричному каналі з діелектричною структурою кінцевої товщини, розроблений алгоритм обчислювальних програм, проведений чисельний аналіз кутів та інтенсивностей гармонік випромінювання. Особисто автором у статті підготовлений розділ 3.

4. В оглядах [6, 7] автором проведений аналіз літературних джерел, а також систематизовані результати теоретичних і експериментальних досліджень квазіоптичних резонансних структур різних модифікацій, на підставі чого побудована структурна схема їхнього розвитку та застосування. Особисто автором у статті [6] підготовлено розділ 2, статтю [7] підготовлено особисто.

5. У роботі [8] розроблені алгоритми обчислювальних програм і проведений чисельний аналіз спектральних характеристик і топології полів відкритих резонаторів. Проведено порівняння теоретичних даних з експериментальними. Стаття підготовлена особисто автором.

6. У роботах [9–19] проведені чисельні та експериментальні дослідження електродинамічних характеристик відкритих резонаторів з планарними металодіелектричними

структурами та відкритих хвилеводів з металодіелектричним шаром. Особисто автором підготовлені роботи [9, 13–18].

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на 12–16-й Міжнародних конференціях „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь, 2002 – 2006 рр.); 6-му Міжнародному форумі „Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке” (Харків, 2002 р.); Міжнародних конференціях молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики „ЕВРИКА” (Львів, 2002 –2004, 2006 рр.); The Fifth International Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter, and submillimeter waves „MSMW 2004” (Харків, 2004 р.); „Харьковской нанотехнологической Ассамблее-2007” (Харків, 2007 р.); Конференції молодих учених та аспірантів „ІЕФ-2007” (Ужгород, 2007 р.); щорічних Науково-технічних конференціях співробітників, викладачів і студентів СумДУ (Суми, 2002 – 2007 рр.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані у 24 наукових працях, у тому числі у 8 статтях спеціалізованих журналів, що входять до переліку ВАК України, і в 16 тезах доповідей і працях міжнародних наукових конференцій, 11 із них перелічені в списку опублікованих праць.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи – 154 стор., 55 рисунків, 1 таблиця. Список використаних джерел нараховує 122 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладається актуальність теми і обґрунтовується необхідність виконання дисертаційної роботи, сформульовані мета і основні задачі досліджень, визначені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами і темами, наведені відомості з апробації результатів роботи, основних публікацій, а також щодо структури дисертації.

У **першому розділі** проаналізований сучасний рівень розвитку квазіоптичних відкритих резонансних систем, які застосовуються в електроніці та техніці МСМ діапазонів хвиль. Представлено структурну схему класифікації таких систем, що визначає місце дисертаційної роботи з даного напрямку досліджень (рис. 1). Показано, що як базові

Рис. 1. Схема класифікації різних модифікацій резонансних квазіоптичних структур приладів МСМ хвиль

резонансні системи функціональних пристроїв і приладів цього діапазону довжин хвиль можуть ефективно застосовуватися сфероїдальні, напівсферичні та кутові ВР. Значне поширення як резонансна система електровакуумних пристроїв джерел коливань одержали напівсферичні ВР із плоским дзеркалом, що містить відбивну дифракційну ґратку (ДГ). На основі таких систем створені багатофункціональні високоефективні прилади типу оротрон і генератор дифракційного випромінювання, які в порівнянні із класичними – ЛЗХ, ЛБХ, магнетрон – мають покращені вихідні характеристики. Показано, що подальше покращання вихідних характеристик таких приладів ґрунтується на використанні просторово-розвинутих структур, на яких можлива реалізація дифракційного та дифракційно-черенковського механізмів збудження коливань: відкриті резонатори із МДС, зв'язані ВР і відкриті хвилеводи з металодіелектричним шаром. Такі структури можуть бути використані при побудові електродинамічних систем нерелятивістських генераторів, елементної бази і функціональних вузлів апаратури МСМ хвиль. Намічено шляхи вирішення поставлених задач, основні з досліджуваних об'єктів зображені на рис. 2: а – металодіелектричний канал; б – відкритий хвилевід з металодіелектричним шаром; в – відкритий резонатор із МДС; г – зв'язані через стрічкові дифракційні ґратки відкриті резонатори; д – зв'язані через відбивні дифракційні ґратки відкриті резонатори.

Рис. 2. Схеми досліджуваних резонансних квазіоптичних систем: 1 – розподілене джерело випромінювання; 2 – відбивна дифракційна ґратка; 3 – діелектричний шар; 4 – металеве дзеркало; 5 – стрічкова дифракційна ґратка

У **другому розділі** розглянуті теоретичні і експериментальні методи досліджень, які використовуються для вирішення поставлених у роботі задач: наближення заданого струму, самоузгоджений метод задач електроніки, векторна теорія ВР, метод експериментального моделювання. Для системи типу МДК (рис. 2а) розв'язання задачі методом заданого струму дозволяє визначити вплив електродинамічних параметрів на основні характеристики дифракційно-черенковського і аномального дифракційного випромінювань: умови випромінювання, щільність енергії гармонік випромінювання, їх спектральний склад. При розв'язанні задачі в самоузгодженому поставленні для ВХ з металодіелектричним шаром (рис. 2б) знаходяться умови резонансного збудження об'ємних хвиль дифракційного випромінювання. Векторна теорія сфероїдального ВР з неоднорідністю у вигляді діелектричної пластини дозволяє визначити частоти типів коливань резонатора при зміні параметрів діелектричного шару і геометрії резонатора. Дано обґрунтування доцільності використання методу експериментального моделювання при вивченні електродинамічних характеристик складних об'єктів (рис. 2в-д), для яких до цього часу не побудована теорія. Даний метод дозволяє встановити особливості хвильових

процесів у різних модифікаціях випромінюючих періодичних структур, а також визначити особливості електродинамічних властивостей резонансних квазіоптичних систем за наявності в їхньому об'ємі періодичних металевих і металодіелектричних неоднорідностей. Розвинена методика експериментального моделювання для конкретних об'єктів і створені експериментальні установки, що дозволяють досліджувати у міліметровому діапазоні хвиль просторові і амплітудні розподіли полів, а також резонансні і хвилеводні характеристики ВР і їх елементів.

У **третьому розділі** наведені результати теоретичного аналізу та експериментальних досліджень базових ВР: сфероїдальних і напівсферичних резонаторів без неоднорідностей, а також ВР з однорідним діелектричним шаром. Застосування векторної теорії дозволило розрахувати спектри резонансних частот сфероїдального та напівсферичного ВР з однорідними дзеркалами для основного  $\mathcal{L}$  типу коливання (у загальному випадку для ВР можливе збудження  $TEM_{mnp}$  коливань, де індекси  $m, n$  визначають число варіацій поля по поперечних координатах, а  $q$  – по поздовжній координаті). Їхнє порівняння свідчить про ідентичність властивостей таких резонаторів за умови, що відстань між дзеркалами сфероїдального ВР відповідає подвоєній відстані між дзеркалами напівсферичного ВР. Дослідження радіусів каустик полів сфероїдального ВР із заданою в експерименті геометрією дзеркал дозволило визначити оптимальні відстані між дзеркалами з погляду мінімальних втрат на випромінювання. Експериментальні дослідження спектральних і резонансних характеристик базових ВР показали, що у таких системах переважними є  $\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{\pi_0} \int_0^{\pi} \sin^2 \theta \sin^2 \phi d\theta$  коливання. Проведено порівняння теоретичних і експериментальних спектрів резонансних частот, що свідчить про кореляцію результатів теорії з експериментом.

Теоретичний аналіз властивостей ВР з неоднорідністю у вигляді діелектричної призми (ДП) будується також на основі векторної теорії сфероїдального ВР. Трансцендентні рівняння враховують вплив геометричних параметрів резонатора, а також діелектричного шару, внесеного в його об'єм, на електродинамічні характеристики коливальної системи для випадків симетричних і асиметричних  $\mathcal{K} \in$  типів коливань. Їхній аналіз показує, що збільшення товщини ДП  $\delta L_{1,2}$  і діелектричної проникності призми  $\epsilon$  приводить до зростання величини зсуву резонансної частоти коливань, що залежить від індексу  $q$ . При цьому найбільший вплив параметрів  $\Delta$  і  $\epsilon$  на величину зсуву резонансної частоти спостерігається при збігові площин діелектрика з максимальними значеннями напруженості електричного поля стоячої хвилі в ВР, що підтверджується експериментальними дослідженнями спектральних і резонансних характеристик базових ВР з неоднорідністю у вигляді ДП.

У **четвертому розділі** для моделі планарної відкритої електродинамічної системи типу МДК (рис. 2а) у наближенні заданого струму отримані співвідношення для щільності енергії гармонік дифракційного та черенковського випромінювань за наявності металодіелектричної структури

кінцевої товщини.

У результаті чисельного розв'язку задачі визначені щільності енергії просторових гармонік дифракційного та черенковського випромінювань у діелектричне середовище та вільний простір. Установлено, що для визначених параметрів МДС і ЕП можлива наявність аномального дифракційного випромінювання (АДВ), що подібно до черенковського випромінювання збуджується тільки в діелектрику і не спостерігається у вільному просторі. Установлено, що в планарних МДС щільність енергії випромінюваних гармонік залежить від товщини діелектричного шару, що необхідно враховувати при практичній реалізації таких пристроїв. Для режимів, реалізованих в експерименті, на підставі залежностей відносної щільності енергії дифракційного випромінювання від коефіцієнта заповнення стрічкової ДГ визначені оптимальні параметри моделювання АДВ. Дослідження режимів дифракційно-черенковського випромінювання в інтервалі значень  $\Delta/\lambda = 0,6-0,9$  і  $\varepsilon = 2-10$  дозволило встановити можливість ефективного управління інтенсивністю випромінюваних гармонік шляхом зміни товщини діелектричного шару і величини  $\varepsilon$ . Зі зміною відстані до відбиваючого екрана можливе регулювання рівнів інтенсивності гармонік дифракційно-черенковського випромінювання різними каналами трансформації об'ємних хвиль у МДК.

Для системи ВХ з діелектричним шаром у режимі резонансного збудження коливань, що є аналогом плоскопаралельного резонатора, ітераційним методом Ньютона проаналізоване дисперсійне рівняння такого вигляду:

$$\frac{\operatorname{ctg}(\pi\kappa\gamma)}{\kappa\theta} = \frac{1}{\sqrt{(\mu+1)^2 - \kappa^2}} \left( \frac{\Gamma_1(1+\Gamma_1FG)}{\Gamma_1F+G} - 1 \right) - \left( 2 \ln \left( \sin \left( \frac{\pi\theta}{2} \right) \right) + \frac{\varepsilon \operatorname{ctg} \left( \pi\chi\sqrt{\varepsilon\kappa^2 - \mu^2} \right)}{\sqrt{\varepsilon\kappa^2 - \mu^2}} \right),$$

де  $\kappa = 2l/\lambda$ ;  $2l$  – період ДГ;  $\lambda$  – довжина хвилі;  $\gamma = h/l$ ;  $h$  – глибина щілин ДГ;  $\theta = d/l$ ;  $2d$  – ширина щілин ДГ;  $\Gamma_1$  – ефективна діелектрична проникність ЕП;  $G = \operatorname{th} \left( \pi\zeta\Gamma_1\sqrt{(\mu+1)^2 - \kappa^2} \right)$ ;

$F = \frac{\sqrt{\varepsilon\kappa^2 - (\mu+1)^2}}{\varepsilon\sqrt{\kappa^2 - (\mu+1)^2}}$ ;  $\zeta = r/l$ ;  $r$  – товщина ЕП;  $\chi = H/l$ ;  $H$  – відстань між ДГ і металевим

екраном;  $\mu$  – коефіцієнт поширення.

Шляхом розв'язання цього рівняння у вигляді залежностей дійсних і уявних складових коефіцієнта розповсюдження  $\mu$  від відносної швидкості електронного потоку  $H$  (відповідно  $\operatorname{Re} \mu$  та  $\operatorname{Im} \mu$ ) у режимі випромінювання об'ємних хвиль по нормалі установлена можливість існування чотирьох хвиль. При цьому дві хвилі є об'ємними хвилями періодичної структури, а дві інші

являють собою повільну і швидку хвилі просторового заряду. Аналіз даних розв'язків показує, що вони характеризуються значним збільшенням інкремента наростання в порівнянні з випромінюванням під кутом, що обумовлено максимальним перетворенням енергії ЕП у дифракційне випромінювання.

Установлено, що зі збільшенням відносної діелектричної проникності відбувається зменшення інтервалів збудження коливань за параметром  $\beta$  за рахунок зміни умов синхронізму при взаємодії ЕП з полем ВХ при введенні діелектричного шару. Зміна відносної відстані до екрана  $\chi$  впливає на значення інкремента наростання хвиль, що поширюються у ВХ. Зокрема, на рис. 3 наведена залежність  $|\text{Im } \mu|$  від параметра  $\chi$  для двох значень  $\varepsilon$  діелектричного шару. Із графіків випливає, що збільшення значення  $\varepsilon$  приводить до підвищення ефективності взаємодії ЕП із хвилями, що поширюються у ВХ.

Рис. 3. Залежність інкремента наростання хвилі від відносної відстані між дзеркалами ВХ:  
———  $\varepsilon = 1$ ; .....  $\varepsilon = 4$ ; ( $\kappa = 0,0728$ ;  $\beta = 0,0732$ ;  $\zeta = 0,01$ )

У **п'ятому розділі** наведені результати експериментального моделювання хвильових процесів у багатозв'язних відкритих електродинамічних системах: ВР з періодичними металевими та металодіелектричними неоднорідностями різних модифікацій (рис. 2в-д).

Показано, що в найпростішому випадку введення одиночної стрічкової ґратки у ВР приводить до утворення зв'язаної системи, що встановлено шляхом порівняння її резонансних характеристик з аналогічними характеристиками напівсферичного ВР при локальному збудженні систем через щілину зв'язку одного із дзеркал. Резонансні характеристики сфероїдального ВР з подвійною стрічковою ДГ (рис. 2г) при збудженні через локальну щілину зв'язку свідчать про можливість ефективного управління спектром коливань і збільшення смуги пропускання в порівнянні з базовим резонатором в 6 разів. У випадку збудження ВР з подвійною стрічковою ДГ розподіленім джерелом випромінювання смуга пропускання збільшується в 30 разів, що, зокрема, проілюстровано на рис. 4. Використання збуджуючого елемента у вигляді подвійної відбивної ДГ (рис. 2д) дозволяє підвищити в кілька разів амплітуду коливань у резонаторі та збільшити смугу пропускання в 10 разів у порівнянні з напівсферичним ВР, у якого плоске дзеркало виконане у вигляді відбивної ДГ, що проілюстровано на рис. 4.

Рис. 4. Резонансні характеристики: 1 – базовий сфероїдальний ВР; 2 – сфероїдальний ВР з подвійною стрічковою ДГ; 3 – сфероїдальний ВР з подвійною відбивною ДГ

Для планарних МДС показана можливість реалізації АДВ, яке перспективне з погляду мініатюризації приладів МСМ діапазонів хвиль.

Установлено, що введення у ВР МДС з параметрами, відповідними режиму збудження дифракційно-черенковського випромінювання, приводить до утворення багатозв'язної системи, що має якісно нові електродинамічні властивості у порівнянні з ВР без МДС: при зміні товщини діелектрика можлива реалізація режимів загасання енергії у ВР, збільшення амплітуди коливань і їхньої добротності, селекції коливань. Зокрема, з рис. 5 видно, що для МДС із  $\Delta \approx \lambda/4$

Рис. 5. Спектральні характеристики ВР з МДС: а –  $f = 77$  ГГц; б –  $f = 72$  ГГц; 1 – напівсферичний ВР з відбивною ДГ; 2 –  $\Delta \approx \lambda/4$ ; 3 –  $\Delta \approx \lambda$ ; 4 –  $\Delta \approx 4\lambda$

і  $\Delta \approx 4\lambda$  амплітуда коливань ВР відповідно в 3 і 6 разів менша, ніж у резонаторі без МДС. Для призм товщиною  $\Delta \approx \lambda$  спектр коливань ВР із МДС якісно корелює зі спектром коливань базового ВР з одночасним розрідженням спектру. Зі зменшенням частоти властивості ВР із МДС товщиною  $\Delta \approx 4\lambda$  в основному зберігаються. Для ДП товщиною  $\Delta \approx \lambda/4$  і  $\Delta \approx \lambda$  спостерігається збільшення амплітуди коливань в 2 рази з одночасною селекцією збуджуваних типів коливань у порівнянні з базовим напівсферичним резонатором. Дослідження резонансних характеристик (залежності амплітуди коливань від частоти) для призм різної товщини підтверджує описані вище властивості ВР із МДС: можливість селекції коливань, підвищення добротності основних коливань, а також пригнічення коливань на бокових частотах.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження у цілому свідчать про перспективність застосування металодіелектричних структур при реалізації нових модифікацій пристроїв типу ЛЗХ та дифракційно-черенковських генераторів. Теоретичні оцінки електродинамічних параметрів генераторів показують, що такі пристрої можуть бути виконані на основі існуючих технологій виробництва електровакуумних пристроїв МСМ діапазону хвиль.

## ВИСНОВКИ

1. Побудовано схему класифікації резонансних квазіоптичних структур приладів МСМ хвиль, на підставі якої визначені основні об'єкти, досліджувані в роботі: відкриті резонатори із МДС, зв'язані відкриті резонатори, відкриті хвилеводи з металодіелектричним шаром; обґрунтовано вибір теоретичних і експериментальних методів досліджень, що ґрунтуються на розв'язку класичних рівнянь електродинаміки і електроніки, а також експериментального моделювання хвильових процесів; у діапазоні частот  $f = 53-80$  ГГц розроблені та створені

експериментальні установки, що враховують специфіку досліджень приладів із просторово-розвинутими структурами.

2. На підставі векторної теорії ВР і експериментальних досліджень вивчені особливості електродинамічних характеристик сфероїдального та напівсферичного ВР для конкретної геометрії дзеркал і наявності ДП різної товщини; встановлено, що при значеннях товщини призми із фторопласту і полікору  $\Delta = \lambda/4 - 4\lambda$  величина зсуву резонансної частоти коливань ВР для діапазону частот  $f = 69 - 80$  ГГц відповідає значенням  $\Delta f = 2 - 25$  ГГц.

3. У наближенні заданого струму для моделі планарної електродинамічної системи типу металодіелектричний канал проведений чисельний аналіз інтенсивності дифракційно-черенковських гармонік, випромінюваних у діелектричне середовище та вільний простір при кінцевій товщині діелектричного шару залежно від основних електродинамічних параметрів системи та ЕП; встановлено, що переважною в досліджуваній системі є основна – черенковська гармоніка  $S_{0\varepsilon}$ , однак при зміні електродинамічних параметрів системи і ЕП можливе збільшення інтенсивності вищих гармонік випромінювання до рівня  $S_{0\varepsilon}$ .

4. Чисельно проаналізовані особливості збудження аномального дифракційного випромінювання і проведений порівняльний аналіз його властивостей із черенковським і дифракційно-черенковським випромінюваннями при зміні параметрів електродинамічної системи і електронного потоку; встановлено, що при зміні параметрів МДС інтенсивність гармонік аномального дифракційного випромінювання може перевищувати інтенсивність мінус першої дифракційної гармоніки, випромінюваної в діелектрик; показано перспективність використання даного виду випромінювання в практичних пристроях електроніки НВЧ, виготовлених за планарною технологією.

5. Проведено чисельний аналіз електронно-хвильових процесів у режимі резонансного збудження коливань для системи ВХ з металодіелектричним шаром; встановлено, що шляхом відповідного підбору параметрів ВХ: відносної діелектричної проникності, товщини металодіелектричного шару, параметрів електронного потоку можливе збільшення інкремента наростання коливань у 35 разів в порівнянні з ВХ у режимі нерезонансного збудження коливань.

6. Експериментально показана можливість значного збільшення смуги пропускання зв'язаних через стрічкові дифракційні ґратки ВР у порівнянні з класичними резонаторами МСМ хвиль; встановлено, що при зв'язку через подвійну періодичну ДГ смуга пропускання в гігагерцовому діапазоні частот може досягати значень  $\Delta f = 2,4$  ГГц, що приблизно в 30 разів більше, ніж у сфероїдальному ВР без подвійної стрічкової ДГ.

7. Шляхом експериментального моделювання хвильових процесів у ВР з періодичними планарними металодіелектричними структурами при зміні їхніх електродинамічних параметрів

показана можливість реалізації режимів селекції різних типів коливань за частотою і амплітудою: при збереженні рівня амплітуди основного типу коливань можливе пригнічення вищих типів коливань від 10 до 20 разів.

8. Експериментально та теоретично показана можливість ефективної реалізації різних каналів трансформації електромагнітних хвиль на періодичних металодіелектричних структурах, на цій основі запропоновані схеми нерелятивістських дифракційно-черенковських і черенковських генераторів, які можуть бути реалізовані на основі існуючих технологій виробництва електровакуумних пристроїв МСМ діапазонів хвиль.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Vorobyov G.S., Krivets A.S., **Petrovsky M.V.**, Tsvyk A.I., Shmatko A.A. The Smith-Purcell effect amplification of the electromagnetic waves in an open waveguide with a metal-dielectric layer // Telecommunications and radio engineering. – 2003. – №59(10,11, and 12). – P. 80 – 92.
2. Воробьев Г.С., **Петровский М.В.**, Кривец А.С. О возможности применения квазиоптических открытых резонансных металлодиэлектрических структур в электронике КВЧ // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – Т.49, №7. – С. 56 – 61.
3. Воробьев Г.С., **Петровский М.В.**, Цвык А.И., Хуторян Э.М., Цвык Л.И. Аномальное дифракционное излучение в планарной резонансной структуре с металлодиэлектрической решеткой // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2005. – №4(76). – С. 159 – 173.
4. Кривець О.С., **Петровський М.В.** Електронно-хвильовий механізм підсилення коливань у відкритому хвилеводі з метало-діелектричним шаром // Вісник ЛНУ ім. Івана Франка. – 2004. – №37. – С. 123 – 131.
5. Воробьев Г.С., Кривец А.С., **Петровский М.В.**, Рубан А.И. Экспериментальное моделирование волновых процессов в усилителе на эффекте Смита-Парселла // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2002. – №5(38)-6(39). – С. 117 – 124.
6. Воробьев Г.С., Кривец А.С., **Петровский М.В.**, Рубан А.И., Цвык А.И. Моделирование черенковского и дифракционного излучений на периодических металлодиэлектрических структурах (обзор) // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2003. – №10(56). – С. 110 – 130.
7. Воробьев Г.С., **Петровский М.В.**, Журба В.О. Резонансные квазиоптические структуры в технике и электронике КВЧ (обзор) // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2006. – № 6(90). – С. 5 – 21.

8. Воробьев Г.С., **Петровский М.В.**, Крутько Ю.А., Зленко В.А., Шульга Ю.В. О применимости векторной теории сфероидальных открытых резонаторов при анализе экспериментальных исследований их резонансных и спектральных характеристик // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2007. – № 1. – С. 95 – 102.
9. Vorobjov G.S., **Petrovsky M.V.**, Tsvyk A.I. Features of spectral characteristics of open resonance electrodynamic systems with periodic metal-dielectric structures // The fifth international Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter, and submillimeter waves. – Kharkov: IRE NAS of Ukraine, 2004. – P. 576 – 578.
10. Воробьев Г.С., **Петровский М.В.**, Журба В.О., Цвык А.И., Цвык Л.И. О возможности применения планарных резонансных периодических структур при микроминиатюризации устройств электроники СВЧ // Харьковская нанотехнологическая Ассамблея-2007. – Харьков: ННЦ “ХФТИ”, 2007. – Т. 2. – С. 133 – 137.
11. Воробьев Г.С., Кривец А.С., **Петровский М.В.**, Шматько А.А. Волновые процессы в открытом волноводе с металлодиэлектрическим слоем // 12-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. – Севастополь: Вебер, 2002. – С. 221 – 222.
12. Воробьев Г.С., Кривец А.С., **Петровский М.В.**, Победин А.Ю. Исследование условий возбуждения электромагнитных колебаний в открытом волноводе с металло-диэлектрическим слоем // Сборник научных трудов 6-го Международного молодежного форума “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке”. – Харьков: ХНУРЕ, 2002. – Ч.1. – С. 86 – 87.
13. Воробьев Г.С., **Петровский М.В.**, Рубан А.И. Экспериментальное моделирование условий возбуждения колебаний в открытом резонаторе с металлодиэлектрической структурой // 13-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. – Севастополь: Вебер, 2003. – С. 286 – 287.
14. **Петровський М.**, Победин О. Експериментальні дослідження відкритих резонаторів з металодіелектричними структурами // Всеукраїнська конференція молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “ЕВРИКА 2003”. – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. – С. 109.
15. **Петровський М.** Хвильові характеристики відкритих квазіоптичних систем з металодіелектричними структурами // Міжнародна конференція молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “ЕВРИКА 2004”. – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2004. – С. 213 – 214.
16. Воробьев Г.С., **Петровский М.В.**, Кривец А.С., Цвык А.И. О возможности применения периодических металлодиэлектрических структур в электронике СВЧ // 14-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. – Севастополь: Вебер, 2004. – С. 211 – 212.
17. Воробьев Г.С., **Петровский М.В.**, Журба В.О., Крутько Ю.А. Перспективы использования пространственно-развитых резонансных структур в дифракционной электронике // 15-я

Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. – Севастополь: Вебер, 2005. – С. 265 – 266.

18. Воробьев Г.С., **Петровский М.В.**, Журба В.О. Особенности резонансных квазиоптических структур в технике и электронике КВЧ // 16-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. – Севастополь: Вебер, 2006. – С. 276 – 277.

19. **Петровский М.В.**, Журба В.О. Автоматизация измерений пространственных и волноводных характеристик электродинамических систем устройств дифракционной электроники // Конференція молодих учених та аспірантів “ІЕФ-2007”. – Ужгород: ІЕФ НАН України, 2007. – С. 124.

## АНОТАЦІЯ

**Петровський М.В. Моделювання хвильових процесів в просторово-розвинутих квазіоптичних резонансних структурах приладів міліметрового діапазону. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2007.

Дисертація присвячена теоретичному і експериментальному дослідженню електродинамічних характеристик квазіоптичних резонансних систем із просторово-розвинутими металевими та металодіелектричними структурами.

Вивчено особливості електродинамічних характеристик сфероїдального та напівсферичного відкритих резонаторів з однорідними дзеркалами за наявності в їх об'ємі діелектричного шару для конкретної геометрії дзеркал і заданого діапазону частот. У наближенні заданого струму для моделі планарної електродинамічної системи типу металодіелектричний канал отримані співвідношення і проведений чисельний аналіз щільності енергії дифракційно-черенковських гармонік, випромінюваних у діелектричне середовище і вільний простір. Вивчено електронно-хвильові процеси в режимі резонансного збудження коливальних для електродинамічної системи відкритого хвилеводу з металодіелектричним шаром.

Методом експериментального моделювання досліджені відкриті резонатори з подвійною стрічковою та подвійною відбивною дифракційною ґратками. Промодельовані хвильові процеси у відкритих резонаторах з металодіелектричними структурами. Показано можливість реалізації нерелятивістських генераторів міліметрового діапазону хвиль із застосуванням металодіелектричних структур.

**Ключові слова:** відкритий резонатор, відкритий хвилевод, діелектричний хвилевод, дифракційна ґратка, дифракційне випромінювання, черенковське випромінювання, металодіелектрична структура.

## АННОТАЦИЯ

**Петровский М.В. Моделирование волновых процессов в пространственно-развитых квазиоптических резонансных структурах приборов миллиметрового диапазона. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2007.

Диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию электродинамических характеристик квазиоптических резонансных систем с пространственно-развитыми металлическими и металлодиэлектрическими структурами. Изучены общие физические закономерности волновых процессов в связанных открытых резонаторах с периодическими металлическими структурами и открытых резонаторах с планарными периодическими металлодиэлектрическими структурами. Установлены особенности энергетических характеристик гармоник дифракционно-черенковского излучения в металлодиэлектрическом канале с диэлектриком конечной толщины и электронно-волновых процессов в открытом волноводе с металлодиэлектрическим слоем в режиме резонансного возбуждения колебаний.

На основе векторной теории открытых резонаторов изучены особенности электродинамических характеристик сфероидального и полусферического резонаторов с однородными зеркалами для конкретной геометрии зеркал и заданного диапазона частот. Установлено, что введение в открытый резонатор неоднородности в виде диэлектрической призмы приводит к смещению резонансной частоты колебаний, величина которого зависит от параметров диэлектрического слоя и возбуждаемого типа колебания.

В приближении заданного тока для модели планарной электродинамической системы типа металлодиэлектрический канал при учете конечной толщины диэлектрического слоя получены соотношения и проведен численный анализ плотности энергии дифракционно-черенковских гармоник, излучаемых в диэлектрическую среду и свободное пространство. Определены оптимальные параметры электродинамической системы для случая моделирования режимов черенковского, дифракционного и дифракционно-черенковского излучения, при которых плотности гармоник излучения имеют наибольшие значения. Показана возможность регулировки уровней плотностей гармоник дифракционно-черенковского излучения по различным каналам трансформации объемных волн в металлодиэлектрическом канале путем изменения электродинамических параметров системы. Определены условия возбуждения аномального дифракционного излучения в планарной металлодиэлектрической структуре и установлена степень

влияния толщины диэлектрика и расстояния до отражающего экрана на плотность энергии излучения.

Проведен численный анализ дисперсионного уравнения, описывающего электронно-волновые процессы в режиме резонансного возбуждения колебаний для электродинамической системы открытого волновода с металлодиэлектрическим слоем. Установлена степень влияния параметров открытого волновода на эффективность возбуждения колебаний.

Методом экспериментального моделирования исследованы электродинамические характеристики открытых резонаторов различных модификаций. Показано, что открытые резонаторы с двойной ленточной дифракционной решеткой позволяют значительно расширить полосу пропускания системы. Исследования открытого резонатора с двойной отражательной дифракционной решеткой указывают на возможность реализации режимов повышения эффективности возбуждения системы и увеличения полосы пропускания. Промоделированы режимы черенковского, дифракционного и дифракционно-черенковского излучения на металлодиэлектрических структурах. Установлена возможность управления волновыми процессами путем изменения толщины диэлектрического слоя и параметров ленточной дифракционной решетки. Результаты исследования открытых резонаторов с металлодиэлектрическими структурами указывают на возможность реализации режимов селекции типов колебаний по частоте и амплитуде. Показана возможность реализации нерелятивистских дифракционно-черенковских и черенковских генераторов с применением металлодиэлектрических структур.

**Ключевые слова:** открытый резонатор, открытый волновод, диэлектрический волновод, дифракционная решетка, дифракционное излучение, черенковское излучение, металлодиэлектрическая структура.

## ABSTRACT

**Petrovsky M.V. Modelling of wave processes in spatially-developed quasi-optical resonant structures of millimetric range devices. – Manuscript.**

Thesis for a Doctor of philosophy degree (PhD) of physics and mathematics sciences, by speciality 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Sumy State University, Sumy, 2007.

The thesis is devoted theoretical and experimental research of electrodynamic descriptions of the quasi-optical resonance systems with spatially-developed metallic and metal-dielectric structures.

The features of electrodynamic descriptions spheroidal and hemispheric open resonators with homogeneous mirrors at presence of dielectric layer in their volume are studied for concrete geometry of

mirrors and set range of frequencies. In approximation of the set current, for the model of the planar electrodynamic system of type metal-dielectric duct relationship are obtained and the numerical analysis of energy density of diffraction-cerenkov harmonics radiated in a dielectric environment and free space. Electronic-wave processes in the mode of oscillation resonance excitation are studied for the electrodynamic system of the opened waveguide with a metal-dielectric layer.

The method of experimental simulation the opened resonators with double band and double reflecting diffraction grates are research. Modeled wave processes in the opened resonators with metal-dielectric structures. Possibility realization generators of millimetric waves range is shown with the use of metal-dielectric structures.

**Key words:** open resonator, open waveguide, dielectric waveguide, diffraction grating, diffraction radiation, cerenkov radiation, metal-dielectric structure.