

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Журба В'ячеслав Олегович

УДК 621.385.6

**МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ У
ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМАХ ПІДСИЛЮВАЧА НА
ЕФЕКТИ СМІТА-ПАРСЕЛЛА**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2009

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,
професор кафедри фізичної електроніки.

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

доктор фізико-математичних наук, доцент
Старостенко Володимир Вікторович,
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського,
зав. кафедри радіофізики та електроніки.

Захист відбудеться « 19 » червня 2009 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 « 14 » травня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.С. Опанасюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останніми роками значна увага приділяється можливості створення нового типу підсилювача міліметрового і субміліметрового (МСМ) діапазонів хвиль, принцип дії якого базується на використанні випромінювання Сміта-Парселла (дифракційного випромінювання), що виникає унаслідок руху нерелятивістського пучка електронів в об'ємі нерегулярних відкритих хвилеводів різних модифікацій. Загальним для таких систем є наявність відкритого хвилеводу (ВХ), що містить розподілене джерело випромінювання типу дифракційна ґратка (ДГ) – електронний потік (ЕП) або ДГ – діелектричний хвилевод (ДХ). При цьому основоположним чинником у питанні ефективного підсилення електромагнітних коливань є оптимізація параметрів електродинамічної системи ВХ з погляду максимального перетворення енергії ЕП в енергію НЧ-коливань і виведення її у навантаження з мінімальними втратами. Проте до цього часу недостатньо вивчені електродинамічні характеристики ВХ з фазовою корекцією дзеркал, а також характеристики нових модифікацій ВХ: ВХ з діелектричним шаром і відбивною ДГ та ВХ з планарною періодичною металодіелектричною структурою (МДС).

Тому питання системного аналізу електронно-хвильових процесів шляхом подальшого розвитку теорії підсилювача на ефекті Сміта-Парселла і дослідження електродинамічних характеристик нерегулярних ВХ нових модифікацій є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у науково-дослідній лабораторії «Нові технології в 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 держбюджетних тем: «Хвильові процеси у відкритих електродинамічних системах при русі нерелятивістських електронів уздовж періодичних металодіелектричних структур» № 0103U000776 (2003 – 2005 рр.); «Фізика хвильових процесів у відкритих хвилеводно-резонаторних металодіелектричних системах з розподіленими джерелами випромінювання» № 0106U001931 (2006 – 2008 рр.).

Мета та задачі дослідження. Мета даного дослідження – встановити загальні фізичні закономірності хвильових і електронно-хвильових процесів у різних модифікаціях електродинамічних систем підсилювача на ефекті Сміта-Парселла і дати на цій основі практичні рекомендації для реалізації нових пристроїв МСМ діапазону хвиль.

Згідно з цим у роботі вирішені наступні задачі:

- у лінійному наближенні розвинена теоретична модель підсилювача на ефекті Сміта-Парселла з урахуванням кінцевої величини фокусуємого магнітного поля електронного потоку;

- отримані і проаналізовані загальне трансцендентне дисперсійне рівняння, що враховує вплив поздовжніх і поперечних електронних хвиль на характеристики підсилювача та наближені дисперсійні рівняння аналітичного вигляду, що дозволяють наочно продемонструвати фізику хвильових процесів;
- модифікована і вдосконалена експериментальна установка з моделювання просторового заряду ЕП поверхневими хвилями ДХ, яка дозволяє досліджувати просторові і хвилеводні характеристики електродинамічних систем різних модифікацій;
- у міліметровому діапазоні довжин хвиль проведено чисельний аналіз і експериментальне моделювання хвильових процесів у нерегулярних ВХ та їх елементах при зміні геометричних і електродинамічних параметрів.

Об'єкт дослідження – хвильові процеси в електродинамічній системі підсилювача на ефекті Сміта-Парселла.

Предмет дослідження – дисперсійні рівняння, просторові і хвилеводні характеристики різних модифікацій електродинамічних систем підсилювача.

Згідно з поставленими завданнями використовуються такі методи досліджень:

- метод заданого струму і самоузгодженого розв'язання задач вакуумної електроніки;
- ітераційний метод Ньютона і метод графічної апроксимації;
- методи чисельного аналізу і експериментального моделювання хвильових процесів у нерегулярних квазіоптичних системах: векторна теорія резонансних систем, метод кінцевих різниць, метод експериментального моделювання хвильових процесів при використанні як джерела випромінювання поверхневих хвиль діелектричних хвилеводів;
- класичні методи вимірювання просторових і хвилеводних характеристик електромагнітних полів, наприклад, методи рухомої антени і активного зонда та метод панорамного вимірювання S -параметрів;

Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертаційній роботі удосконалена лінійна теоретична модель підсилювача на ефекті Сміта-Парселла, досліджені хвильові процеси у нерегулярних квазіоптичних хвилеводно-діелектричних структурах, які є основою при створенні електровакуумних підсилювачів і елементної бази різних пристроїв МСМ-діапазону хвиль. Отримано такі нові результати:

– шляхом урахування впливу фокусуєчого магнітного поля на електронно-хвильові процеси, розвинена лінійна самоузгоджена теорія моделі підсилювача на ефекті Сміта-Парселла, отримано і проаналізовано загальне трансцендентне дисперсійне рівняння, при цьому встановлено, що в процесі енергообміну основний внесок робить повільна хвиля просторового заряду, внесок швидких і циклотронних хвиль – незначний;

– вперше показана можливість реалізації режиму біжучої хвилі у ВХ, при використанні дзеркал з квадратичною корекцією і дифракційним зв'язком випромінюючих апертур, експериментально встановлені інтервали оптимальних

значень радіусів R кривизни циліндричних дзеркал ($4\lambda \leq 2R \leq 6\lambda$, де λ – довжина хвилі випромінювання);

– вперше шляхом чисельного аналізу і експериментального моделювання комплексно досліджені електродинамічні характеристики відкритих хвилеводів з планарними періодичними металодіелектричними структурами, показано, що такі структури можуть бути використані при створенні низьковольтних приладів дифракційної електроніки в інтегральному виконанні для значень напруги прискорення в інтервалі $400 \text{ В} < U < 1200 \text{ В}$;

– показана можливість інтерференційної селекції прямої і зворотної хвиль у відкритому хвилеводі, на підставі чого вперше запропонований і досліджений перестроюваний квазіоптичний спрямований відгалужувач на дифракційно-зв'язаних лініях передачі, який за своїми параметрами перевершує аналогічні пристрої на зв'язаних діелектричних хвилеводах: перехідне ослаблення $3 \div 10$ дБ при спрямованості близько 30 дБ.

Практичне значення отриманих результатів. Результати лінійної теорії і чисельного аналізу хвильових процесів у нерегулярних квазіоптичних хвилеводних системах є основою для побудови нелінійної теорії та оптимізації параметрів підсилювача на ефекті Сміта-Парселла. Результати експериментальних досліджень квазіоптичних нерегулярних хвилеводів можуть бути використані при створенні багатофункціональних пристроїв МСМ-діапазону хвиль: роздільників і спрямованих розгалужувачів потужності та ін. У даний час результати дисертаційної роботи і створена експериментальна база використовуються при викладанні спеціальних навчальних курсів для студентів і магістрантів за фаховим спрямуванням «Мікро- і наноелектроніка», а також частково внесені до звітів, зазначених вище держбюджетних тем.

Особистий внесок здобувача. В основних роботах, виконаних у співавторстві, автор брав участь: у поставленні завдань, визначених керівником; теоретичних і експериментальних дослідженнях; створенні експериментальних установок та їх вузлів; обговоренні результатів і написанні статей. Особисто авторові належать такі результати: [1,5] – аналіз літературних джерел за темою огляду, узагальнення теоретичних і експериментальних результатів, написання двох розділів оглядових статей; [2,3,4,8] – розроблення, монтаж і модифікація експериментального стенда, проведення експериментів, участь в обробці й аналізі результатів досліджень, написання матеріалів публікацій; [6,7] – участь у формулюванні та розв'язанні задач лінійної самоузгодженої теорії, розробленні обчислювальних програм і проведенні чисельного аналізу електронно-хвильових процесів; [9-15] – аналіз літературних джерел, розроблення методики вимірювань, чисельні й експериментальні дослідження електродинамічних характеристик відкритих хвилеводів, обробка і систематизація отриманих результатів. Особисто автором підготовлені роботи [9,11,15]. Детальніше власний внесок відображений у списку опублікованих праць.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові і практичні результати роботи доповідалися і обговорювалися на таких національних і міжнародних семінарах, конференціях і симпозиумах: The sixth international kharkov symposium on physics and engineering “MSMW’07” (Kharkov – 2007); Харківській нанотехнологічній асамблеї-2007 (м. Харків – 2007 р.); 15-й – 18-й Міжнародних Кримських конференціях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (м. Севастополь – 2005-2008 рр.); Міжнародних конференціях студентів і молодих вчених з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2006», «ЕВРИКА-2008» (м. Львів – 2006 р., 2008 р.); конференції молодих вчених і аспірантів «ІЕФ-2007» (м. Ужгород – 2007 р.); щорічних Науково-технічних конференціях співробітників, викладачів і студентів СумДУ.

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 18 наукових працях, зокрема, 8 статей у спеціалізованих журналах, що входять до переліку ВАК України, і 10 тезах матеріалів конференцій і симпозиумів.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи – 159 сторінок, 49 рисунків, 1 таблиця. Список використаних джерел налічує 143 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, внеску здобувача в основні публікації, а також відомості щодо кількості публікацій та структури дисертації.

У **першому розділі** «Нерегулярні квазіоптичні електродинамічні системи в електроніці міліметрових і субміліметрових хвиль», який має оглядовий характер, проаналізовано сучасний рівень розвитку нерегулярних квазіоптичних систем, які застосовуються в електроніці і техніці МСМ-діапазонів хвиль. Подана схема класифікації таких систем, яка визначає місце дисертаційної роботи за даним напрямом досліджень (рис. 1). Визначене коло питань, яке не було вирішене до початку виконання даної роботи. Показано, що недостатньо вивченими, з погляду оптимізації електродинамічних параметрів, є такі питання: розвиток теорії підсилювача з урахуванням впливу фокусуєчого магнітного поля на електронно-хвильові процеси; вплив фазової корекції дзеркал на хвильові процеси у відкритому хвилеводі; встановлення фізики хвильових процесів у ВХ з двома дифракційно-зв’язаними джерелами випромінювання, а також у ВХ з планарними періодичними МДС. Намічені шляхи вирішення поставлених задач, а також визначені об’єкти теоретичних і експериментальних досліджень, основні з яких наведені на рис. 2: ВХ з відбивною ДГ (а); ВХ з діелектричним шаром (б); ВХ з планарною періодичною МДС (в); ВХ з дифракційно-зв’язаними джерелами випромінювання (г).

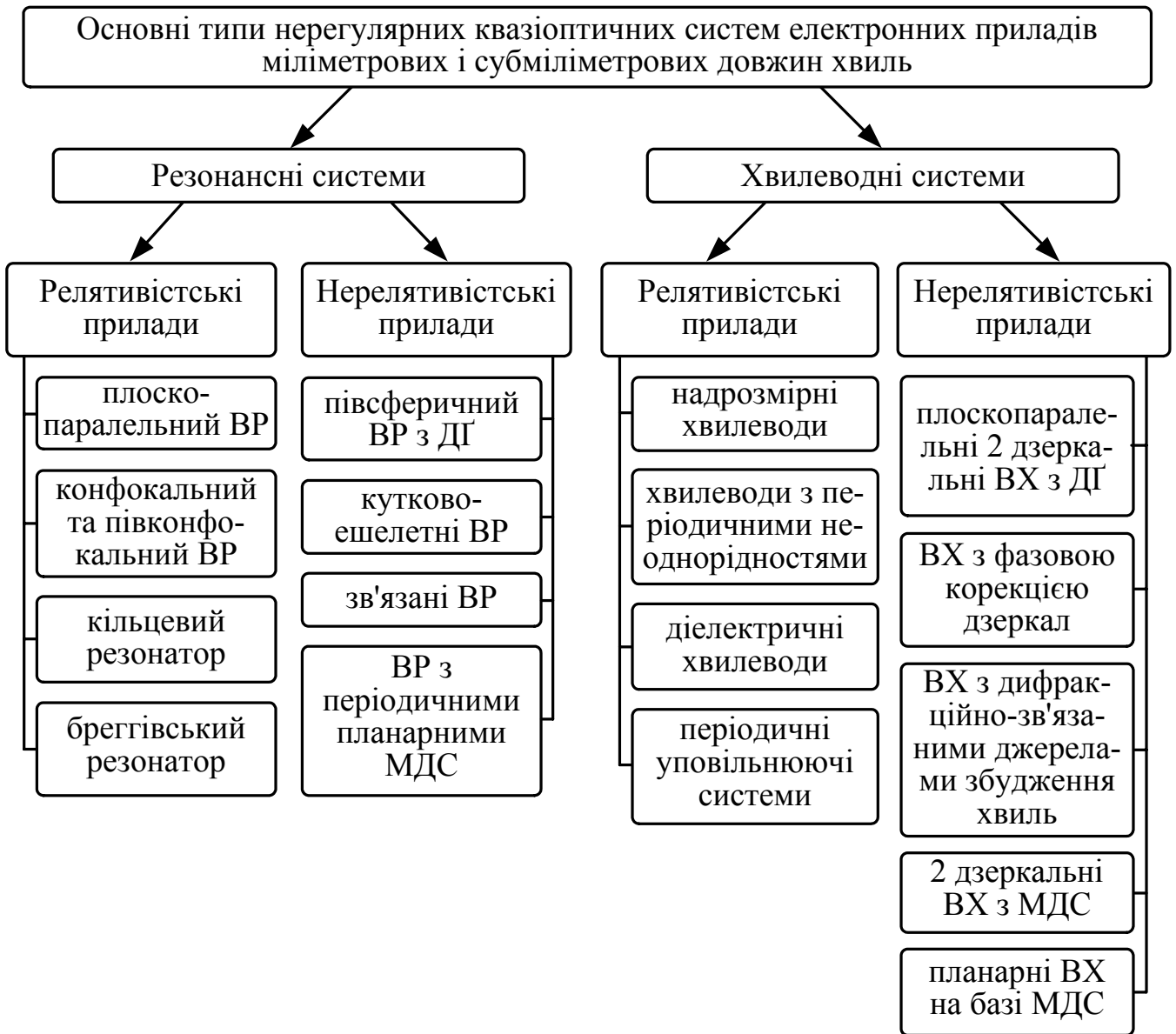


Рис. 1. Класифікація нерегулярних квазіоптичних систем, які застосовуються в електроніці та техніці міліметрових і субміліметрових довжин хвиль

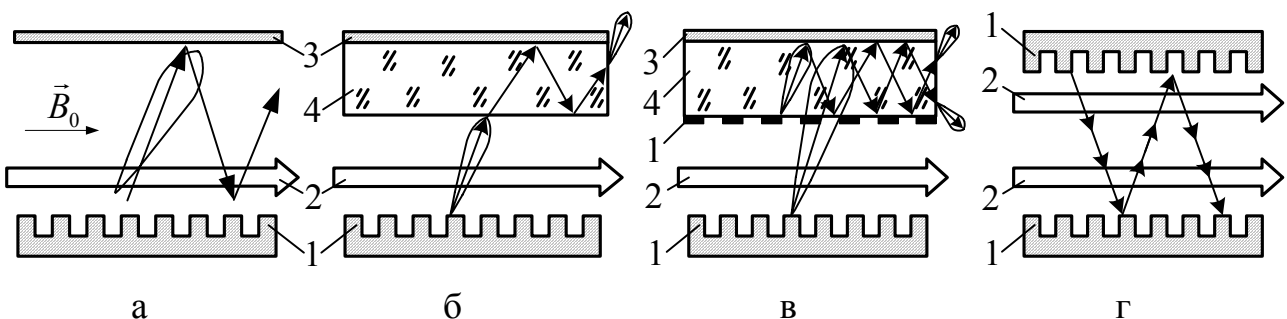


Рис. 2. Схеми досліджуваних нерегулярних квазіоптичних систем:

- 1 – дифракційні ґратки – відбивна або стрічкова;
- 2 – розподілене джерело випромінювання – ЕП або ДХ;
- 3 – металевий екран або дзеркало з фазовою корекцією;
- 4 – діелектричний шар

У другому розділі «Методи моделювання хвильових процесів у нерегулярних квазіоптичних системах» стисло викладені чисельні й експериментальні методи моделювання електромагнітних полів у нерегулярних квазіоптичних системах пристроїв МСМ-діапазонів: векторна теорія резонансних систем, яка дозволяє визначити частоти типів коливань при зміні геометрії систем або внесені до їх об'єму діелектричного шару; метод кінцевих різниць, який використовується при чисельному моделюванні просторових і хвилеводних характеристик електродинамічних систем і дає збіг теоретичних та експериментальних результатів; ітераційний метод Ньютона, що добре зарекомендував себе при розв'язанні трансцендентних дисперсійних рівнянь; метод експериментального моделювання хвильових процесів при використанні як джерела випромінювання поверхневих хвиль ДХ. Описана методика вимірювань і схеми експериментальних установок, одна з яких наведена на рис. 3. Проведена класифікація електронних хвиль, вибрані основні співвідношення для розрахунку кутів і зон при моделюванні дифракційного і черенковського випромінювань, обґрунтована доцільність використання самоузгодженого методу у поєднанні з методом експериментального моделювання при розв'язанні задач оптимізації систем підсилювача на ефекті Сміта-Парселла.

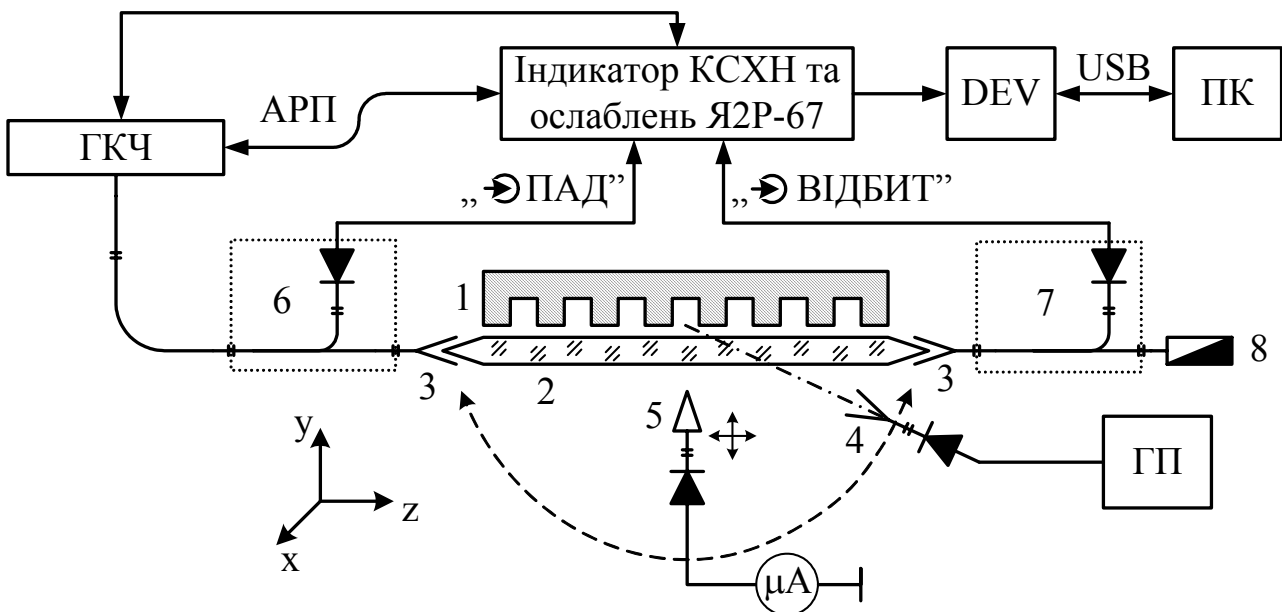


Рис. 3. Експериментальна установка для вимірювання просторових і амплітудних характеристик випромінювальних систем нерегулярних ВХ: 1 – ДГ; 2 – ДХ; 3 – узгоджувальні переходи; 4 – приймальний рупор; 5 – зонд; 6, 7 – детекторні секції панорамного вимірника; 8 – узгоджене навантаження

У третьому розділі «Лінійна теорія електроно-хвильових процесів у підсилювачі на ефекті Сміта-Парселла» розвинена лінійна двовимірна теорія електронно-хвильових процесів у підсилювачі на ефекті Сміта-Парселла (рис. 4), що враховує вплив магнітного поля на умови збудження коливань у відкритому хвилеводі. Розв'язання електродинамічної задачі проводилося методом часткових областей у поєднанні з методом розкладу в ряд Фур'є.

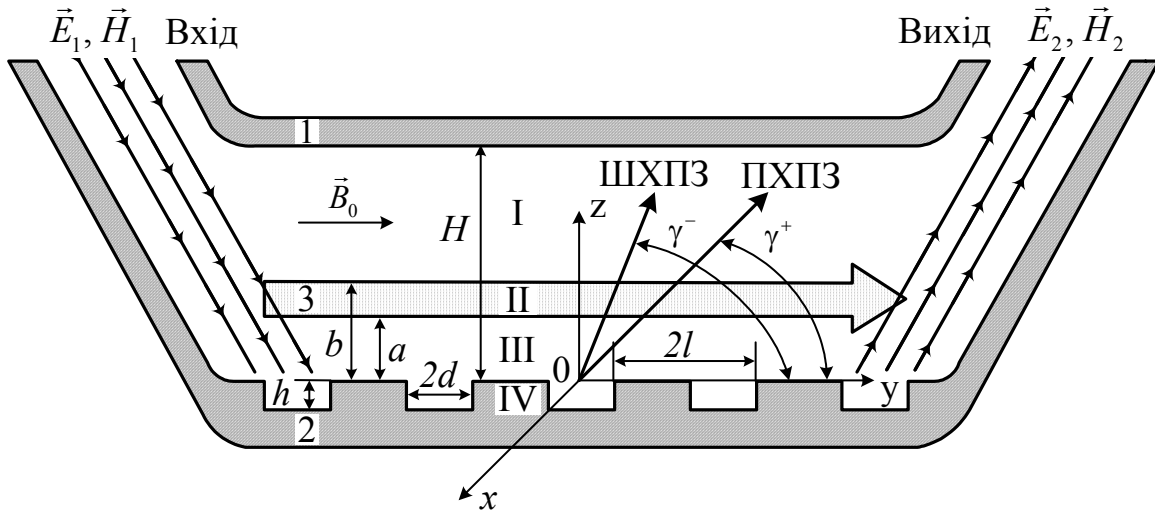


Рис. 4. Модель підсилювача на ефекті Сміта-Парселла: 1 – верхнє дзеркало; 2 – дифракційна ґратка; 3 – електронний потік; ШХПЗ – швидка хвиля просторового заряду; ПХПЗ – повільна хвиля просторового заряду; γ^- , γ^+ – кути випромінювання

Поле у кожній області визначалося виходячи із системи рівнянь Максвелла та необхідних граничних умов. У лінійному наближенні отримано рівняння, яке зв'язує змінну складову конвекційного струму з полем електронного потоку. Розв'язуючи його спільно з рівняннями електромагнітних полів у всьому просторі взаємодії, за умови максимальної взаємодії електронного потоку з полями періодичної структури, отримано трансцендентне дисперсійне рівняння загального вигляду (1) й аналітично наближені рівняння.

$$1 + \frac{k}{ld} \operatorname{tg}(kh) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2 \alpha_n d}{\alpha_n^2 \xi_n} \left[\frac{S_n [1 - S_n \operatorname{tg} \xi_n (H - b) \operatorname{tg} \xi_{cn} \Gamma_{cn} (b - a)] \cos \xi_n a - S_n [1 - S_n \operatorname{tg} \xi_n (H - b) \operatorname{tg} \xi_{cn} \Gamma_{cn} (b - a)] \cos \xi_n a +}{- [S_n \operatorname{tg} \xi_n (H - b) + \operatorname{tg} \xi_{cn} \Gamma_{cn} (b - a)] \sin \xi_n a} \right] = 0, \quad (1)$$

де k – хвильове число;

$\alpha_n = \alpha_0 + \pi n / l$ – коефіцієнт поширення просторових гармонік з індексом n ;

$\xi_n = \sqrt{k^2 - \alpha_n^2}$; $S_n = \Gamma_{cn} \xi_n / \xi_{cn}$.

Функції ξ_{cn} і Γ_{cn} залежать від електродинамічних параметрів хвилеводу, а добуток $\xi_{cn}^2 \Gamma_{cn}^2$ є ефективною діелектричною проникністю електронного пучка у подовжньому магнітному полі кінцевої величини.

Для цієї моделі проаналізовано вплив основних електродинамічних параметрів відкритого хвилеводу на електронно-хвильові процеси. Визначені області зміни параметрів під час реалізації режимів поперечного резонансу, об'ємної біжучої хвилі і поверхневих хвиль. Проведено теоретичний аналіз особливостей впливу параметрів електродинамічної системи підсилювача на

електронно-хвильові процеси. Показано, що при зміні відстані між ґраткою і металевим дзеркалом, відбувається зміна кутів випромінювання та фазової швидкості хвилі, тобто шляхом вибору параметрів періодичної структури, зокрема її періоду, можна реалізувати режими як об'ємних, так і поверхневих хвиль. Досліджено вплив діелектричного шару на умови поширення хвиль у хвилеводі та їх взаємодії з хвилями просторового заряду ЕП, встановлено, що зростання значень діелектричної проникності ϵ приводить до збільшення кількості хвиль, що поширюються у відкритому хвилеводі, зміни їх фазових швидкостей і кутів випромінювання. Встановлена можливість виведення енергії з об'єму хвилеводу через поверхневу хвилю діелектричного шару, розміщеного на верхньому дзеркалі. Проведений якісний аналіз впливу основних електродинамічних параметрів відкритого хвилеводу на коефіцієнт підсилення хвилі у досліджуваній системі.

У четвертому розділі «Моделювання хвильових процесів у електродинамічних системах підсилювача на ефекті Сміта-Парселла» наведені результати чисельного аналізу та експериментального моделювання хвильових процесів у електродинамічних системах підсилювача на ефекті Сміта-Парселла як для основних випромінюючих елементів, так і для нерегулярних відкритих хвилеводів у цілому.

Для випромінювальних систем встановлена кореляція результатів експерименту і чисельного аналізу методом кінцевих різниць. Проведено порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень просторових і хвилеводних характеристик ВХ міліметрового діапазону хвиль з циліндричною і плоскою геометрією дзеркал (рис. 5). Показана можливість значного зменшення дифракційних втрат у хвилеводі з циліндричними дзеркалами (рис. 2г), при формуванні біжучої хвилі у порівнянні з плоско-паралельною системою. Визначені оптимальні режими

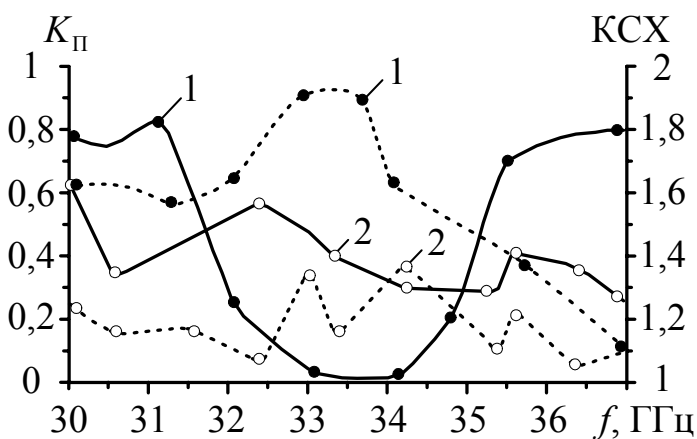


Рис. 5. Порівняльний аналіз хвилеводних характеристик плоско-паралельних (1) і плоско-циліндрових (2) ВХ з одним джерелом випромінювання: суцільні лінії – коефіцієнт стоячої хвилі, пунктир – коефіцієнт передачі

поширення об'ємних хвиль в таких системах і розроблені рекомендації для їх практичної реалізації в електроніці і техніці МСМ-хвиль. Показано, що практичний інтерес при реалізації підсилювача на ефекті Сміта-Парселла становлять також планарні періодичні МДС, які можуть бути внесені як в об'єм ВХ (рис. 2 в), з метою розширення його функціональних можливостей, так і використовуватися самостійно при розв'язанні задач мікромініатюризації пристроїв електроніки НВЧ. Розглянута загальна схема збудження дифракційно-

черенковського випромінювання (ДЧВ) з використанням планарної періодичної МДС, а також встановлена можливість управління хвильовими процесами шляхом зміни товщини діелектричного шару і параметрів смужкових дифракційних ґраток, нанесених на діелектрик. Показано, що для системи МДС–відбивна ДГ істотно змінюються амплітудні розподіли ближніх полів: уздовж поздовжньої осі формується квазібіжуча хвиля з рівномірним розподілом амплітуди поля по всій довжині ВХ, у поперечному перерізі спостерігається збільшення концентрації поля на периферії дзеркал ВХ, що дозволяє ефективніше трансформувати енергію збуджуваних у системі об’ємних хвиль.

У п’ятому розділі «Практичне застосування результатів досліджень» розглянуто приклади реалізації отриманих вище результатів досліджень у практичних схемах пристроїв НВЧ. На прикладі відкритого хвильоводу з двома дифракційно-зв’язаними джерелами випромінювання типу ДГ–ЕП і ДГ–ДХ, наведена можливість підсилення електромагнітної хвилі. З використанням раніше проведених досліджень наведені оцінки параметрів такої системи для реалізації умов підсилення хвилі. Проаналізовано результати досліджень макета підсилювача, який було реалізовано у чотириміліметровому діапазоні хвиль співробітниками ІРЕ НАН України: результати залежності коефіцієнта підсилення від частоти і струму пучка дозволили спостерігати збільшення амплітуди вихідного сигналу по відношенню до вхідного на 3÷4 дБ у смузі частот до 2 ГГц. Встановлено, що низька ефективність підсилення була обумовлена обмеженням довжини взаємодії у даній конструкції ВХ використовуваною магнітною фокусуючою системою. Для режиму аномального дифракційного випромінювання (АДВ), проведені оцінки параметрів МДС, які свідчать про можливість створення низьковольтних приладів дифракційної електроніки в інтегральному виконанні. На підставі цього розглянуто схеми можливої реалізації генератора і підсилювача з використанням планарних МДС у режимі збудження АДВ, які наведені на рис. 6.

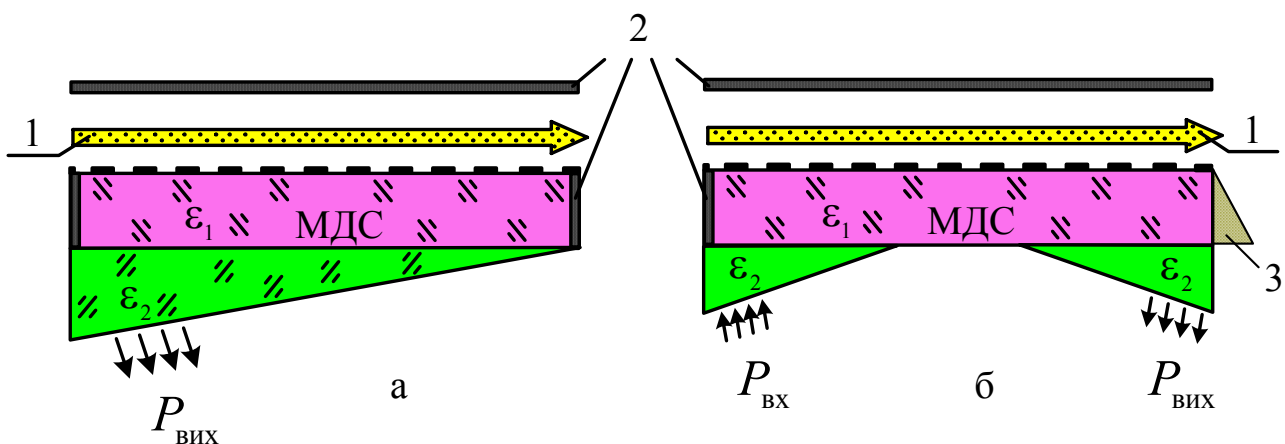


Рис. 6. Схеми реалізації генератора (а) і підсилювача (б) на планарних МДС у режимі АДВ: 1 – ЕП; 2 – металеві екрани; 3 – поглинач

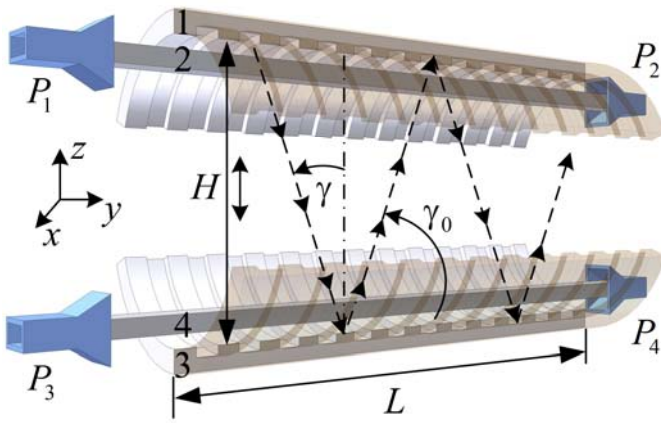


Рис. 7. Спрямований відгалужувач на базі ВХ з циліндричними дзеркалами: 1 і 3 – ДГ; 2 і 4 – ДХ

результаті поширення цих хвиль уздовж поздовжньої осі СВ відбуваються обміни енергією між випромінювачами та відгалуження частини потужності у вторинний канал. На рис. 8 наведені основні характеристики СВ: а – залежності потужності, що передається (1) і відгалуженої потужності (2) у заданому діапазоні частот; б – залежності перехідного ослаблення (1) і спрямованості (2).

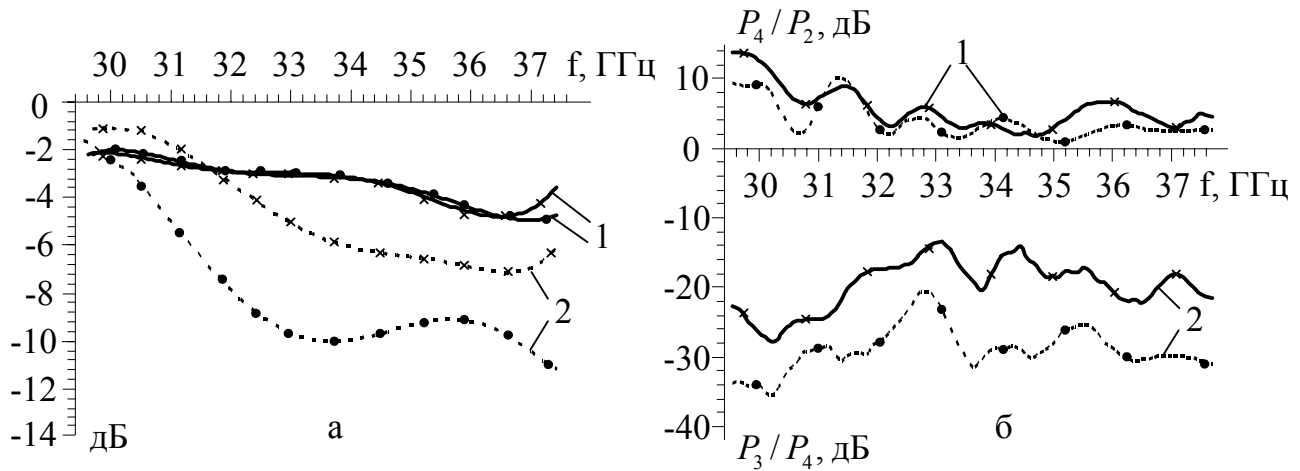


Рис. 8. Основні характеристики відгалужувача на дифракційному зв'язку для двох відстаней між дзеркалами: $H = 65$ мм – (\times), $H = 80$ мм – (\bullet)

Основною перевагою відгалужувача на дифракційному зв'язку є можливість плавного регулювання перехідного ослаблення у межах $3 \div 10$ дБ при спрямованості близько 30 дБ у проміжку значень $H = (5 \div 10)\lambda$.

На базі нерегулярного ВХ з дифракційним зв'язком джерел випромінювання запропонована і досліджена конструкція квазі-оптичного спрямованого відгалужувача (СВ). На рис. 7 показаний загальний вигляд спрямованого відгалужувача і схема його реалізації на базі ВХ з циліндричними дзеркалами. Принцип дії спрямованого відгалужувача з дифракційним зв'язком полягає у збудженні синфазних і протифазних просторових хвиль у ВХ. У

ВИСНОВКИ

У результаті виконання роботи були встановлені загальні закономірності фізики хвильових процесів у електродинамічних системах підсилювача на ефекті Сміта-Парселла.

1. Здійснена класифікація нерегулярних квазіоптичних систем, які використовуються в електроніці і техніці міліметрових і субміліметрових довжин хвиль. Визначені основні об'єкти теоретичних і експериментальних досліджень.

2. Показано, що при аналізі електронно-хвильових процесів у нерегулярних квазіоптичних системах підсилювача на ефекті Сміта-Парселла доцільне розв'язання лінійної задачі електроніки в самоузгодженому поставленні з використанням результатів формування просторових гармонік випромінювання в наближеннях заданого струму і заданого поля.

3. Побудована лінійна двовимірна самоузгоджена теоретична модель підсилювача на ефекті Сміта-Парселла. Отримано і проаналізовано трансцендентне дисперсійне рівняння, що враховує вплив всього спектра електронних хвиль на характеристики підсилювача. Встановлено, що у лінійному наближенні швидка хвиля просторового заряду та поперечні циклотронні хвилі роблять незначний вплив на енергообмін електронів з об'ємною хвилею відкритого хвилеводу.

4. Експериментально встановлені загальні фізичні закономірності хвильових процесів у відкритих плоско-паралельних і циліндричних хвилеводах. Встановлено, що система плоско-паралельного хвилеводу (довжина $L \geq 10\lambda$) при відстанях між дзеркалами близько декількох довжин хвиль має резонансні властивості, які виявляються у низьких значеннях коефіцієнтів проходження ($K_{\text{п}} = 0,1 \div 0,4$) і високих – коефіцієнтів стоячої хвилі ($K_{\text{СХ}} = 1,7 \div 2,2$). При цьому у такій системі можлива організація квазіоптичного виведення енергії через діелектричний екранований шар, що виконує функцію дзеркала відкритого хвилеводу. Значне поліпшення хвилеводних параметрів відкритого хвилеводу може бути досягнуте шляхом застосування циліндричних дзеркал (дзеркал з квадратичною корекцією), що дозволяє реалізувати у досліджуваній системі режим біжучої хвилі. Для таких систем експериментально встановлені інтервали оптимальних значень радіусів R кривизни циліндричних дзеркал ($4\lambda \leq 2R \leq 6\lambda$, де λ – довжина хвилі випромінювання).

5. За наявності у відкритому хвилеводі двох дифракційно-зв'язаних джерел випромінювання показана можливість ефективної селекції прямої і зворотної хвиль, що може бути використана при створенні квазіоптичних розділювачів потужності та спрямованих відгалужувачів.

6. Чисельно й експериментально промодельовані режими хвильових процесів у планарних металодіелектричних структурах. Встановлена можливість керування хвильовими процесами шляхом зміни товщини діелектричного шару і параметрів стрічкових дифракційних ґраток.

7. Проведені оцінки параметрів металодіелектричних структур під час практичної реалізації режимів аномального дифракційного випромінювання в генераторних і підсилювальних пристроях надвисоких частот, які свідчать про можливість створення низьковольтних приладів дифракційної електроніки в інтегральному виконанні для значень напруги прискорення $400 \text{ В} < U < 1200 \text{ В}$.

8. З використанням нерегулярного відкритого хвилеводу з двома дифракційно-зв'язаними випромінюючими апертурами запропонована і реалізована конструкція перестроюваного спрямованого відгалужувача. Встановлено, що такий відгалужувач за своїми параметрами (перехідне ослаблення $3 \div 10$ дБ при спрямованості близько 30 дБ) у міліметровому діапазоні хвиль перевершує існуючі типи відгалужувачів на діелектричних хвилеводах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Vorobyov G. S. Perspectives of application of new modifications of resonant quasi-optical structures in EHF equipment and electronics / G.S. Vorobyov, M.V. Petrovsky, A.I. Ruban, **V.O. Zhurba**, O.I. Belous, A.I. Fisun // Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – №66(20). – P. 1839–1862. *Особистий внесок: аналіз окремих літературних джерел, підготовка першого розділу статті.*
2. 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. *Особистий внесок: створення та налагодження експериментальної установки, проведення досліджень електродинамічних характеристик випромінювальних систем та відкритих хвилеводів, написання підпунктів 1, 2.*
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. *Особистий внесок: розроблення методики експерименту та вузлів установки, проведення вимірювань просторових та хвилеводних характеристик досліджуваних систем, участь у написанні статті.*
4. Воробьев Г. С. Влияние свойств диэлектрического слоя на спектральные и резонансные характеристики открытых резонаторов / Г. С. Воробьев, М. В. Петровский, **В. О. Журба** // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – №2(37). – С. 30–34. *Особистий внесок: проведення теоретичного аналізу частотних характеристик відкритих резонаторів, обробка та опис експериментальних досліджень.*
5. Воробьев Г. С. Резонансные квазиоптические структуры в технике и электронике КВЧ (обзор) / Г. С. Воробьев, М. В. Петровский, **В. О. Журба** // Вісник Сумського державного університету. – 2006. – № 6(90). – С. 5–21. – (Серія «Фізика, математика, механіка»). *Особистий внесок: участь у проведенні аналізу методів експериментальних досліджень та розрахунків параметрів резонансних квазіоптичних структур, підготовка розділу 1 та частини розділу 2.*
6. Приближенный анализ коэффициента усиления волны в усилителе на эффекте Смита-Парселла / А. С. Кривец, О. В. Ющенко, **В. О. Журба**, А. А. Рыбалко // Вісник Сумського державного університету. – 2007. – №1. – С. 125–130. – (Серія «Фізика, математика, механіка»). *Особистий внесок: аналіз літературних джерел та чисельних розрахунків, модифікація обчислювальних програм, отримання графічних рішень.*
7. 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. – (Серія

«Фізика, математика, механіка»). *Особистий внесок: аналіз методів розв'язання трансцендентних рівнянь, розроблення методики спрощення та уточнення рівнянь, чисельний аналіз дисперсійних трансцендентних рівнянь, написання підрозділів 1 та 2.*

8. 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. – (Серія «Фізика, математика, механіка»). *Особистий внесок: розроблення вузлів установки та методики вимірювань, проведення вимірювань характеристик спрямованого відгалужувача, обробка отриманих результатів та опис експерименту.*

9. Effect of focusing magnetic field on electron-wave processes in amplifier on Smith-Parsell effect : Simpozium Proceedings [“The Sixth International Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter, and submillimeter waves”], (Kharkov, June, 25-30, 2007) / **Zhurba V.O.**, Krivets A.S. – Kharkov : IRE NAS of Ukraine, 2007. – P. 583–585. *Особистий внесок: участь у розробленні теоретичної моделі та її описання, узагальнення та порівняння отриманих результатів, виступ зі стендовою доповіддю під час роботи симпозіуму.*

10. Перспективы использования пространственно-развитых резонансных структур в дифракционной электронике : материалы 15-й Международной Крымской конференции [«СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»], (Севастополь, 10-14 сент. 2005 г.) / Г. С. Воробьев, М. В. Петровский, **В. О. Журба**, Ю. А. Крутько. – Севастополь : Вебер, 2005. – С. 265–266. *Особистий внесок: аналіз літературних джерел, участь у проведенні експерименту, обговоренні та опису отриманих результатів.*

11. Особенности резонансных квазиоптических структур в технике и электронике КВЧ : материалы 16-й Международной Крымской конференции [“СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии”] (Севастополь, 11-15 сент. 2006 г.) / Г. С. Воробьев, М. В. Петровский, **В. О. Журба**. – Севастополь : Вебер. – 2006. – С. 276–277. *Особистий внесок: узагальнення отриманих результатів і написання тез доповіді.*

12. О влиянии диэлектрического слоя на электродинамические характеристики открытых резонаторов : материалы 17-й Международной Крымской конференции [“СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии”] (Севастополь, 10-14 сент. 2007 г.) / Г. С. Воробьев, М. В. Петровский, **В. О. Журба**. – Севастополь : Вебер. – 2007. – С. 145–146. *Особистий внесок: участь у розробленні обчислювальних програм і проведення чисельного аналізу, написання змісту тез доповіді англійською мовою, виступ з доповіддю на засіданні конференції.*

13. Электродинамические характеристики нерегулярного открытого волновода с фазовой коррекцией зеркал : материалы 18-й Международной Крымской конференции ["СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии"] (Севастополь, 8-12 сент. 2008 г.) / Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, **В.О. Журба**, А.А. Рыбалко. – Севастополь : Вебер. – 2008. – С. 169–170. *Особистий внесок: розроблення експериментальної установки та проведення експерименту, узагальнення та порівняння отриманих результатів.*

14. Воробьев Г. С. О возможности применения планарных резонансных периодических структур при микроминиатюризации устройств электроники СВЧ / Г. С. Воробьев, М. В. Петровский, **В. О. Журба**, А. И. Цвык // Харьковская нанотехнологическая Ассамблея-2007. – Харьков : ННЦ «ХФТИ», ИПЧ «Контраст». – 2007. – Т. 2. – С. 133–137. *Особистий внесок: участь у аналізі параметрів металодіелектричних структур і проведенні розрахунків, а також участь у обговоренні отриманих результатів та написанні матеріалів праці.*

15. Автоматизация измерений пространственных и волноводных характеристик электродинамических систем устройств дифракционной электроники : конф. молодых ученых і аспірантів [«ІЕФ-2007»], (Ужгород, 14-19 травня 2007 р.) / **В. О. Журба**, М. В. Петровский. – Ужгород : Інститут електронної фізики НАН України. – 2007. – 124 с. *Особистий внесок: розроблення систем автоматичного вимірювання просторових та хвилеводних характеристик електродинамічних систем, написання тез доповіді, виступ з докладом на засіданні конференції.*

АНОТАЦІЯ

Журба В.О. Моделювання хвильових процесів у електродинамічних системах підсилювача на ефекті Сміта-Парселла. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2009.

Дисертація присвячена теоретичному й експериментальному дослідженню загальних фізичних закономірностей хвильових процесів у нерегулярних квазіоптичних хвилеводно-діелектричних структурах підсилювача на ефекті Сміта-Парселла.

На підставі літературного огляду проаналізовано сучасний рівень розвитку нерегулярних квазіоптичних систем, які застосовуються в електроніці і техніці міліметрових і субміліметрових діапазонів хвиль. Представлена структурна схема класифікації таких систем. Стисло викладені чисельні та експериментальні методи моделювання електромагнітних полів у нерегулярних квазіоптичних системах пристроїв міліметрового і субміліметрового діапазонів, описана методика вимірювань та схеми експериментальних установок.

Для моделі підсилювача на ефекті Сміта-Парселла отримано і проаналізовано загальне трансцендентне дисперсійне рівняння, що враховує вплив поздовжніх і поперечних електронних хвиль на його електродинамічні характеристики; вивчено особливості відкритих хвилеводів із дзеркалами плоскої та циліндричної конфігурацій за наявності в їх об'ємі діелектричного або періодичного металодіелектричного шару; показана можливість значного зменшення дифракційних втрат у відкритому хвилеводі з квадратичною корекцією дзеркал.

Методами чисельного аналізу й експериментального моделювання встановлено, що планарні металодіелектричні структури можуть бути використані при створенні приладів дифракційної електроніки в інтегральному виконанні. Показана можливість селекції прямої і зворотної хвиль у відкритому хвилеводі з дифракційно-зв'язаними джерелами випромінювання, на основі чого запропоновано новий тип квазіоптичного спрямованого відгалужувача, який своїми вихідними параметрами (перехідне ослаблення – $3 \div 10$ дБ, спрямованість – 30 дБ) перевершує аналогічні пристрої на зв'язаних діелектричних хвилеводах.

Ключові слова: спрямований відгалужувач, відкритий хвилевод, діелектричний хвилевод, дифракційна ґратка, дифракційне випромінювання, черенковське випромінювання, металодіелектрична структура, електронний потік.

АННОТАЦИЯ

Журба В.О. Моделирование волновых процессов в электродинамических системах усилителя на эффекте Смита-Парселла. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2009.

Диссертация посвящена исследованию общих физических закономерностей волновых процессов в пространственно-развитых квазиоптических волноводно-диэлектрических структурах, а также выработке на этой основе практических рекомендаций по созданию усилителей на эффекте Смита-Парселла и улучшению их выходных параметров.

На основании литературного обзора проанализирован современный уровень развития нерегулярных квазиоптических систем, которые применяются в электронике и технике миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов волн. Представлена структурная схема классификации таких систем. Кратко изложены численные и экспериментальные методы моделирования электромагнитных полей в нерегулярных квазиоптических системах устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, описана методика измерений и схемы экспериментальных установок.

Путем учета влияния фокусирующего магнитного поля на электронно-волновые процессы развита линейная самосогласованная теория модели усилителя на эффекте Смита-Парселла, получено и проанализировано общее трансцендентное дисперсионное уравнение, учитывающее влияние продольных и поперечных электронных волн на характеристики усилителя. Проведен теоретический анализ особенностей влияния параметров электродинамической системы усилителя на электронно-волновые процессы, и на основании этого показано, что при изменении расстояния между решеткой и металлическим зеркалом происходит изменение углов излучения и фазовой скорости волны, т.е. путем выбора параметров периодической структуры, в частности ее периода, можно реализовать режимы как объемных, так и поверхностных волн. Установлено, что введение диэлектрического слоя между электронным потоком и металлическим экраном приводит к появлению дополнительных волн, распространяющихся в открытом волноводе, изменению их фазовых скоростей и углов излучения.

Изучены общие физические закономерности волновых процессов в различных модификациях нерегулярных квазиоптических систем. Установлены общие свойства влияния геометрических параметров системы и фазовой коррекции зеркал открытого волновода на пространственные и волноводные

характеристики при наличии двух дифракционно-связанных источников излучения. Показано, что с точки зрения реализации режима квазибегущей волны более перспективными являются открытые волноводы, образованные двумя цилиндрическими зеркалами.

В результате численного анализа и экспериментального моделирования установлена возможность значительного уменьшения дифракционных потерь в открытом волноводе с квадратичной коррекцией зеркал. Показано, что планарные металлодиэлектрические структуры могут быть использованы при создании приборов дифракционной электроники в интегральном исполнении. На основании качественного анализа электронно-волнового механизма взаимодействия электронного потока с дифрагированным полем показана возможность усиления электромагнитных волн на эффекте Смита-Парселла и предложены варианты реализации таких устройств.

Методом экспериментального моделирования исследованы электродинамические характеристики открытых волноводов различных модификаций. Установлена возможность управления волновыми процессами путем изменения толщины диэлектрического слоя и параметров ленточной дифракционной решетки, помещенных в объем волновода. Результаты исследования таких систем указывают на возможность селекции прямой и обратной волн в открытом волноводе, на основании чего предложен и исследован перестраиваемый квазиоптический направленный ответвитель на дифракционно-связанных линиях передачи, который по своим параметрам превосходит аналогичные устройства на связанных диэлектрических волноводах.

На основании полученных теоретических и экспериментальных результатов выработаны практические рекомендации по созданию и оптимизации электродинамических систем усилителя на эффекте Смита-Парселла, а также предложены новые функциональные устройства техники миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Ключевые слова: направленный ответвитель, открытый волновод, диэлектрический волновод, дифракционная решетка, дифракционное излучение, черенковское излучение, металлодиэлектрическая структура, электронный поток.

ABSTRACT**Zhurba V.O. Modeling of wave processes in electrodynamic systems of amplifier on Smith-Parsell effect. – 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, 2009.

Main aims of dissertation are theoretical and experimental investigation of electrodynamic behavior, and detection of general physical mechanism of the wave processes in nonregular quasi-optical waveguide-dielectric structures of amplifier on Smit-Parsell effect.

Developed theoretical model of amplifier on Smit-Parsell effect allows to obtain and to analyze general transcendental dispersion equation that takes into account influence of longitudinal and transversal electronic waves on amplifier quantities. Peculiarities of electrodynamic parameters of the open waveguides with flat and cylindrical mirrors configurations, and dielectrical or periodical metaldielectrical layers within are studied and tested. Ability for diffraction loss reduction in open waveguide with quadratic mirrors correction verified within using framework.

With using methods of numeral modeling and experimental design, it is shown that planar metal-dielectric structures can be applied in diffraction electronic devices making through integral composing. Basing on proved ability of direct and backward waves selection in open waveguide, it was proposed a new type of quasi-optical directional smoother with output parameters (transit attenuation – 3-10 dB, directivity – 30 dB) better than in similar devices on coupled dielectric waveguides.

Keywords: directional smoother, open waveguide, dielectric waveguide, diffraction grating, diffraction radiation, Cherenkov radiation, metal-dielectric structure, electron beam.

Підписано до друку 15.04.2009 р.
Формат 60×90/16. Папір ксерокс. Гарнітура Times New Roman Суг. Друк офс.
Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9.
Тираж 100 пр.
Замовлення №

Видавництво СумДУ при Сумському державному університеті
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.
Свідоцтво про внесення видавничої справи до державного реєстру
ДК № 3062 від 17.12.2007.
Надруковано у друкарні СумДУ
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.