

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова

На правах рукопису

БІЛОУС Олег Ігорович

**ВІДКРИТІ РЕЗОНАТОРИ З ЭШЕЛЕТНИМИ І
ГРЕБІНЧАТИМИ ГРАТКАМИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В
ЕЛЕКТРОНІЦІ МІЛІМЕТРОВИХ ХВІЛЬ**

01.04.03 – радіофізика

01.04.04 – фізична електроніка

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття вченого ступеню
кандидата фізико-математичних наук

Харків — 1996 р.



АВ 34.637

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки Національної Академії Наук України, м. Харків

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук, професор КИРИЛЕНКО Анатолій Афанасієвич;
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник ФІСУН Анатолій Іванович.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник СІРЕНКО Юрій Костянтинович;
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник ЧУРИЛОВА Світлана Анатоліївна.

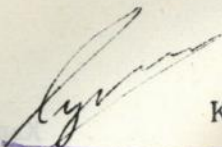
Провідна організація: Харківський державний університет ім. О.М. Горького

Захист відбудеться "20" грудня 1996р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої Ради Д 02.29.01 в Інституті радіофізики та електроніки НАН України (310085, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12, актовий зал).

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці ІРЕ НАН України, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12

Автореферат розіслано "25" квітня 1996 р.

Учений секретар
Спеціалізованої Ради
доктор фізико-математичних наук


К.О. Лукін

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

Актуальність теми. Інтенсивне освоєння міліметрового та субміліметрового діапазонів хвиль впливає на створення нової елементної бази, зокрема, приладів і пристроїв резонансного типу, основною складовою частиною яких є добротна коливальна система.

Серйозні труднощі використання елементної бази більш довговильових діапазонів пов'язані зі значним погіршенням їх характеристик, що перш за все пов'язано з різким зменшенням перерізів хвилеводів, визваних прагненням уникнути багатомодового режиму. В зв'язку з цим значно зростають теплові втрати в стінках хвилеводів, а це, в свою чергу, приводить до значного зниження добротності коливальних систем, обумовлюючого зростання нестабільності частоти генераторів і підвищення їх частотних шумів.

Одним із шляхів уникнення вказаних труднощів є використання відкритих резонаторів (ВР) з гладкими дзеркалами як коливальних систем приладів і пристроїв міліметрового і субміліметрового діапазонів хвиль. Проте, природнього розрідження спектру, властивого таким резонансним системам, в більшості випадків виявляється недостатньо. Крім того, існують значні труднощі погодження активних локальних елементів з відкритою коливальною системою. Тому все частіше використовуються дисперсійні відкриті резонатори з відбивачами у вигляді дифракційних ґраток, яким властиве додаткове розрідження спектру і можливість розміщення в них активних і пасивних елементів без суттєвого зниження характеристик.

Слід зазначити, що існуючі методи з достатньою точністю дозволяють досліджувати коливальні системи з гладкими дзеркалами, але ВР з дифракційними ґратками до цього часу досліджені ще недостатньо. Зокрема, не розроблені теоретичні та експери-

ментальні методики вивчення характеристик ВР зі складними відбивачами в вигляді дифракційних ґраток.

Все сказане дозволяє зробити висновок про актуальність тематики, порушеної в матеріалах цієї дисертації і пов'язаної з дослідженням електродинамічних властивостей відкритих резонаторів з ешелетними та гребінчатими дзеркалами.

Мета роботи — теоретичне і експериментальне дослідження електродинамічних властивостей відкритих резонаторів з ешелетними та гребінчатими ґратками, спрямоване на використання вивчених характеристик для розробки джерел випромінювання міліметрових та субміліметрових хвиль та покращення їх параметрів.

Наукова новизна. З допомогою двомірної хвилевідної моделі, основаної на хвилевідній концепції утримання поля всередині відкритої коливальної системи і на методі узагальненої матриці розсіяння, вперше розв'язана задача збудження відкритого резонатора для співвідношень характерних розмірів, властивих квазіоптиці. На основі результатів дослідження класичного резонатора Фабрі-Перо зроблено висновок про правомірність використання запропонованої моделі для вивчення властивостей ВР з відбивачами у вигляді дифракційних ґраток. Таким чином, розроблена методологія дозволяє одержати теоретичний результат, що відповідає основним даним експериментального дослідження ВР в межах застосування вибраних моделей коливальних систем з ґратками.

Виявлено нові механізми формування високообротних коливань в резонаторах з ешелетними дзеркалами, проведено класифікацію типів коливань відкритого резонатора з кутовоешелетним дзеркалом, виявлено власні колювання кутовоешелетного дзеркала, тобто колювання відкритого резонатора типу ешелет-ешелет. По-

казано можливість збудження і експериментально виявлено E -поляризовані коливання в резонаторі з кутовоешелетним дзеркалом.

Вперше експериментально підтверджено можливість одержання квазіодночастотних спектрів в резонаторах з гребінчатою ґраткою, встановленою під кутом до осі резонатора, відмінним від прямого.

Достовірність і обґрунтованість одержаних в роботі наукових результатів обумовлюється: в теоретичній частині — застосуванням математично обґрунтованих методів і відповідністю розрахункових і дослідних результатів; в експериментальній частині — адекватністю експериментальних методів, використаних з додержанням загальнопризнаних метрологічних норм, явищам, що вивчаються, регулярним відтворенням одержаних результатів. Подальша розробка і випробування дослідних зразків квазіоптичних джерел коливань міліметрового діапазону підтвердили справедливості викладених в роботі положень і висновків.

Практична цінність роботи полягає в створенні напівпровідникових твердотільних генераторів з відкритою дисперсійною коливальною системою, які характеризуються високою короткочасною стабільністю частоти, низьким рівнем частотних шумів та потужністю, порівняною з потужністю джерел коливань хвилевідного типу.

Реалізація розробок. Розроблена серія квазіоптичних твердотільних генераторів з кутовоешелетною коливальною системою міліметрового діапазону довжин хвиль (ГКГ-8, ГКГ-3; ГКЛ-8, ГКЛ-5, ГКЛ-3, ГКЛ-3а), створена в результаті проведених досліджень в ІРЕ НАН України, впроваджена в таких організаціях: ІРЕ НАН України, м.Харків; СКТБ ІРЕ НАН України, м.Харків; Радіоастрономічний інститут НАН України, м.Харків; НВО "Са-

турн", м.Київ; Інститут фізики напівпровідників Сибірського відділення АН Россії, м.Новосибірськ; Науково-дослідний інститут фізичних проблем Міністерства електронної промисловості Россії, м. Зеленоград Московської області; НДІ Приладобудування, м. Москва.

Положення, що підлягають захисту:

1. Одержано строгий розв'язок задачі збудження ВР з допомогою плоскої двовірної моделі на основі декомпозиційного підходу і хвилевідної концепції утримання поля для співвідношень між характерними розмірами резонатора і довжиною хвилі, властивих квазіоптиці. Встановлено зв'язок поля в зовнішньому просторі стрічкового резонатора з амплітудно-фазовим розподілом поля в об'ємі ВР не тільки на частоті резонансу, а і поблизу неї. З'ясовано, що розподіл поля в збуджуючому хвилеводі повністю визначається ступенем його зв'язку з відкритим резонатором. Показано, що даний підхід до розв'язку задачі збудження розповсюджується на резонатори зі ступінчатою деформацією дзеркал.
2. Поля основних і вищих типів коливань дисперсійного ешелетного ВР формуються під впливом, принаймні, двох факторів: дифракційних властивостей ґратки і трансформації хвиль на системі сходинок ешелета в напрямку, перпендикулярному осі резонатора, яка приводить до асиметричної концентрації поля в вузькій частині дисперсійного резонатора, а в резонаторі з кутовоешелетним дзеркалом до стягування поля до осі резонатора.
3. Виявлено і досліджено власні коливання кутовоешелетного дзеркала, що є коливаннями резонатора типу ешелет-ешелет.

При цьому вони мають значну добротність і майже не залежать від положення плоского дзеркала.

4. Два механізми формування високодобротних коливань: дзеркального резонансу ешелетних ґраток і трансформації хвиль на системі сходинок ешелета в напрямку, перпендикулярному осі ВР, являються необхідними і достатніми умовами збудження E -поляризованих коливань в ВР з кутвоешелетним дзеркалом.
5. Висока добротність режиму недзеркального автоколімаційного розсіяння хвиль гребінчастими ґратками, що обумовлена наявністю областей, де можуть розповсюджуватись хвилевідні хвилі, приводить до існування квазіодночастотних спектрів коливань в ВР, де ґратка встановлена під кутом до осі резонатора, відмінним від прямого.
6. На основі високих селективних і поляризаційних властивостей та можливості концентрації і трансформації полів дисперсійних резонаторів створені твердотільні і електронновакуумні квазіоптичні джерела випромінювання міліметрового і субміліметрового діапазонів довжин хвиль, що мають низький рівень частотних шумів, одномодовий режим роботи, підвищену стабільність та енергетичні характеристики.

Проведені в роботі дослідження і їх результати свідчать про появу в квазіоптиці нового класу резонансних систем — відкритих резонаторів з дисперсійними дзеркалами складної форми. Характерною рисою вказаних електродинамічних структур є суттєва залежність їх параметрів від параметрів відбивальних дифракційних ґраток, що входять в їх склад і проява ряду тонких ефек-

тів, які можуть бути виявлені тільки в результаті або теоретичного розгляду відповідної задачі, або проведення коректно поставленого складного як в технічному, так і в методичному відношеннях радіофізичного експерименту. Здійснювані завдяки новим якостям розширені функціональні можливості резонансних систем з дифракційними відбивачами відкривають перспективи створення радіофізичних структур з суттєво покращеними вихідними характеристиками. Підтвердженням цьому є розробка при активній творчій участі дисертанта квазіоптичних твердотільних джерел коливань, оригінальність конструкцій яких підтверджена авторськими свідоцтвами на винаходи.

Апробація і публікації. Викладені в дисертаційній роботі результати неодноразово обговорювались на наукових семінарах "Фізика твердого тіла" і "Радіофізика та електроніка міліметрових та субміліметрових хвиль" ІРЕ НАН України і доповідались на XI Всесоюзній науковій конференції "Електроніка надвисоких частот" (Орджонікідзе, 1986р.); III Всесоюзній школі з розповсюдження міліметрових і субміліметрових хвиль в атмосфері (Харків, 1989р.); International School on Microwave Physics and Technique (Bulgaria, Varna, 1989); Krajove Sympozium Telekomunikacji (Polska, Bydgoszy, 1990); International Conferences on Millimeter Waves and Far-Infrared Technology (China, Beijing, 1990, 1992), 16-th, 17-th and 18-th International Conferences on Infrared and Millimeter Waves (Switzerland, Lausanne, 1991; USA, Pasadena, 1992; UK, Colchester, 1993); IV Всесоюзній школі з розповсюдження міліметрових і субміліметрових хвиль в атмосфері (Нижній Новгород, 1991р.); Всесоюзній науково-технічній нараді "Малопумлячі генератори НВЧ. Стан розробок і перспективи застосування в метрології" (Іркутськ, 1991р.); I Українському симпозиумі "Фізика і тех-

ніка міліметрових і субміліметрових радіохвиль" (Харків, 1991р.); на Міжвідомчій науково-технічній конференції "Прилади, техніка і розповсюдження мм, субмм хвиль" (Харків, 1992р.); 23-rd European Microwave Conference (Spain, Madrid, 1993); на 3-й Кримській конференції і виставці "НВЧ-техніка и супутниковий прийом" (Севастополь, 1993р.); International Conference on Millimeter and Submillimeterwaves and Applications (USA, San-Diego, 1994), International Symposium "Physics and Engeneering of mm and submm Waves" (the Ukraine, Kharkov, 1994); на науково-технічній конференції "Техніка і фізика електронних систем і пристроїв" (Суми, 1995р.).

Розроблений при участі автора квазіоптичний твердотільний генератор міліметрового діапазону довжин хвиль зі сферокутовоюешелетною коливальною системою експонувався на Виставці досягнень народного господарства України (Київ, 1989р., диплом другого ступеню і срібна медаль); Відкритій ярмарці науково-технічних розробок і нових зразків товарів народного вжитку (Москва, 1990, срібна медаль); Науково-технічній виставці "Наука в Українській РСР" (Індія, 1990р.).

Всі результати, викладені в дисертації, одержані особисто автором або при його безпосередній участі і опубліковані в 43 друкованих роботах і 3 описах авторських свідоцтв на винаходи. Найбільш важливі з них приведені в кінці автореферату.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох глав і висновку. Вона містить 105 сторінок основного тексту, 77 сторінок малюнків і список цитованої літератури з 115 найменувань на 15 сторінках.

Короткий зміст роботи.

У вступі проаналізовано стан проблеми і обґрунтована ак-

туальність теми дисертації. На основі представленого короткого аналізу методів дослідження відкритих резонаторів поставлені наукові задачі і сформульована мета роботи. Тут же коротко викладено зміст роботи і відомості, пов'язані з її апробацією.

В першій главі запропоновано теоретичний підхід для дослідження відкритих резонаторів, оснований на хвилевідній концепції утримання поля в об'ємі відкритої коливальної системи, розробленій Л.А.Вайнштейном, і методи узагальненої матриці розсіяння. Основна ідея підходу полягає в зведенні задачі збудження відкритого резонатора до еквівалентної хвилевідної з наступною декомпозицією складних хвилевідних вузлів на елементарні ключові структури, для яких відомий розв'язок відповідних внутрішніх задач дифракції. Технологія застосування цієї моделі для дослідження відкритих резонаторів відпрацьована на двомірному класичному резонаторі Фабрі-Перо, збуджуваному плоским хвилеводом. В рамках декомпозиційного підходу розглядуваний ВР розкладається на такі елементарні ключові блоки: Т-образне стикування хвилеводів і відкриті кінці хвилеводів, з'єднані між собою регулярними відрізками хвилеводів. Здійснюючи послідовне складання відкритого резонатора із базових елементів, було одержано вираз для коефіцієнтів відбиття TEM хвилі, падаючої на вхід ВР зі сторони плоского хвилеводу:

$$R^{\perp} = S^{00} + S^{01} \hat{E}_1 \hat{O}_1 \hat{E}_1 \hat{F} + (S^{02} + S^{01} \hat{E}_1 \hat{O}_1 \hat{E}_1 \hat{G}) \hat{E}_2 \hat{O}_2 \hat{E}_2 \hat{H},$$

де допоміжні оператори \hat{F} , \hat{G} и \hat{H} знаходяться розв'язком системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР):

$$(\hat{I} - S^{11} \hat{E}_1 \hat{O}_1 \hat{E}_1) \hat{F} = S^{10}; \quad (\hat{I} - S^{11} \hat{E}_1 \hat{O}_1 \hat{E}_1) \hat{G} = S^{12}$$

$$\{\hat{I} - (S^{22} + S^{21} \hat{E}_1 \hat{O}_1 \hat{E}_1 \hat{G}) \hat{E}_2 \hat{O}_2 \hat{E}_2\} \hat{H} = S^{20} + S^{21} \hat{E}_1 \hat{O}_1 \hat{E}_1 \hat{F}$$

Таким чином, задача звелась до розв'язку СЛАР і ряду простих матричних операцій.

Алгоритми розрахунку матриць розсіяння Т-образного з'єднання хвилеводів S і відкритих кінців хвилеводів O можуть бути різними. В цій роботі як найбільш ефективні застосовувались: метод формули Гріна для Т-образного з'єднання хвилеводів, метод Вінера-Хопфа для відкритого кінця хвилеводу та метод часткових областей для сходінки в хвилеводі.

Спектр досліджуваного резонатора являє собою відомі серії резонансів, що групуються поблизу напівцілих значень безрозмірної частоти $\alpha = a/\lambda$ (a – відстань між дзеркалами, λ – довжина хвилі у вільному просторі), причому добротності вищих типів коливань в межах однієї серії обернено пропорційні квадрату поперечного індекса. Досліджено важливий з практичної точки зору зв'язок між модовим складом ВР і місцезнаходженням збуджуючого хвилеводу на дзеркалі ВР. Показано, що при зміщенні збуджуючого хвилеводу із центру одного із дзеркал можливе збудження як парних, так і непарних типів коливань.

Дослідження діаграм випромінювання із відкритих кінців дозволило зробити висновок про те, що по їх формі можна робити висновок про наявність або відсутність стану резонансу в резонаторі.

Вивчено також надзвичайно важливе в прикладному відношенні питання про амплітудно-фазовий розподіл поля в збуджуючому хвилеводі. Показано, що він повністю визначається ступенем зв'язку збуджуючого хвилеводу з відкритим резонатором. В момент резонансу на перетині цилінди зв'язку локалізований мінімум магнітної (максимум електричної) компоненти поля при слабкому зв'язку, максимум магнітної (мінімум електричної) — при сильно-

му зв'язку, при критичному зв'язку магнітна і електрична компоненти практично співпадають.

Одержані в першій главі результати в-основному підтверджуються результатами, одержаними іншими методами. А це дозволяє зробити висновок про правомірність застосування запропонованої процедури для дослідження не тільки ВР, що моделюються відрізками регулярних хвилеводів, а і ВР зі складними дзеркалами, які можна представити в вигляді відрізків скінченої довжини нерегулярного хвилеводу зі ступінчатою деформацією однієї або обох стінок, наприклад, ВР з ешелетом. В цьому розумінні на матеріалах першої глави була проведена апробація методу.

Друга глава присвячена вивченню електродинамічних властивостей ВР з ешелетними дзеркалами. З допомогою викладеної в першій главі методики, перш за все досліджено резонатор з одним ешелетним відбивачем. Його спектр, в порівнянні з еквівалентним резонатором Фабрі-Перо, значно розріджений. Із всього набору коливань, властивих еквівалентному резонатору, у плоскешелетного залишились тільки ті коливання, для яких сходинки ешелета мають резонансний розмір. Ці дані добре погоджуються з експериментальними результатами. Чисельна візуалізація збуджуваних типів коливань показує аномальний розподіл поля як основних, так і вищих типів коливань, який полягає в концентрації енергії в вузькій частині ВР, що обумовлено наявністю ешелета, як дисперсійного елемента, і суттєвою асиметрією досліджуваного резонатора.

Використання ешелетних дзеркал в відкритих коливальних системах виявило декілька позитивних якостей ешелетних ВР. Перш за все це суттєве розрідження спектру коливань при збереженні високої добротності. Але разом з цим існують і недоліки, що полягають в досить серйозних труднощах погодження локальних еле-

ментів з такою коливальною системою і наявністю втрат енергії через нульову гармоніку просторового спектру ешелета. Тому закономірним етапом в розвитку відкритих ешелетних резонаторів стала розробка ВР з кутовоешелетним дзеркалом, яке складено з двох ешелетів **так**, що одна із граней являється спільною.

З допомогою хвилевідної методики дослідження ВР були одержані спектри такого резонатора при різних способах збудження, а також розподіл полів збуджуваних типів коливань. Перш за все слід відзначити, що спектр ВР з кутовоешелетним дзеркалом менш розріджений, ніж спектр плоскоешелетного ВР, що підтверджено і експериментальними дослідженнями. Аналіз топології полів наявних типів коливань дозволив розділити їх по механізму збудження на п'ять груп. Це:

- типи коливань при малих значеннях безрозмірної частоти α (великих довжинах хвиль). Це просто деформовані типи коливань класичного резонатора Фабрі-Перо.
- типи коливань, для яких сходинка ешелета і відстань між дзеркалами мають резонансний розмір (аналогічні одержаним для плоскоешелетного резонатора). Їх формування можна представити як послідовне відбиття енергії від дзеркал резонатора в напрямку його осі.
- типи коливань, для яких резонансною є тільки відстань між дзеркалами і суттєву роль відіграє механізм трансформації хвиль на сходинках ешелета в напрямку, перпендикулярному осі резонатора, що приводить або до витискування поля на периферію ВР, або до суттєвого стягування його до осі резонатора. В останньому випадку мінімізуються втрати на випромінювання і, як наслідок, підвищується добротність ре-

зонатора.

- типи коливань, що формуються послідовним відбиттям енергії від плоского дзеркала і окремих ешелетів (трьохдзеркальна система).
- типи коливань, які є власними коливаннями кутовоешелетного дзеркала або резонатора типу ешелет-ешелет. Плоске дзеркало при цьому майже не впливає на ці типи коливань.

Як відомо, в ВР з одним ешелетним дзеркалом можливе збудження тільки H -поляризованих коливань, оскільки E -поляризована хвиля повністю відбивається в нульову гармоніку просторового спектру ешелета. В зв'язку з цим передбачалось, що в резонаторі з кутовоешелетним дзеркалом коливальний процес виникає при послідовному відбитті енергії від гладкого дзеркала і обох ешелетів. І дійсно, в результаті проведених як теоретичних, так і експериментальних досліджень, були виявлені коливання такого типу. Але поряд з цим виявлені і інші, неочевидні, механізми формування E -поляризованих коливань в резонаторі з кутовоешелетним дзеркалом. Це коливання, для яких резонансним є тільки відстань між дзеркалами, а перевідбиття на системі сходинок ешелетів приводить, як і в H -поляризації, до формування високочастотних коливань з концентрацією поля вздовж осі резонатора.

В третій главі відзначено, що всі результати для ВР з ешелетними дзеркалами одержані з допомогою хвилевідної моделі відкритих резонаторів і тільки для пояснення деяких положень доводилось звертатись до теорії розсіяння хвиль на ґратках, оскільки використання дифракційних ґраток як відбивачів ВР основане на явищі недзеркального автоколімаційного відбиття хвиль, тобто коли енергія, падаюча на дифракційну ґратку, відбивається в зво-

ротньому напрямку. При цьому при проектуванні дисперсійних ВР з дзеркалами-гратками різноманітної геометрії слід приймати до уваги не тільки рівень концентрації енергії в недзеркальній просторовій гармоніці, а і добротність відповідного режиму розсіяння. Перший показник при цьому буде визначати добротність коливання в ВР, а другий — ступінь ефективного відбору цього коливання серед інших можливих. Порівнюючи ці два показники для ешелетної і гребінчатої ґраток, можна відзначити значно більш високу добротність режиму розсіяння для гребінки, яка обумовлена наявністю у неї часткових областей, регулярних для розповсюдження хвилевідних хвиль. В зв'язку з цим для одержання в ВР квазіодночастотних спектрів слід віддавати перевагу гребінкам (або іншим ґраткам, що мають регулярні області для розповсюдження хвилевідних хвиль).

В роботі були досліджені ґратки з різним періодом і коефіцієнтом заповнення. З допомогою строгої теорії резонансного розсіяння хвиль дифракційними ґратками були виявлені області автоколімаційного відбиття з високою інтенсивністю на -1 і -2 гармоніках як для E -, так і для H -поляризацій. Спектр ВР, у якого ґратка устанавлювалась під кутом до осі резонатора, взятим із строгого розрахунку, містить практично одне коливання. Причому незначне відхилення кута нахилу гребінчатого дзеркала до осі резонатора від автоколімаційного приводить до швидкого зникнення коливань в ВР, що свідчить про високу ефективність розрідження спектру в резонаторах з гребінчатими ґратками.

Четверта глава присвячена застосуванню відкритих резонаторів з дисперсійними дзеркалами в електроніці міліметрового та субміліметрового діапазонів хвиль. Резонатори з ешелетними дзеркалами мають унікальні властивості. Це привело до створення

на їх основі джерел електромагнітного випромінювання, яким також властиві високі характеристики. На основі кутовоешелетного ВР були розроблені напівпровідникові джерела коливань міліметрового діапазону довжин хвиль. Ці генератори мають досить низькі частотні шуми (-120 дБ/Гц при використанні діодів Ганна і -100 дБ/Гц при використанні лавинно-пролітних діодів при відстройці на 10 КГц від несучої) і високою короткочасною стабільністю частоти ($2 \cdot 10^{-8}$ за хв.). Основні характеристики розроблених приладів приведені в таблиці

Тип приладу	Діапазон, ГГц	Тип діоду	Потужність, мВт	Напр. жив., В	Струм, А	Маса, кг
ГКГ-8	30-40	ДГ(<i>AsGa</i>)	100	4-5	0.8	0.25
ГКГ-3	80-86	ДГ(<i>InP</i>)	10	7	0.12	0.1
ГКЛ-8	33-42	ЛПД	150	30	0.15	0.25
ГКЛ-5	53-62	ЛПД	60	24	0.15	0.2
ГКЛ-3	93-96	ЛПД	15	16	0.2	0.1
ГКЛ-3а	115	ЛПД	15	16	0.2	0.1

Хоча дані генератори розроблялись на фіксовані частоти, можлива механічна перестройка $0.5 - 1.0$ ГГц. Для підвищення довгочасної стабільності частоти застосовувались схеми термостабілізації. Це дозволило підвищити довгочасну стабільність, принаймні, на порядок.

Можливість збудження *E*-поляризованих коливань в резонаторі з кутовоешелетним дзеркалом дозволило створити на його основі генератор дифракційного випромінювання (ГДВ). Експериментальні дослідження цього приладу свідчать про відсутність вищих типів коливань в спектрі ГДВ зі сферокутовоешелетним ВР, на відміну від ГДВ з іншими резонаторами, наприклад, з найбільш поширеним — сфероциліндричним ВР. Крім того цей ГДВ має кращі енергетичні характеристики при тих же робочих струмах.

Експериментально знятий розподіл поля в працюючому ГДВ по-вністю співпадає з розрахунковим, знайденим у 3-й главі.

В висновку сформульовані основні результати дисертації і вказані перспективні області їх застосування.

Основні результати і висновки роботи.

1. На прикладі модельної задачі, пов'язаної зі збудженням відкритого резонатора Фабрі-Перо, показано правомірність застосування хвилевідної концепції утримання поля в об'ємі відкритої коливальної системи і узагальненої матриці розсіяння для дослідження відкритих резонаторів, тобто електродинамічних систем, що мають великі розміри порівняно з довжиною хвилі і зв'язок з відкритим простором. Поряд з відомими фактами, які аргументують адекватність моделі поставленої задачі, виявлено, що діаграми випромінювання з відкритих кінців стрічкового резонатора в дальній зоні залежать від амплітудно-фазового розподілу поля в резонаторі, від частоти збуджуючої хвилі, а також від вигляду зв'язку коливальної системи зі збуджуючим хвилеводом. Крім цього показано, що на частоті резонансу розподіл поля в збуджуючому хвилеводі, а також на перетині щілини зв'язку обумовлений ступенем зв'язку об'єму коливальної системи зі збуджуючим хвилеводом.

2. Досягнуто значний прогрес в розумінні процесів, що відбуваються в резонаторах з ешелетними дзеркалами. Відзначено суттєве розрідження спектру коливань в резонаторі з одним ешелетним дзеркалом, встановленим по автоколімаційній схемі. Пояснено аномальну поведінку добротності і розподілу поля в таких резонаторах, яка полягає в підвищенні доброт-

ності сфероешелетного ВР при невеликому відхиленні від режиму автоколімації і зміщенні максимумів в розподілі поля в вузьку частину плоскешелетного ВР.

3. Проведено класифікацію типів коливань, існуючих в ВР з кутовешелетним дзеркалом. Це, по-перше, типи коливань з частотами, що відповідають малим значенням α (великим довжинам хвиль), які представляють собою деформовані типи коливань класичного резонатора Фабрі-Перо. По-друге, типи коливань для яких сходинки ешелета і відстань між дзеркалами мають резонансний розмір (аналогічні одержаним для плоскешелетного резонатора). Їх формування можна представити як послідовне відбиття енергії від дзеркал резонатора в напрямку його осі. По-третє, типи коливань, що формуються послідовним відбиттям енергії від окремих ешелетів і плоского дзеркала. І, нарешті, типи коливань, для яких резонансним є тільки відстань між дзеркалами. При цьому суттєву роль відіграє механізм трансформації хвиль на сходинках ешелета в напрямку, перпендикулярному осі резонатора, що приводить або до витискування поля на периферію ВР, або до суттєвого стягування його до осі резонатора. В останньому випадку мінімізуються втрати на випромінювання, що приводить до значного росту добротності.
4. Виявлено і досліджено власні коливання кутовешелетного дзеркала, що є коливаннями відкритого резонатора типу ешелет-ешелет. При цьому відбувається своєрідне замикання енергії всередині кутовешелетного дзеркала.
5. Показана можливість збудження E -поляризованих коливань в ВР з кутовешелетним дзеркалом, які виникають не тільки

при дзеркальному відбитті від ешелетів, з яких складено кутовоешелетне дзеркало. Суттєву роль в формуванні найбільш добротних коливань відіграє процес трансформації хвиль на системі сходинок ешелетів в напрямку, перпендикулярному осі резонатора.

6. На прикладі ВР, в якому гребінчата ґратка встановлена під кутом до осі резонатора, відмінним від 90° , вперше показана можливість одержання в них як H -, так і E -поляризованих коливань. Відзначено, що ці коливання носять квазіодночастотний характер, тобто в широкому інтервалі частот є тільки одне коливання, визване автоколімаційним відбиттям на одному з поядків просторового спектру ґратки.
7. На основі одержаних результатів розроблено і досліджено ряд конкурентноспроможних квазіоптичних джерел міліметрового діапазону довжин хвиль, що мають, як показали дослідження, унікальні характеристики.

Основні публікації по темі дисертації приведено нижче (повний перелік публікацій міститься в дисертаційній роботі):

1. Белоус О.И., Кириленко А.А., Ткаченко В.И., Фисун А.И., Фурсов А.М. Возбуждение ленточного открытого резонатора плоским волноводом. //Радиофизика, 1994, – № 3, –с.300-314. (Изв. высш. учебн. заведений).
2. Белоус О.И., Кириленко А.А., Корнеенков В.К., Мирошниченко В.С., Фисун А.И., Фурсов А.М. Генератор дифракционного излучения со сферуголковошелетным открытым резонатором. //Радиозлектроника, -1995, – № 11, –с.3. (Изв. высш. учебн. заведений).

3. Белоус О.И., Булгаков Б.М., Фисун А.И., Фурсов А.М. Особенности режима автоколлимации в дисперсионном открытом резонаторе с фазокорректирующим зеркалом. Письма в ЖТФ, 1992, с.46-5
4. Архипов А.В., Белоус О.И., Булгаков Б.М., Фисун А.И., Фурсов А.М. Квазиоптические генераторы на диодах Ганна и ЛПД с открытым сферуголковоэшелеттным резонатором. "Приборы и техника эксперимента", 1991, № 3, с.106-109.
5. Белоус О.И., Булгаков Б.М., Скрасанов В.Н., Фисун А.И., Шубный А.И. Квазиоптический генератор Ганна с увеличенным диапазоном перестройки частоты. "Приборы и техника эксперимента", 1988, № 1, с.125-127.
6. Архипов А.В., Белоус О.И., Булгаков Б.М., Леонов Ю.И., Фисун А.И., Фурсов А.М. Возбуждение открытого резонатора с уголковым эшелеттным зеркалом твердотельным источником СВЧ колебаний. Научное приборостроение в мм и субмм диапазонах. Сб. научн. трудов, г.Харьков. 1988. ИРЭ АН УССР. с.37-43.
7. О.И.Белоус, А.И.Фисун "Квазиоптические твердотельные источники электромагнитных колебаний КВЧ диапазона" //Тез. докл. н.-т. конф. "Техника и физика электронных систем и устройств", Украина, Сумы, 18-20 мая 1995г., т.2, с.203-204.
8. Belous O.I., Fisun A.I., Fursov A.M., Kirilenko A.A., Tkachenko V.I. Waveguide Stimulation of open resonator with complicated mirrors. Int. Conf. on Millimeter and Submillimeter Waves and Applications. Jan. 10-14, 1994, San-Diego, California, USA. p.169.

9. Belous O.I., Kirilenko A.A., Fisun A.I. Open resonant system with echelette mirrors. Proc. of APMC-94, Dec. 6-9, 1994, Tokyo, Japan. pp.767-769.
10. Belous O.I., Fisun A.I., Fursov A.M., Kirilenko A.A., Tkachenko V.I. Problem of stimulation of open resonator with frequency-selective mirror. Rigorous solution. Int. Symp. "Phys. Engin. of MM Submm Waves", Conf. Proc., v.1, pp. 122-125, 1994, Kharkov, Ukraine.
11. Belous O.I., Fisun A.I., Fursov A.M., Kirilenko A.A., Tkachenko V.I. Open resonator with mode selection for millimeter wave devices. Proc. of 18-th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves. Sept. 1993. University of Essex, Colchester, UK. v.2, pp.216-217.
12. Belous O.I., Fisun A.I., Fursov A.M. High-Stability Spheredielectric Open Resonator Gunn-diode and IMPATT-diode Oscillator. Proc. 17-th Int. Conf. of IR and MM Waves. Pasadena, California, USA. 1992. p.456-457.
13. Belous O.I., Bulgakov B.M., Fisun A.I., Fursov A.M., Kosov A.S., Zotov W.A. Low-Noise Inp Gunn Generator with Spheredielectric Open Oscillating System. Proc. of 16-th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Lausanne, Switzerland, August 26-30, 1991. p.78-79.
14. Белоус О.И., Булгаков Б.М., Кириленко А.А., Ткаченко В.И., Фисун А.И., Фурсов А.М. Особенности возбуждения ленточного открытого резонатора плоским волноводом. Тр. I Украинского симпозиума "Физика и техника мм и субмм волн". 15-17 окт. 1991, Харьков, ИРЭ АН УССР, с.272-273.

15. Белоус О.И., Булгаков Б.М., Фисун А.И., Фурсов А.М. Открытые резонаторы с эшелеттом - новый класс высокочастотных колебательных систем твердотельных и электровакуумных приборов КВЧ диапазона. Тр. Всесоюзного н.-техн. совещания "Малощумящие генераторы СВЧ. Состояние работ и перспективы применения в метрологии". Иркутск, ВС НИИФТРИ, 17-19 сент. 1991. с.93-94.
16. Белоус О.И., Булгаков Б.М., Кириленко А.А., Фисун А.И., Фурсов А.М. Проблема разрежения спектра в дисперсионных открытых резонаторах с отражательными дифракционными решетками. Тр. I Украинского симпозиума "Физика и техника мм и субмм волн". 15-17 окт. 1991. Харьков, ИРЭ АН УССР, с.270-271.
17. Arkhipov A.V., Belous O.I., Bulgakov B.M., Fisun A.I., Fursov A.M. Millimeter Wave Stable Solid-State Sources with Sphero-Echelette Open Oscillating System. Int. Conf. on Millimeter Wave and Far-Infrared Technology. June 19-23, 1990. p.539-540.
18. Архипов А.В., Белоус О.И., Булгаков Б.М., Назаренко Л.С., Склярлов А.П., Фисун А.И., Фурсов А.М. Генератор. А.С.1540616, опубл. в Б.И. № 2, 1991.
19. Белоус О.И., Булгаков Б.М., Фисун А.И., Фурсов А.М. Генератор СВЧ. А.С. 1309870, опубл. в БИ № 3 1989, с.295-296.
20. Белоус О.И., Булгаков Б.М., Епишин В.А., Фисун А.И., Фурсов А.М. Генератор. А.С.1370712(СССР), опубл. в Б.И. № 4, 30.01.88, с.224-225.

Белоус О.И. Открытые резонаторы с эшелеттными и гребенчатыми решетками и их применение в электронике миллиметровых волн. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 — радиофизика и 01.04.04 — физическая электроника, ИРЭ НАН Украины, г. Харьков, 1996.

Решена задача возбуждения резонаторов с плоскими и ступенчатыми зеркалами. Показано, что применение волноводной концепции удержания энергии в ОР и метода обобщенной матрицы рассеяния правомочно в соотношениях квазиоптики для решения задачи возбуждения ОР со ступенчатыми зеркалами. Установлено, что в дисперсионных резонаторах со сложным (например, уголковоэшелеттным) зеркалом существует механизм формирования высокодобротных колебаний, основанный на трансформации волноводных волн на ступенях. В ОР с гребенчатой решеткой, установленной под углом к оси резонатора, получен квазиодночастотный спектр, вызванный автоколлимационным отражением на одном из порядков пространственного спектра решетки. Разработаны и внедрены квазиоптические источники излучения со сферуголковоэшелеттным ОР, по своим параметрам превосходящие отечественные и зарубежные аналоги.

Ключові слова: дисперсійний відкритий резонатор, ешелет, квазиоптичне джерело випромінювання.

Belous O.I. Open resonators with echelette and comb gratings and their application in millimeter wave band electronics. The thesis for the search of the scientific degree of a candidate of physics and mathematics in the specialty of 01.04.03 — radiophysics and 01.04.04 — physical electronics, IRE NAS of Ukraine, Kharkov, 1996.

The problem of excitation of the resonator with plane and steep deformation mirrors has been solved. The application of the waveguide conception of retaining the energy in the OR and the generalized scattering matrix method has been shown to be correct in the quasioptics correlations for solving the problem of the OR with the steep deformation mirrors. It has been found that there exists a mechanism of forming the high Q -quality mode in dispersive OR with a corner-echelette mirror, the mechanism involved being based on the transformation waveguide wave on the steeps. The quasi-mono-frequency spectrum of the oscillation caused by the autocollimation reflection on one of space harmonics of the comb grating has been obtained in the OR with comb grating mounted at an angle to the axis of resonator. The quasioptic radiation sources with the sphere-corner-echelette OR have been elaborated and introduced, the parameters of these courses surpass the native and foreign analogous devices.

Keywords: dispersive open resonator, echelette, quasioptic radiation source.

Безплатно.

АВ 34.637

Олег Ігорович БІЛОУС

**Відкриті резонатори з ешелетними і гребінчастими
гратками та їх застосування в електроніці
міліметрових хвиль.**

Відповідальний за випуск В.М. Скрасанов

Підписано до друку 05.04.96.

Формат паперу 60 × 90 × 1/16 Об'єм 1 фіз. д. л.

Заказ № 24 . Тираж 100 экз. Безплатно.

Ротапринт ІРЕ НАН України.

Харків-85, вул. Акад. Проскури, 12.