

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Рибалко Олександр Олександрович

УДК 537.874.6

**МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЯВИЩ В
БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ КВАЗІОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ З
ПЕРІОДИЧНИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Воробйов Геннадій Савелійович,
Сумський державний університет,
професор кафедри наноелектроніки.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Масалов Сергій Олександрович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України,
завідувач відділу радіофізичної інтроскопії;

доктор фізико-математичних наук, професор
Шматько Олександр Олександрович,
Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна,
професор кафедри фізики НВЧ.

Захист відбудеться « 27 » травня 2011 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 при Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 236.

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

Автореферат розісланий « 13 » квітня 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.О. Журба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Багатозв'язні електродинамічні системи набули широкого застосування при поліпшенні вихідних параметрів класичних електровакуумних приладів (ЕВП) міліметрового діапазону хвиль, таких як лампи зворотної хвилі і лампи біжучої хвилі на ланцюжках зв'язаних резонаторів. Однак для даних приладів залишаються характерними проблеми при просуванні їх у субміліметровий та інфрачервоний діапазони довжин хвиль, які пов'язані, насамперед, із зменшенням розмірів простору взаємодії і основних вузлів приладу пропорційно довжині хвилі. Подолання цих труднощів стимулювало розвиток нових принципів побудови ЕВП, що базуються на застосуванні багатозв'язних квазіоптичних систем (БКС) як в електроніці, так і в техніці НВЧ. Основною відмінністю БКС від використовуваних у традиційних пристроях НВЧ систем є наявність як мінімум двоактного перетворення поверхневих хвиль розподілених джерел випромінювання в об'ємні хвилі на періодичних неоднорідностях. До таких приладів, наприклад, належать генератори дифракційного випромінювання (ГДВ), оротрони й підсилювачі на ефекті Сміта-Парселла, принцип роботи яких базується на багатоактному перетворенні поверхневих хвиль просторових дифракційних гармонік електронного потоку (ЕП) поблизу дифракційної ґратки (ДГ) в об'ємні хвилі власних коливань відкритого резонатора (ВР) або відкритого хвилеводу (ВХ).

Перспективними у плані побудови нових модифікацій ЕВП та елементної бази пристроїв міліметрового і субміліметрового (МСМ) діапазонів хвиль, включаючи інфрачервоні хвилі, є БКС різних модифікацій з періодичними металевими й металодіелектричними структурами (МДС).

Різноманітність запропонованих раніше БКС при недостатньому обсязі їх системних досліджень гальмує розвиток практичної реалізації нових модифікацій ЕВП і елементної бази МСМ хвиль на їх основі. Тому питання розроблення загальної методики експериментального моделювання електромагнітних явищ у БКС і реалізації її для вивчення електромагнітних явищ у складних квазіоптичних системах із залученням існуючих чисельно-аналітичних методів актуальні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у науково-дослідницькій лабораторії «Нові технології у фізиці та техніці НВЧ» кафедри наноелектроніки Сумського державного університету. Тематика роботи відповідає науковим програмам Міністерства освіти і науки України з фундаментальних досліджень. Основні результати роботи увійшли до заключного звіту із держбюджетної науково-дослідної роботи «Фізика хвильових процесів у відкритих хвилеводно-резонаторних металодіелектричних системах з розподіленими джерелами випромінювання» № 0106U001931

(2006 – 2008 рр.) та до проміжного звіту із держбюджетної науково-дослідної роботи «Фізика формування потоків заряджених частинок у приладах для діагностики матеріалів атомної енергетики» № 0109U001378 (2009 – 2011 рр.).

Мета і завдання дослідження. Мета досліджень – експериментальне моделювання (із застосуванням чисельних методів) фізики електромагнітних явищ у багатозв'язних квазіоптичних системах міліметрового діапазону з періодичними неоднорідностями, на підставі яких можуть бути запропоновані практичні рекомендації при реалізації конкретних пристроїв електроніки й техніки НВЧ.

Відповідно до цього в роботі поставлені та вирішені такі наукові задачі:

- проведено узагальнений аналіз багатозв'язних систем і побудована схема їх класифікації, на підставі якої дане визначення терміна БКС і позначені об'єкти досліджень;
- розроблена та на експериментальних установках реалізована загальна методика моделювання електромагнітних явищ як для елементів зв'язку, так і для БКС резонансного й хвилеводного типів;
- у міліметровому діапазоні хвиль досліджені просторові та хвилеводні характеристики елементів зв'язку БКС, що виконані як на основі металевих, так і металодіелектричних періодичних структур. Для основних режимів збудження просторових хвиль проведено чисельне тестування результатів експерименту;
- для широкого класу резонансних БКС (зв'язаних ВР з відбивними і напівпрозорими ДГ, резонаторів з періодичними МДС) досліджені їх спектральні та хвилеводні характеристики;
- для різних модифікацій БКС на базі відкритого хвилеводу досліджені умови формування біжучої хвилі залежно від його електродинамічних параметрів;
- шляхом аналізу оптимальних режимів збудження електромагнітних коливань у БКС показана можливість створення нових схем ЕВП і елементної бази пристроїв МСМ діапазонів хвиль.

Об'єкт дослідження – електромагнітні явища у багатозв'язних квазіоптичних системах міліметрового діапазону хвиль.

Предмет дослідження – електродинамічні характеристики періодичних елементів зв'язку, багатозв'язних відкритих резонаторів і хвилеводів.

Відповідно до поставлених задач використовувалися такі **методи досліджень**:

- теоретичний метод ідентифікації хвиль просторового заряду ЕП із поверхневою хвилею діелектричного хвилеводу (ДХ);
- методи розв'язання задач електроніки в наближенні заданого струму і у самоузгодженій постановці;
- чисельні методи: ітераційний метод Ньютона та метод кінцевих різниць;
- класичні методи вимірювання амплітудних і частотних характеристик електромагнітних полів у діапазоні НВЧ.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі систематизовані та розвинені експериментальні методи дослідження електромагнітних явищ у багатозв'язних квазіоптичних системах, які в поєднанні із чисельними методами можуть бути використані при створенні нових модифікацій електровакуумних приладів і елементної бази МСМ хвиль, включаючи інфрачервоні хвилі. Отримано такі нові результати:

- уперше розроблена загальна методика експериментального моделювання електромагнітних явищ у багатозв'язних квазіоптичних системах, що може бути застосована до будь-якого об'єкта, який містить у собі системи формування та перетворення поверхневих хвиль в об'ємні. Дана методика реалізована на експериментальних стендах у діапазоні частот 30 – 80 ГГц;
- для дворядних періодичних структур БКС уперше встановлена можливість фазової й амплітудної корекції рівня гармонік випромінювання шляхом поздовжнього й кутового зсуву їх ламелів відносно осі діелектричного хвилеводу. Визначено умови резонансного випромінювання при збільшенні його інтенсивності на 30 – 40% порівняно з однорядними структурами;
- для резонансних БКС встановлена можливість збільшення смуги пропускання зв'язаних ВР в 2 – 4 рази при одночасному пригніченні коливань на бічних частотах. Для хвилеводних БКС уперше визначені оптимальні умови формування електромагнітної біжучої хвилі і інтервал граничних значень циклотронного параметра при фокусуванні ЕП магнітним полем;
- запропоновано нові модифікації спрямованих відгалужувачів, дільників потужності й джерел випромінювання, які на рівні сучасних нанотехнологій можуть бути реалізовані в субміліметровому – інфрачервоному діапазонах хвиль.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена методика експериментального моделювання електромагнітних явищ у БКС, що може бути використана при оптимізації електродинамічних параметрів нових модифікацій ЕВП і налаштуванні квазіоптичних елементів багатозв'язних пристроїв МСМ діапазонів хвиль. Результати досліджень резонансних і хвилеводних БКС дозволяють запропонувати й реалізувати нові типи приладів та пристроїв, які є перспективними при освоєнні субміліметрового і інфрачервоного діапазонів довжин хвиль. На сьогодні результати дисертаційної роботи та створена експериментальна база використовуються при постановці спеціальних навчальних курсів, наприклад, «Електроніка НВЧ» і «Радіофізичні методи діагностики матеріалів», для студентів і магістрантів за фаховим спрямуванням «Мікро- і наноелектроніка».

Особистий внесок здобувача. Автор особисто здійснював пошук і аналіз літературних джерел, що стосуються теми дисертації, розробив універсальну методику моделювання електромагнітних явищ у багатозв'язних квазіоптичних системах як резонансного, так і хвилеводного типу, проводив експеримен-

тальне й чисельне моделювання хвилеводних і просторових характеристик БКС, обробляв і аналізував отримані результати, брав участь у написанні статей. Особисто автором підготовлені статті [2,6,8] і тези доповідей [12-17]. Постановка мети й задач дослідження, обговорення й узагальнення результатів проводилися разом із науковим керівником д. ф. - м. н., професором Воробйовим Г.С і співавторами робіт. Частина експериментальних досліджень проведено спільно з к.ф.-м.н. Журбою В.О, Кривцем О.С., Петровським М.В. та аспірантом Шульгою Ю.В. Основні наукові результати доповідалися особисто автором на наукових конференціях і семінарах.

Апробація результатів дисертації проводилася на таких національних і міжнародних семінарах, конференціях і форумах: 18-й – 20-й Міжнародних конференціях «НВЧ-Техніка й телекомунікаційні технології» (м. Севастополь, 2008 – 2010 рр.); 12-му Міжнародному форумі «Радіоелектроніка й молодь у ХХІ столітті» (м. Харків, 2008 р.); Міжнародних конференціях молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЄВРИКА» (м. Львів, 2008 – 2010 рр.); конференції молодих вчених та аспірантів «ІЕФ-2009» (м. Ужгород, 2009 р.); Міжнародних наукових конференціях "Електронна компонентна база. Стан і перспективи розвитку" (м. Харків-Кацивелі, 2009 – 2010 рр.); щорічних науково-технічних конференціях співробітників, викладачів і студентів СумДУ (Суми, 2007 – 2010 рр.).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 32 наукових працях, зокрема основні 17 наведені в авторефераті. Серед них 10 статей у спеціалізованих журналах, що входять до переліку ВАК України, 11 робіт індексуються базою даних Scopus.

Структура дисертації. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи – 179 сторінок, із них 116 сторінок основного тексту, 69 рисунків і 6 таблиць. Список використаних джерел налічує 132 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета й основні задачі дослідження, визначені об'єкт і предмет дослідження, розкриті наукова новизна й практичне значення отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами й темами, наведені відомості про апробацію результатів роботи, особистий внесок здобувача, а також дані щодо кількості публікацій та структури дисертації.

Перший розділ «Багатозв'язні електродинамічні системи в техніці і електроніці НВЧ» – літературний огляд. У ньому проаналізований сучасний рівень розвитку та основні типи класичних багатозв'язних систем. Визначено перспективи можливого використання БКС у МСМ діапазонах хвиль. Наведено

схему класифікації багатозв'язних електродинамічних систем за особливостями фізики взаємодії електромагнітних полів, яка дозволяє проілюструвати етапи їх розвитку і різноманіття, а також вказує на місце, яке займає дисертаційна робота в даному напрямку досліджень. Виходячи із проведеного літературного огляду, сформульоване визначення терміна БКС: багатозв'язною називається квазіоптична електродинамічна система, що містить як мінімум два перетворювальні елементи, які забезпечують трансформацію енергії повільних хвиль в енергію швидких просторових гармонік (об'ємних хвиль), випромінюваних у навколишній простір. У рамках даного визначення й схеми класифікації БКС виділені основні питання, які до цього часу вирішені недостатньо. Зокрема, показано, що з точки зору оптимізації електродинамічних параметрів БКС для практичного застосування в пристроях МСМ хвиль недостатньо вивчені: зв'язані ВР; системи, виконані у вигляді ВР і ВХ, в об'ємі яких розташовані дворядні дифракційні ґратки і металодіелектричні структури різних модифікацій; ВХ з дифракційно-зв'язаними джерелами випромінювання. Загальною ознакою таких систем є просторово розвинені області формування електромагнітних полів у обмежених відбиваючими поверхнями об'ємах. При цьому невід'ємною частиною досліджень перелічених вище об'єктів виступають характеристики базових (найпростіших) резонансних і хвилеводних квазіоптичних систем, а також елементів зв'язку, які забезпечують багаторазове перетворення поверхневих хвиль в об'ємні для заданої геометрії БКС, що вимагає додаткових досліджень їх електродинамічних властивостей як незалежних елементів БКС.

У *другому розділі* «Експериментальна установка і загальна методика моделювання просторових хвиль у багатозв'язних квазіоптичних системах» викладені загальні принципи побудови хвильових моделей дифракційного та черенковського випромінювань (ДЧВ), які ґрунтуються на порівнянні результатів розв'язків теоретичних задач у наближеннях заданого струму і поверхневої електромагнітної хвилі ДХ. Загальні умови випромінювання електромагнітних хвиль у вакуум (1) і діелектрик (2) мають такий вигляд:

$$\frac{\kappa}{|n| + \kappa} \leq \frac{\beta_x}{\beta_e} \leq \frac{\kappa}{|n| - \kappa} \quad (1) \quad \text{та} \quad \frac{\kappa}{|n| + \kappa\sqrt{\varepsilon}} \leq \frac{\beta_x}{\beta_e} \leq \frac{\kappa}{|n| - \kappa\sqrt{\varepsilon}}, \quad (2)$$

де $\kappa = kl/2\pi = l/\lambda$, $k = 2\pi/\lambda$ – хвильові числа; λ – довжина хвилі; l – період ґратки; ε – відносна діелектрична проникність середовища; $\beta_x = v_x/c$, $\beta_e = v_e/c$; v_x і v_e – швидкості хвилі і електронів відповідно; c – швидкість світла.

Із аналізу співвідношень (1) і (2) випливає, що для заданих параметрів κ , β_e (β_x) і ε у вільному просторі збуджуються тільки просторові гармоніки з

номерами $n = -1, -2, -3, \dots$, а в діелектричному середовищі – гармоніки з $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Дані режими випромінювань проаналізовані шляхом графічної побудови в координатах $k, \eta = k/\beta_e$ діаграм Бриллюена для широкого інтервалу значень $\varepsilon = 2 - 150$, характерного для відомих на сьогодні діелектриків із малими втратами на НВЧ: фторопласт, полікор, керамічні матеріали оксидів барію і титану. Визначено оптимальні значення електродинамічних параметрів випромінюючих систем як при реалізації режимів експериментального моделювання, так і низьковольтних ЕВП. Описано універсальну експериментальну установку міліметрового діапазону хвиль $\lambda = 4 - 8$ мм та загальну методику моделювання електромагнітних явищ у багатоз'язних квазіоптичних системах. Для експериментальної установки характерна блокова структура, що дозволяє реалізувати вимірювання хвилеводних та просторових характеристик різних модифікацій БКС шляхом заміни окремих блоків на додаткові вимірювальні пристрої. Установка складається з таких основних блоків: I – системи зв'язку та збудження просторових хвиль, що включає в себе задану модифікацію періодичних неоднорідностей і ДХ; II – об'єкт дослідження (ВР або ВХ із системою зв'язку); III – блок виміру хвилеводних характеристик; IV – блок контролю та узгодження вихідної потужності; V – система реєстрації полів у дальній зоні; VI – система реєстрації полів у ближній зоні; VII – система кутового та трьохкоординатного юстування елементів і досліджуваного об'єкта.

Запропоновано загальну методику моделювання електромагнітних явищ у резонансних і хвилеводних БКС, що концептуально полягає у наступному:

- проведенні тестування і калібрування основних вимірювальних елементів тракту НВЧ, а також використовуваних в експерименті ДХ;
- визначенні оптимального значення прицільного параметра a для заданого типу ДХ;
- визначенні параметрів заданого типу періодичних неоднорідностей області зв'язку та ДХ;
- вимірюванні просторових характеристик області зв'язку (у дальній і ближній зонах) із одночасним, автоматичним контролем їх хвилеводних характеристик;
- вимірюванні електродинамічних характеристик БКС заданих модифікацій (ВР, ВХ) із подальшою комп'ютерною обробкою і аналізом отриманих результатів.

У третьому розділі «Результати досліджень просторових і хвилеводних характеристик елементів зв'язку» на підставі раніше отриманих теоретичних і експериментальних результатів із дослідження найпростіших типів випромінювальних систем, утворених однорядними ДГ, а також шляхом експериментального моделювання перетворення поверхневих хвиль ДХ у

об'ємні на дворядних ДГ різних модифікацій, визначені загальні електродинамічні характеристики елементів зв'язку БКС.

Розрахунок параметрів однорядних металевих ДГ, що використовувалися при експериментальному моделюванні, проводився на підставі результатів розв'язку задач дифракції плоских (об'ємних) хвиль на періодичних двовимірних ґратках із металевими елементами, які були отримані академіком Шестоपालовим В.П. і його учнями у строгій математичній постановці та апробовані експериментально.

Умова і кут випромінювання γ_n просторових хвиль у системі ДХ – ґратки із брусів прямокутного перерізу визначаються співвідношенням

$$|\cos \gamma_n| = \frac{1}{k} \left(\alpha - \frac{2\pi n}{l} \right) \leq 1, \quad (3)$$

де α – стала поширення, $n < 0$.

Оптимальне значення товщини брусів

$$2h = N \frac{\lambda}{2} + \theta \frac{4}{\pi} \ln \sin \frac{\pi \theta'}{2}, \quad (N = 1, 2, \dots). \quad (4)$$

Резонансна глибина щілин відбивної ДГ

$$h = (2N + 1) \frac{\lambda}{4} + \theta \frac{2}{\pi} \ln \sin \frac{\pi \theta'}{2}, \quad (N = 0, 1, 2, \dots), \quad (5)$$

де θ – ширина щілин, $\theta' = \theta/l$.

Крім того, одним із визначальних факторів, від якого залежить інтенсивність випромінювання, є коефіцієнт заповнення напівпрозорих ДГ із брусів і стрічок, що визначається співвідношенням – $u = \cos \pi d/l$, де d – ширина брусів або ламелів відбивної ДГ (у роботі він проаналізований аналітично для двох граничних випадків ($u \rightarrow +1$, $u \rightarrow -1$) і визначений експериментально на прикладі стрічкових ДГ).

Експериментальні дослідження систем зв'язку були проведені у двох піддіапазонах довжин хвиль при таких основних параметрах: $\lambda = 5 - 3,7$ мм ($f_0 = 78$ ГГц, $\beta_x = 0,778$, $l = 3$ мм), $\lambda = 10 - 8$ мм ($f_0 = 33,4$ ГГц, $\beta_x = 0,9$, $l = 11,5$ мм).

Для однорядних систем зв'язку із металевих елементів визначені режими мінімального спотворення діаграм спрямованості випромінювання при їх максимальній інтенсивності.

Для відкритої структури ДХ – ДГ із брусів вивчені просторові і хвилеводні характеристики залежно від кута повороту ґратки відносно осі ДХ,

експериментально визначена область значень критичного кута повороту ($\alpha_{кр} \approx 45^\circ$):

$$\alpha_{кр} = \arccos \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\kappa\beta}{n} - \frac{n\beta}{\kappa} - \frac{\kappa}{n\beta} \right) \right], \quad (6)$$

при якому настає режим поверхневих хвиль, а подальше збільшення α приводить до дифракції Брегга.

Як приклад, на рис. 1 наведені деякі із просторових характеристик для однорядних випромінюючих систем.

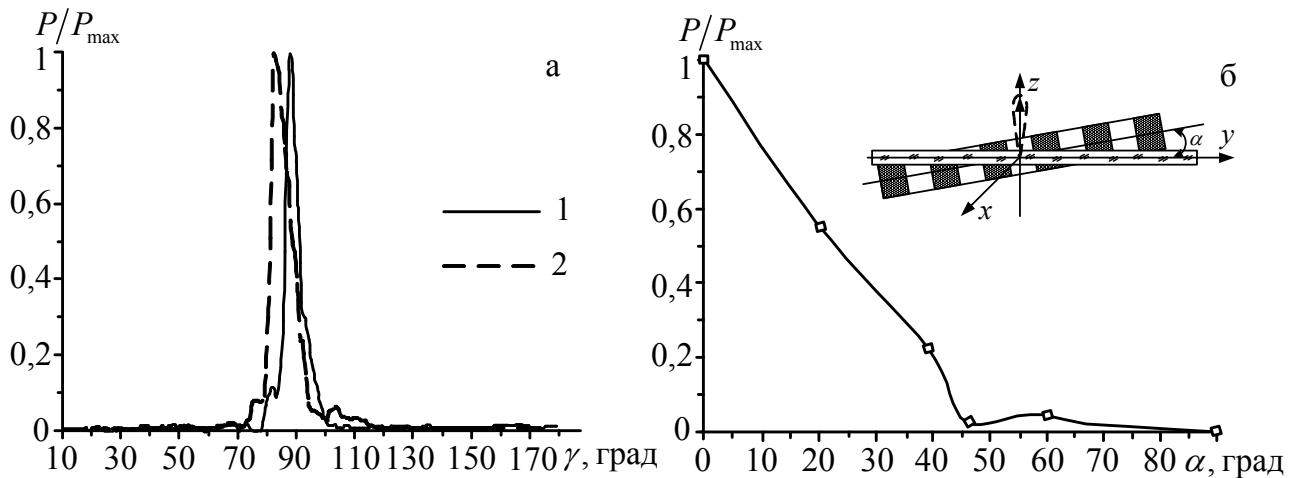


Рис. 1. Просторові характеристики металевих випромінюючих систем: а – $\alpha = 0$ (1 – гратки із брусів; 2 – відбивна ДГ); б – $\alpha > 0$ (P_{\max} – максимальна потужність основної гармоніки випромінювання)

Однорядні періодичні МДС мають більш широкий спектр випромінюваних гармонік порівняно з металевими ДГ, щільність енергії випромінювання яких у вільний простір (S_n) і діелектричне середовище ($S_{n\epsilon}$) визначаються такими співвідношеннями:

$$S_n = \frac{c}{8\pi} |A_n|^2, \quad S_{n\epsilon} = \frac{c}{8\pi\sqrt{\epsilon}} |B_n|^2, \quad (7)$$

де функції A_n й B_n мають складний вигляд і залежать від електродинамічних параметрів МДС.

Хвильове моделювання випромінювання на МДС було реалізовано для трьох режимів: $n=0$ – аналог черенковського випромінювання ($l=2$ мм); $n=0, -1$ – випромінювання в діелектрик ($l=2,7$ мм); $n=-1$ – випромінювання у вакуум і діелектрик ($l=4,4$ мм). При цьому досліджувалися два види

фторопластових призм, на бічну грань яких методом фотолітографії наносилися стрічкові ДГ. Призми трикутного перерізу дозволяли реалізувати модель напівнескінченного діелектричного середовища, а призми прямокутного перерізу – модель, обмежену по товщині ($\Delta = \frac{1}{4}\lambda - 4\lambda$) і периметру ($L \times D = 54 \times 60$ мм) МДС. Вплив коефіцієнта заповнення стрічкових ґраток досліджувався в діапазоні $u = +0,5 \div -0,85$. Зокрема, було встановлено, що в даному інтервалі зміни u потужність основної гармоніки ($n=0$) може зменшуватися не більш ніж на 4 дБ. При появі гармоніки із $n=-1$ в області широких стрічок ґратки ($u = -0,85$) рівні гармонік порівнянні, а в області вузьких стрічок ґратки ($u = +0,5$) нульова гармоніка приблизно на 20 дБ перевершує гармоніку з $n=-1$. Поява гармоніки із $n=-1$, випромінюваної у вакуум, незначно змінює перерозподіл потужності, що свідчить про її малу інтенсивність.

Встановлено кореляцію результатів моделювання на призмах трикутного й прямокутного перерізів. Показано, що шляхом узгодження торців призми з

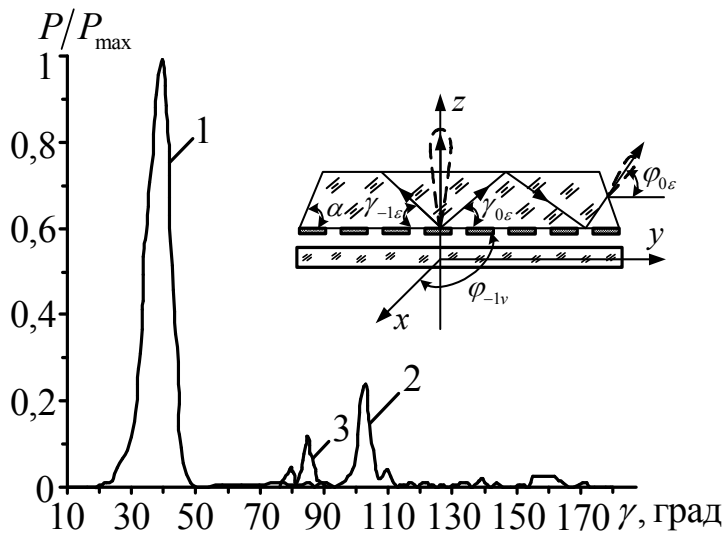


Рис. 2. Просторові характеристики МДС із узгодженими торцями: 1 – основна гармоніка ($n=0$); 2 – гармоніка, випромінювана в діелектрик ($n=-1$); 3 – гармоніка, випромінювана у вакуум ($n=-1$)

навколишнім простором (при виконанні їх під кутом $\alpha = 60^\circ$ щодо площини ґратки) можливе зменшення інтерференційних явищ уздовж її осі, що, зокрема, продемонстроване на рис. 2 для трьох основних гармонік, збуджуваних у МДС.

Для дворядних ДГ встановлена можливість фазового коректування перетворення поверхневих хвиль в об'ємні шляхом зміни координатної й кутової орієнтації ґраток відносно осі ДХ. Зокрема, встановлено, що максимальна амплітуда резонансного випромінювання для ґраток із брусів спостерігається при поздо-

вжньому зсуві їх ламелів на величину $\Delta d \approx \lambda/2$, а для відбивних ДГ при $\Delta d \approx \lambda/4$ (див. рис. 3).

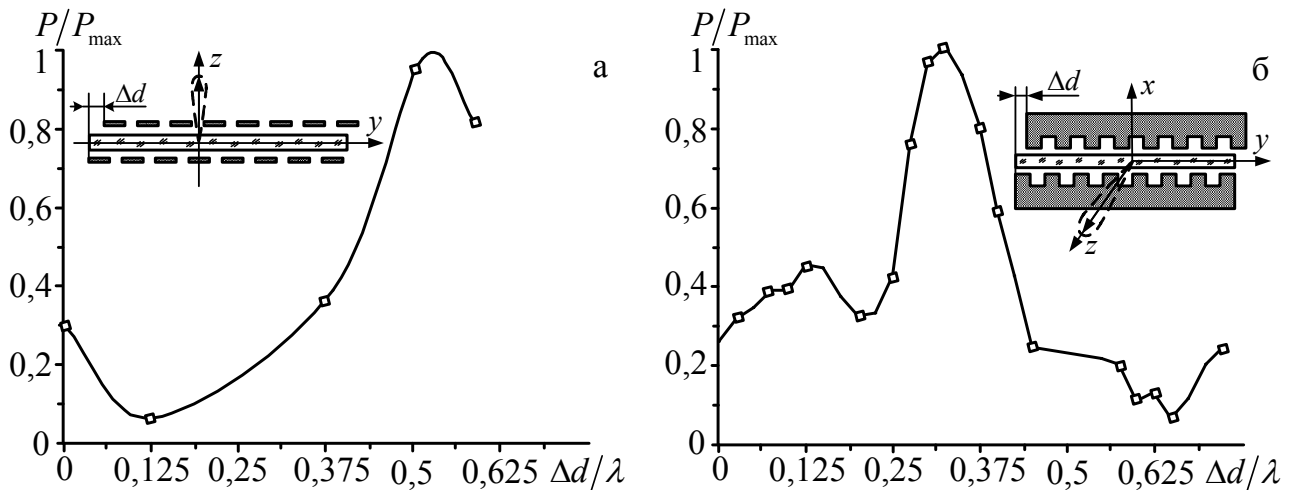


Рис. 3. Просторові характеристики: а – дворядна система із брусів; б – дворядна відбивна ДГ

Для дворядної ДГ із брусів показана можливість ефективного регулювання випромінюваної потужності при зміні кутової орієнтації однієї з ґраток відносно поздовжньої осі ДХ аж до значень критичного кута повороту щодо повного перетворення об'ємної хвилі в поверхневу, яке визначається співвідношенням (6).

Досліджено дворядну систему відбивна – напівпрозора ДГ, що дозволяє збільшити ефективність трансформації поверхневої хвилі в об'ємну на 30 – 40% порівняно з однорядними системами.

Крім того, у даному розділі досліджені ближні поля основних типів випромінюючих об'єктів (відстань зонда від об'єкта порядку λ). Встановлено, що для відбивних ДГ картина поля уздовж поздовжньої осі має вигляд квазібіжучої хвилі з розподілом максимальних значень амплітуд на $2/3$ її довжини при осциляціях, порівнянних із періодом ДГ. Картина поля в поперечному перерізі ґратки аналогічна розподілу амплітуди непарно – симетричного коливання TEM_{10q} у плоскопаралельному резонаторі.

Значні зміни амплітудних розподілів ближніх полів відбуваються в МДС за рахунок виникнення додаткових хвиль у діелектрику. Розподіл полів уздовж поздовжньої осі характеризується резонансним і нерезонансним режимами. При нормальному випромінюванні для МДС із фторопласта виконується умова дифракції Брегга, і система за рахунок появи зворотної хвилі стає резонансною, маючи два максимальних значення поля. При випромінюванні під кутом спостерігається режим біжучої хвилі, як і на відбивній ДГ. Розподіл ближніх полів у поперечному перерізі аналогічний відбивній ДГ та свідчить про відсутність хвильових процесів.

Для перевірки результатів експериментального моделювання хвильових процесів деякі з них були протестовані чисельними методами: методом

заданого струму поверхневої хвилі ЕП та методом кінцевих різниць при збудженні об'єктів поверхневою хвилею ДХ.

У першому випадку розраховувалися відносні значення щільності енергії випромінювання в логарифмічному масштабі від параметра β_e у заданому інтервалі $u = +0,5 \div -0,85$ для основних гармонік випромінювання $n = 0$, $n = 0, -1$ і $n = -1$. При цьому чисельний аналіз співвідношень (7) в основному зводиться до розв'язання стандартної скороченої системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Встановлено кореляцію експериментального моделювання і чисельного аналізу на рівні відносних значень потужності випромінювання ± 4 дБ.

Другий метод дозволяє одержати не тільки якісні, але й кількісні результати. Деякі з них наведені на рис. 4 і можуть бути застосовані при прогнозуванні доцільності використання заданих типів зв'язку в БКС.

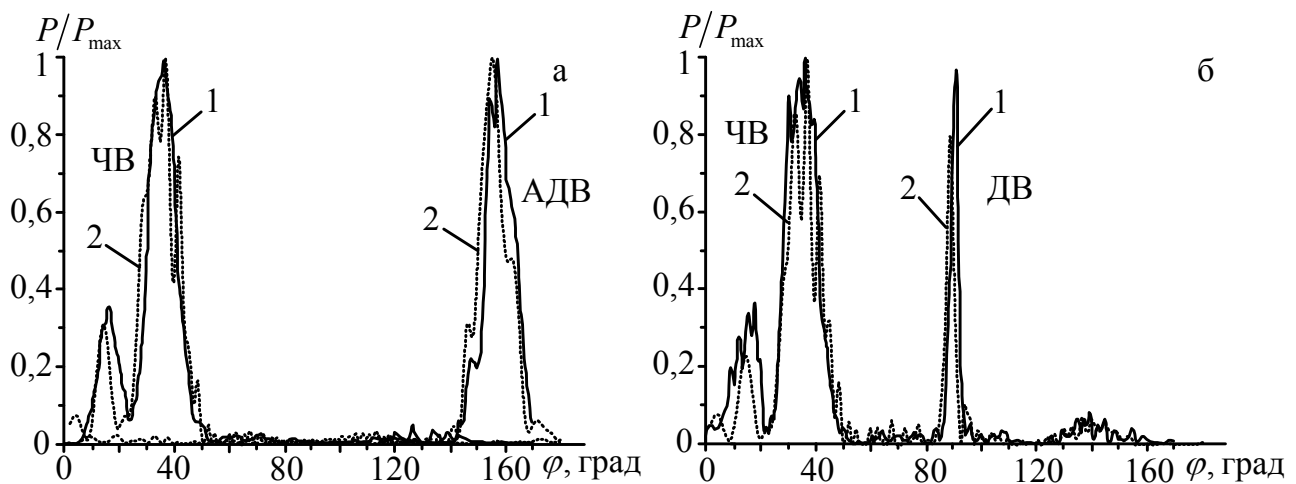


Рис. 4. Результати чисельного та експериментального моделювання просторових хвиль у МДС: а – черенковський і аномальний дифракційний режими випромінювання; б – дифракційно-черенковський режим випромінювання (ЧВ – черенковське випромінювання, АДВ – аномально-дифракційне випромінювання, ДВ – дифракційне випромінювання). 1 – експеримент, 2 – теорія

У **четвертому розділі** «Результати досліджень резонансних і хвилеводних багатозв'язних квазіоптичних систем» шляхом використання викладеного в другому розділі методу експериментального моделювання і теоретичних оцінок досліджені електродинамічні характеристики резонансних і хвилеводних БКС, що містять періодичні елементи зв'язку.

Досліджувані БКС – це дводзеркальні системи відкритого типу з параметрами, що задовольняють основні нерівності квазіоптики:

$$\frac{d^2}{H\lambda} \leq \left(\frac{H}{d}\right)^2, L/\lambda \geq 10, \quad (8)$$

де $d = D/2$ – радіус апертури відбивних дзеркал; D і L – поперечний і подовжній розміри дзеркал відповідно.

У роботі методом векторної теорії та експериментально досліджені базові (без періодичних неоднорідностей) сфероїдальні й напівсферичні відкриті резонатори з радіусами кривизни дзеркал в інтервалі $R = 60 \div 180$ мм і апертурами $A_s \approx 60$ мм. Для основної моди TEM_{00q} коливання вивчені залежності радіусів каустики полів від відстані між дзеркалами та спектральні характеристики, які надалі використовуються для опису властивостей ВР з періодичними неоднорідностями.

У результаті досліджень резонансних БКС на базі ВР з послідовним і паралельним умиканням їх стосовно елемента зв'язку встановлена можливість збільшення смуги пропускання системи в області резонансної частоти в 2-4 рази із пригніченням коливань на бічних частотах. Зокрема, на рис. 5 зображені деякі зі схем резонансних БКС та їх характеристики.

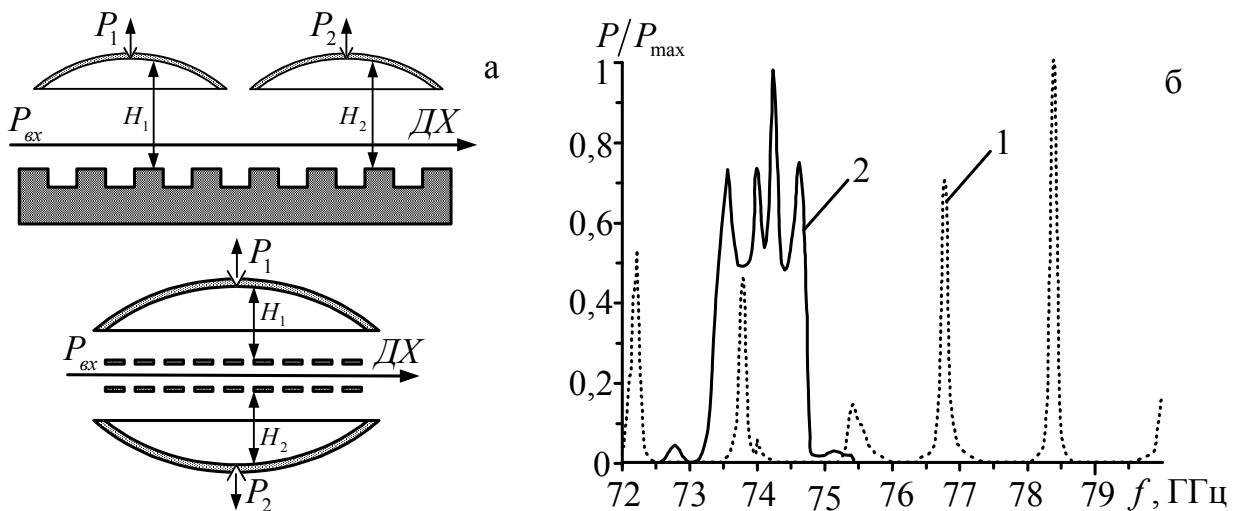


Рис. 5. Основні схеми виконання резонансних БКС (H_1 і H_2 – відстані між дзеркалами, P_{ex} – вхідна потужність, P_1 і P_2 – вихідні потужності) – (а); резонансні характеристики напівсферичного ВР – (б): 1 – ВР із гладкими дзеркалами, 2 – ВР із дворядною напівпрозорою ДГ

Широкий спектр функціональних можливостей періодичних МДС, викладених у розділах 2, 3, дозволяє успішно використовувати їх при створенні нових типів резонансних БКС. У цьому плані доцільним є провести чисельний аналіз і порівняння його з експериментом для найпростішого типу БКС (МДС – відбивний екран) та експериментальне моделювання хвильових процесів при включенні МДС в об'єм ВР. У результаті проведення таких досліджень

встановлена можливість керування частотними та амплітудними характеристиками ВР шляхом зміни електродинамічних параметрів МДС: періоду, ширини стрічок ДГ, товщини й значень діелектричної проникності ϵ діелектрика. Зокрема, при зміні товщини діелектрика в інтервалі значень $\Delta = \lambda/4 \div 3\lambda$ можлива реалізація режимів селекції вищих типів коливань при збільшенні амплітуди й добротності основного коливання.

Крім того, у даному розділі наведені результати моделювання хвильових процесів у хвилеводних БКС із періодичними структурами. Як базова система розглядається плоскопаралельний ВХ, на одному із дзеркал якого розташована дифракційна ґратка з розподіленим джерелом випромінювання типу ДХ або ЕП. Для варіанта збудження ВХ електронним потоком, у рамках лінійної теорії підсилювача на ефекті Сміта-Парселла, отримані й чисельно проаналізовані спрощені степеневі дисперсійні рівняння сьомої (з урахуванням впливу магнітного поля – циклотронного параметра Ω_c) і третьої (без урахування впливу магнітного поля) степені, які в компактній формі запису мають такий вигляд:

$$\sum_{n=1}^{n=7} F_n \delta\mu^n = 0 \quad (9)$$

і

$$\sum_{n=1}^{n=3} F'_n \delta\mu^n - \frac{q^2 \kappa^2 \Lambda}{\Delta'_{0\mu}} = 0, \quad (10)$$

де алгебраїчні функції F_n й F'_n , що входять у співвідношення (9) і (10), залежать від основних електродинамічних параметрів досліджуваної системи: q – параметр просторового заряду, $\delta\mu$ – додаток до хвильового числа, а додаткові функції Λ й $\Delta'_{0\mu}$ у виразі (10) враховують відповідно дисперсійні

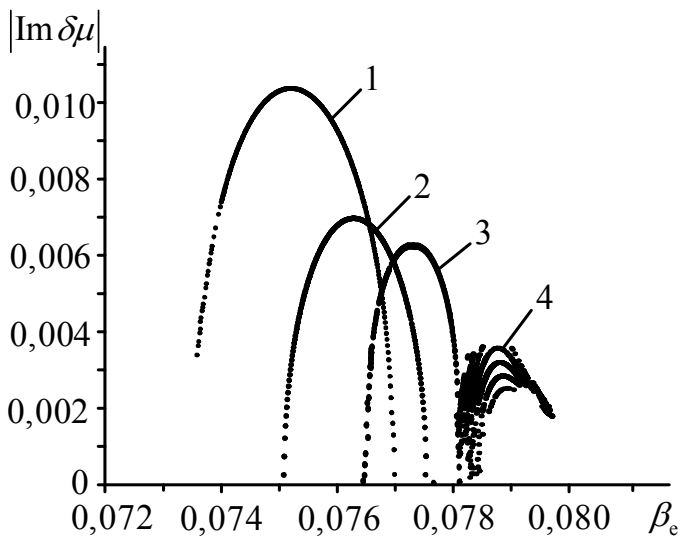


Рис. 6. Розв'язання дисперсійного рівняння (9) при різних значеннях параметра Ω_c : 1 - 0,6; 2 - 0,5; 3 - 0,4; 4 - 0,025

властивості ЕП і діелектричного заповнення хвилеводу.

Як приклад на рис. 6 наведені результати чисельного аналізу дисперсійного рівняння (9) у вигляді залежностей амплітуди інкремента наростання хвилі від параметра β_e . Із даних залежностей випливає, що для значень параметра $\Omega_c < 0,02$ збудження ВХ електронним потоком практично припиняється. При дослідженні хвильових процесів у плоскопаралельному ВХ із розподіленим джерелом випромінювання типу ДГ – ДХ встановлено, що така система в

діапазоні частот $f = 32 - 35$ ГГц має резонансні властивості, які характеризуються малими значеннями коефіцієнтів проходження хвилі ($K_{\Pi} \approx 0,1$) і високими значеннями коефіцієнтів стоячої хвилі ($KCB > 2$). Встановлено, що резонансні властивості плоскопаралельного ВХ можуть бути зменшені або шляхом використання двох дифракційно-зв'язаних джерел випромінювання (ДГ – ДХ), розташованих на дзеркалах ВХ, або шляхом включення в об'єм ВХ МДС. Для таких систем хвильоводні характеристики змінюються в таких межах: $K_{\Pi} = 0,2 - 0,4$, $KCB = 1,1 - 1,4$.

Особлива увага в даному розділі приділена впливу фазової корекції дзеркал на характеристики хвильоводних БКС. На сьогодні найбільше застосування знайшли квадратичні коректори, для яких

$$\psi(x, z) = -gk(x^2 + z^2)/H, \quad (11)$$

де $g = H/2F$; F – фокусна відстань.

Такі дзеркала у ВХ – це частини поверхні циліндра й можуть використовуватися в комбінації із плоскими дзеркалами.

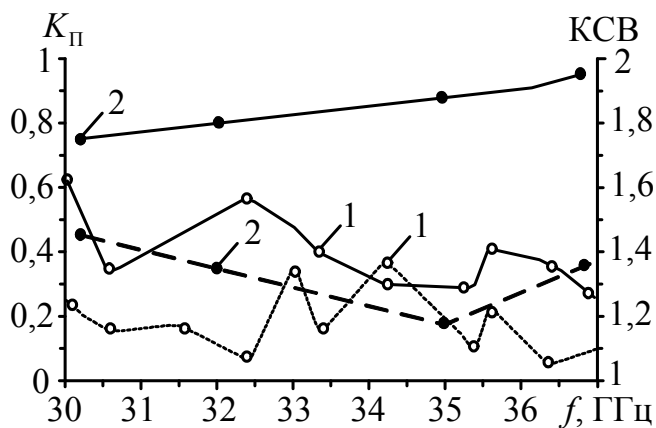


Рис. 7. Порівняльний аналіз хвильоводних характеристик плоско-циліндричного (1) і циліндричного (2) ВХ із одним джерелом випромінювання: K_{Π} – безперервна лінія, KCB – пунктир

У результаті проведених досліджень встановлено, що значне поліпшення параметрів ВХ може бути досягнене шляхом застосування двох циліндричних дзеркал зі значенням радіусів кривизни в інтервалі $2R/\lambda = 4 \div 6$, що, зокрема, продемонстровано на рис. 7.

Із практичної точки зору становить інтерес вивчення взаємодії двох протяжних джерел випромінювання, розміщених у циліндричному ВХ. У результаті таких досліджень установлена можливість ефективного розподілу прямої і зворотної хвиль при різних відстанях між дзеркалами, що дозволило запропонувати на базі такої системи квазіоптичний спрямований відгалужувач, схема й характеристики якого представлені на рис. 8.

Із порівняльного аналізу наведених характеристик спрямованого відгалужувача випливає, що в міліметровому діапазоні хвиль він не поступається кращим варіантам виконання відгалужувачів на зв'язаних ДХ.

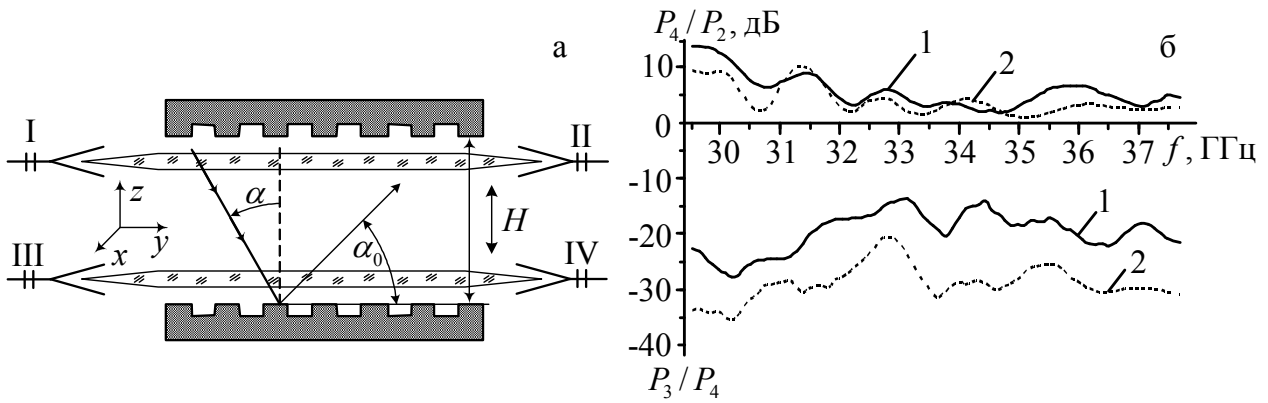


Рис. 8. Схематичне зображення спрямованого відгалужувача (а) на дифракційно-зв'язаних лініях передачі (I, II, III, IV – плечі відгалужувача, α – кут випромінювання просторових хвиль) та основні характеристики спрямованого відгалужувача (б) при $H = 65$ мм (1) і $H = 80$ мм (2)

Виходячи з описаних у розділі 3 електродинамічних властивостей дворядних ДГ із брусів прямокутного перерізу, запропоновані й реалізовані два типи ділянок потужності, що перебудовуються, схематичне зображення яких представлено на рис. 9.

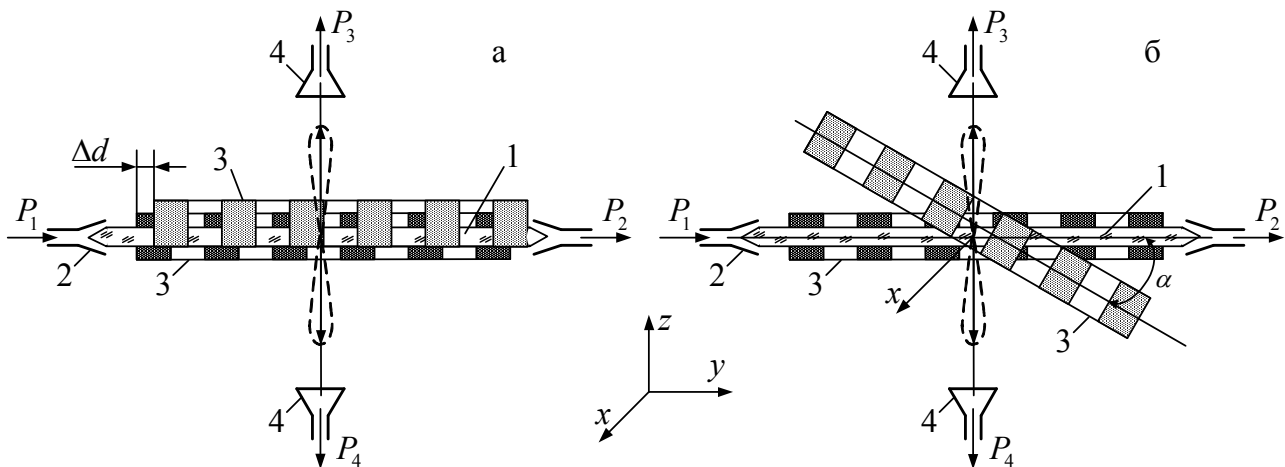


Рис. 9. Схеми виконання ділянок потужності: а – із паралельним переміщенням напівпрозорих дифракційних решіток; б – при кутовому переміщенні дифракційних ґраток. 1 – діелектричний хвилевід, 2 – погоджуючі переходи, 3 – ґратки із брусів, 4 – приймачі випромінювання

На основі аналізу існуючих нанотехнологічних підходів у виробництві електродинамічних і електронних систем ЕВП розглянута можливість реалізації на базі досліджених БКС низьковольтних джерел коливань субміліметрового – інфрачервоного діапазонів хвиль, що володіють більш високими значеннями рівнів потужності на відміну від твердотілих генераторів. Для цих цілей запропоновано використовувати БКС на базі планарних періодичних метало-діелектричних структур.

ВИСНОВКИ

У роботі встановлені загальні закономірності фізики хвильових процесів у багатозв'язних квазіоптичних системах та надані рекомендації щодо використання оптимальних режимів збудження БКС у практичних схемах пристроїв НВЧ.

1. Побудовано схему класифікації багатозв'язних квазіоптичних систем, сформульовано їх визначення, виділені основні об'єкти теоретичних і експериментальних досліджень, а також задачі, розв'язувані в дисертаційній роботі.

2. Розроблено загальну методику й функціональну схему моделювання електромагнітних явищ у БКС, які базуються на перетворенні поверхневих хвиль діелектричного хвилеводу в об'ємні при їх поширенні уздовж періодичних металевих і металодіелектричних структур. Експериментальне моделювання електромагнітних процесів у БКС реалізовано в частотному діапазоні $f = 30 - 80$ ГГц.

3. У результаті системного дослідження випромінювальних структур БКС різних модифікацій встановлений ряд нових ефектів у перетворенні поверхневих хвиль в об'ємні на періодичних неоднорідностях складної конфігурації:

- для дворядних металевих дифракційних ґраток встановлена можливість фазової й амплітудної корекції інтенсивності випромінювання шляхом зсуву їх ламелів відносно поздовжньої осі ДХ, або зміни кутової орієнтації ґраток щодо цієї осі;
- визначено умови резонансного випромінювання при зсуві ламелів напівпрозорих ґраток на величину $\Delta d \approx \lambda/2$ та відбивних решіток при значеннях $\Delta d \approx \lambda/4$;
- для дворядної системи відбивна – напівпрозора ДГ встановлена можливість збільшення інтенсивності трансформації поверхневої хвилі в об'ємну на 30 – 40% порівняно з однорядними системами;
- встановлено кореляцію чисельного і експериментального моделювання на випромінювальних системах із МДС.

4. Показано, що при включенні в об'єм напівсферичного ВР дворядних металевих ДГ смуга пропускання БКС в області резонансної частоти збільшується в 3 – 4 рази при одночасному пригніченні коливань на бічних частотах, що вказує на можливість створення квазіоптичних фільтрів МСМ хвиль.

5. Для БКС із періодичними металодіелектричними структурами встановлена можливість керування частотними та амплітудними характеристиками при зміні їх електродинамічних параметрів.

6. Для хвилеводних БКС, у рамках лінійної теорії підсилювача на ефекті Сміта-Парселла, встановлені межі впливу циклотронного параметра на інкременти наростання амплітуд поля у ВХ. Визначено оптимальні умови формування електромагнітної біжучої хвилі вздовж осі ВХ при різній комбінації конфігурацій дзеркал і випромінювальних структур. Показано можливість розділення потужностей падаючої і відбитої хвиль у результаті їх інтерференції в об'ємі ВХ за наявності двох дифракційно-зв'язаних джерел випромінювання.

7. Запропоновано та реалізовано в експерименті перебудовувані спрямовані відгалужувачі на дифракційно-зв'язаних лініях передачі і ділянки потужності на основі дворядних ДГ, які по своїм параметрам не поступаються існуючим аналогам.

8. Запропоновано схеми джерел випромінювання на основі БКС, визначені межі їх можливої реалізації при переході в субміліметровий – інфрачервоний діапазони хвиль.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Vorobjov G.S. Application of focused charge-particle beams in manufacturing of nanocomponents / G.S. Vorobjov, A.G. Ponomarev, A.A. Ponomareva, A.A. Drozdenko, **A.A. Rybalko** // Telecommunications and Radio Engineering. – 2010. – №69(4) – P. 355–365.
2. Воробьев Г.С. Установка для измерения пространственных и волноводных характеристик периодических металлодиэлектрических структур / Г.С. Воробьев, В.О. Журба, М.В. Петровский, **А.А. Рыбалко** // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – №4 – С. 74 – 76. (English translation: Vorob'ev G.S. A Setup for Measuring Spatial and Waveguide Characteristics of Periodic Metal–Dielectric Structures / G.S. Vorob'ev, V.O. Zhurba, M.V. Petrovskii, and **A.A. Rybalko** // Instruments and Experimental Techniques. – 2010. – Vol. 53, № 4 – P. 536–538.)
3. Воробьев Г.С. Моделирование волновых процессов в открытом волноводе с дифракционно-связанными источниками излучения / Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, В.О. Журба, **А.А. Рыбалко** // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2008. – Т. 51, №11 – С. 3–12. (English translation: Vorobjov G.S. Simulation of wave processes in an open waveguide with diffraction-coupled radiation sources / G.S. Vorobjov, A.S. Krivets, V.O. Zhurba, **A.A. Rybalko** // Radioelectronics and Communications Systems. – 2008. – Vol. 51, № 11 – P. 573–579.)
4. Воробьев Г.С. Экспериментальное моделирование волновых процессов в открытом волноводе с фазовой коррекцией зеркал / Г.С. Воробьев, В.О. Журба,

А.С. Кривец, Ю.А. Крутько, **А.А. Рыбалко** // Радиотехника. – 2008. – Вып. 153. – С. 65–73.

5. Воробьев Г.С. Нерегулярные квазиоптические системы электроники миллиметровых волн / Г.С. Воробьев, В.О. Журба, М.В. Петровский, **А.А. Рыбалко**, Ю.В. Шульга // Журнал нано- та електронної фізики. – 2009. – №1. – С. 42 – 58. (English translation: Vorobjov G.S. Irregular quasi-optical systems of millimeter waves electronics / G.S. Vorobjov, V.O. Zhurba, M.V. Petrovsky, **A.A. Rybalko**, Yu.V. Shulga // J. Nano.- Electron. Phys. – 2009. – №1 – P. 37–51.)

6. Воробьев Г.С. Моделирование пространственных волн распределенных источников излучения на планарных периодических металлодиэлектрических структурах / Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, **А.А. Рыбалко**, Ю.В. Шульга // Всеукраинский межведомственный научно – технический сборник "Радиотехника". – 2009. – № 159 – С. 327 – 335.

7. Воробьев Г.С. Квазиоптический направленный ответвитель на дифракционно-связанных линиях передачи / Г.С. Воробьев, В.О. Журба, А.С. Кривец, Ю.А. Крутько, **А.А. Рыбалко** // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – №4 – С. 110 – 113. (English translation: Vorobjov G.S. A Quasioptical Directional Coupler on Diffraction-Coupled Transmission Lines / G.S. Vorobjov, V.O. Zhurba, A.S. Krivets, Yu.A. Krutko, **A.A. Rybalko** // Instruments and Experimental Techniques. – 2009. – № 4 – P. 110–113.)

8. **Рыбалко А.А.** Анализ эффективности степенных уравнений при описании электронно-волновых процессов в модели усилителя на эффекте Смита-Парселла / **А.А. Рыбалко** // Журнал нано- та електронної фізики. – 2009. – Т.1 №3. – С. 7 – 15.

9. Воробьев Г.С. Режим направленного ответвления мощности в двухзеркальном нерегулярном открытом волноводе миллиметрового диапазона / Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, В.О. Журба, **А.А. Рыбалко**, Ю.В. Шульга // Вісник Сумського державного університету. – 2008. – №2. – С. 191 – 199.

10. Воробьев Г.С. Линейная теория электронно-волновых процессов в усилителе на эффекте Смита-Парселла / Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, В.О. Журба, **А.А. Рыбалко** // Вісник Сумського державного університету. – 2008. – №1 – С. 82 – 102.

11. Электродинамические характеристики излучающих систем устройств дифракционной электроники: материалы 18-й Международной Крымской конференции ["СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии"] (Севастополь, 8-12 сент. 2008 г.) / Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, Ю.А. Крутько, **А.А. Рыбалко**, Ю.В. Шульга. – Севастополь : Вебер. – 2008. – С. 200–201.

12. Режимы возбуждения пространственных волн на планарных периодических металлодиэлектрических структурах: материалы 2-й Международной научной конференции ["Электронная компонентная база. Состояние и перспективы

розвиття"] / Г.С. Вороб'єв, М.В. Петровський, **А.А. Рыбалко**, Ю.В. Шульга. – Харьков-Кацивели – 2009. – С. 23 – 26.

13. Особенности моделирования волновых процессов в излучающих системах квазиоптических открытых волноводов: конф. молодых ученых і аспірантів [«ІЕФ-2009»], (Ужгород, 14-19 травня 2009 р.) / **О.О. Рыбалко**. – Ужгород: Інститут електронної фізики НАН України. – 2009. – С. 31.

14. К вопросу выбора параметров квазиоптических нерегулярных волноводов с квадратичными корректорами: материалы 19-й Международной Крымской конференции ["СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии"] (Севастополь, 2009 г.) / Г.С. Вороб'єв, А.С. Кривец, В.О. Журба, **А.А. Рыбалко**. – Севастополь: Вебер. – 2009. – С. 145–146.

15. Спрямований відгалужувач потужності у відкритому хвилеводі міліметрового діапазону: матеріали Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2009» (Львів, 2009 р) / В.О. Журба, М.В. Петровський, **О.О. Рыбалко**, Ю.В. Шульга. – Львів: ЛНУ ім. І. Франко. – 2009. – Е 11.

16. О влиянии поперечных электронных волн на условия возбуждения колебаний в усилителе Смита-Парселла: материалы 20-й Международной Крымской конференции ["СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии"] (Севастополь, 2010 г.) / Г.С. Вороб'єв, **А.А. Рыбалко**, Ю.В. Шульга. – Севастополь: Вебер. – 2010. – С. 285–286.

17. Застосування метало-діелектричних структур в пристроях електроніки НВЧ: матеріали Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2010» (Львів, 2010 р) /, М.В. Петровський, **О.О. Рыбалко**, Ю.В. Шульга, Ю.О. Рыбалко. – Львів: ЛНУ ім. І. Франко. – 2010. – Е 61.

АНОТАЦІЯ

Рыбалко О.О. Моделирование электромагнитных явищ в багатозв'язних квазіоптичних системах з періодичними неоднорідностями. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2011.

Дисертаційна робота присвячена встановленню загальних закономірностей фізики хвильових процесів в багатозв'язних квазіоптичних системах (БКС), на основі яких дані рекомендації щодо використання оптимальних режимів збудження БКС у практичних схемах приладів НВЧ.

У літературному огляді проаналізовано сучасний рівень розвитку і основні типи класичних багатозв'язних систем, приведена їх класифікація.

Розроблена загальна методика і функціональна схема моделювання електромагнітних явищ в БКС, яка реалізована в частотному діапазоні $f = 30 - 80$ ГГц. У результаті системного дослідження випромінюючих систем БКС різноманітних модифікацій встановлено: можливість фазової і амплітудної корекції інтенсивності випромінювання шляхом зміни координатної і кутової орієнтації двохрядних металевих ґраток, відносно осі діелектричного хвилеводу; визначені умови резонансного випромінювання при зміщенні ламелів напівпрозорих решіток на величину $\Delta d \approx \lambda/2$ і відбивних решіток на $\Delta d \approx \lambda/4$. Показано, що при включенні в об'єм напівсферичного відкритого резонатора двухрядних металевих дифракційних решіток, смуга пропускання БКС в області резонансної частоти зростає в 3-4 рази при одночасному пригніченні коливань на бокових частотах. Встановлені межі впливу циклотронного параметру на інкременти зростання амплітуд поля в відкритому хвилеводі. Запропоновані і реалізовані в експерименті нові схеми пристроїв НВЧ.

Ключові слова: багатозв'язна квазіоптична система, діелектричний хвилевод, дифракційна решітка, дифракційне випромінювання, відкритий резонатор, металодіелектрична структура.

АННОТАЦИЯ

Рыбалко А.А. Моделирование электромагнитных явлений в многосвязных квазиоптических структурах с периодическими неоднородностями. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2011.

Диссертационная работа посвящена установлению общих закономерностей физики волновых процессов в многосвязных квазиоптических системах (МКС), на основе которых даны рекомендации по использованию оптимальных режимов возбуждения многосвязных квазиоптических систем в практических схемах устройств СВЧ.

На основании литературного обзора проанализирован современный уровень развития и основные типы классических многосвязных систем, сформулировано их определение. Приведена классификация таких систем, обозначены основные объекты теоретических и экспериментальных исследований, а также задачи, решаемые в диссертационной работе.

Разработаны общая методика и функциональная схема моделирования электромагнитных явлений в МКС, которые базируются на преобразовании поверхностных волн диелектрического волновода (ДВ) в объемные при их распространении вдоль периодических металлических и металлодиелектри-

ческих структур (МДС). Экспериментальное моделирование электромагнитных процессов в МКС реализовано в частотном диапазоне $f = 30 - 80$ ГГц.

В результате системного исследования излучающих структур МКС различных модификаций установлен ряд новых эффектов в преобразовании поверхностных волн в объемные на периодических неоднородностях сложной конфигурации: для двухрядных металлических дифракционных решеток (ДР) установлена возможность фазовой и амплитудной коррекции интенсивности излучения путем смещения их ламелей относительно продольной оси ДВ, либо изменения угловой ориентации решеток относительно этой оси; определены условия резонансного излучения при смещении ламелей полупрозрачных решеток на величину $\Delta d \approx \lambda/2$ и отражательных решеток при значениях $\Delta d \approx \lambda/4$; для двухрядной системы отражательная – полупрозрачная ДР установлена возможность увеличения интенсивности трансформации поверхностной волны в объемную на 30 – 40% по сравнению с однорядными системами; установлена корреляция численного и экспериментального моделирования на излучающих системах с МДС.

Показано, что при включении в объем полусферического ОР двухрядных металлических ДР, полоса пропускания МКС в области резонансной частоты увеличивается в 3 – 4 раза при одновременном подавлении колебаний на боковых частотах. Для МКС с периодическими металлодиэлектрическими структурами установлена возможность управления частотными и амплитудными характеристиками при изменении их электродинамических параметров.

Для волноведущих МКС в рамках линейной теории усилителя на эффекте Смита-Парселла установлены пределы влияния циклотронного параметра на инкременты нарастания амплитуд поля в открытом волноводе (ОВ). Определены оптимальные условия формирования бегущей электромагнитной волны вдоль оси ОВ при различной комбинации конфигураций зеркал и излучающих систем. Показана возможность разделения мощностей падающей и отраженной волн в результате их интерференции в объеме ОВ при наличии двух дифракционно-связанных источников излучения.

В результате проведенных исследований предложены и реализованы в эксперименте перестраиваемые направленные ответвители на дифракционно-связанных линиях передачи, которые не уступают по параметрам лучшим образцам существующих ответвителей на основе ДВ, а также делители мощности на основе двухрядных ДР. Предложены схемы источников излучения на основе МКС, определена возможность их реализации при переходе в субмиллиметровый – инфракрасный диапазоны волн.

Ключевые слова: многосвязная квазиоптическая система, диэлектрический волновод, дифракционная решетка, дифракционное излучение, открытый резонатор, металлодиэлектрическая структура.

ABSTRACT**Rybalko O.O. Modelling of electromagnetic phenomena in multilinked quasi-optical structures with periodical discontinuities. – Manuscript.**

Thesis for a candidate of physics and mathematics sciences degree, by specialty 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Sumy State University, Sumy, 2011.

Dissertation is devoted to establishment of physics of wave processes in multilinked quasi-optical structures (MQS), on the basis of which recommendations for using best performances of multilinked quasi-optical structures stimulation in practical systems of microwave frequency are given.

On the grounds of literary review modern level of development and basic types of classical multilinked systems are analyzed and their classification is given. The common principles and functional scheme of electromagnetic phenomena modeling in MQS, which is realized in frequency range $f = 30 - 80$ GHz, are worked out. As the result of system investigation of radiant systems MQS of different modifications is established: the possibility of phase and amplitude correction of radiation intensity; conditions of resonance radiation while displacement of translucent grid segments on the magnitude $\Delta d \approx \lambda/2$ and reflecting gratings with the value $\Delta d \approx \lambda/4$. It is shown, that while brining in volume of hemispheric open resonator (OR) two-column metal diffraction grid the bandwidth of MQS in resonator frequency becomes 3-4 times more, while simultaneous suppression of vibrations on side frequency. The influence limits of cyclotron parameter on the increments of field amplitude growth in the open waveguide are determined. New schemes of high frequency devices are proposed and realized in experiment.

Keywords: multilinked quasi-optical structure, dielectric waveguide, diffraction grid, diffraction radiation, open resonator, metal-dielectric structure

Підписано до друку 21.03.2011
Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9.
Тираж 100 пр. Зам. № 347

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.