

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

КОВАЛЬОВ ЄВГЕН ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 537.876.4: 621.385.6

**ВІДКРИТІ РЕЗОНАНСНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРІВ
ДИФРАКЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З РОЗВИНУТИМ
ПРОСТОРОМ ВЗАЄМОДІЇ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
Національної академії наук України, м. Харків

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Мирошніченко Володимир Семенович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України (м. Харків),
заступник завідувача відділу теорії
дифракції та дифракційної електроніки

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Маслов Вячеслав Олександрович,
Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна,
завідувач кафедри квантової радіофізики

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Селезньов Дмитро Георгійович,
Радіоастрономічний інститут
НАН України (м. Харків)
старший науковий співробітник відділу
теоретичної радіофізики

Захист відбудеться «23» вересня 2021 р. о 15³⁰ годині на засіданні
Спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Акад.
Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту радіофізики та
електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул.
Акад. Проскури, 12.

Автореферат розісланий «19» серпня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І.В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Прискорений розвиток комунікаційних технологій, розробка систем контролю за безпекою в місцях великого скупчення людей, активний розвиток нових медичних систем для діагностики злоякісних утворень в тілі людини потребують постійного розвитку та вдосконалення джерел електромагнітного випромінювання в міліметровому та терагерцевому діапазонах. В цьому сенсі розробки електровакуумних генераторів та підсилувачів електромагнітних коливань знову стали на порядку денному після деякого охолодження на початку XXI століття [1-6].

Засновані на новому принципі прямого перетворення кінетичної енергії електронів у швидкі хвилі електромагнітного випромінювання, генератори дифракційного випромінювання (ГДВ), що з'явилися в середині 60-х років XX століття, ще далеко не вичерпали свій потенціал у міліметровому діапазоні та є одними з перспективних джерел для терагерцевого діапазону [7, 8]. Притаманна ГДВ висока стабільність електромагнітних коливань та відносно високий рівень вихідної потужності дають широкі можливості розробникам нових технологій в міліметровому та терагерцевому діапазонах. Основні дослідження та розробка серії пакетованих ГДВ були виконані в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України. Пакетовані ГДВ за конструкцією поділяються на два типи: класичні ГДВ для діапазону частот 75-340 ГГц із періодичною структурою у вигляді одиночної відбивної гребінки, що частково покриває поверхню дзеркала відкритого резонатора (ВР), та ГДВ з періодичною структурою типу здвоєної гребінки, повернутої на 90^0 відносно осі ВР, що мають підвищену ефективність взаємодії в діапазоні частот 25-200 ГГц.

Ступінь узгодження по фазі одиночної гребінки з гладкою поверхнею дзеркала визначає смугу перестроювання ГДВ по частоті та його ККД, тому до цієї проблеми прикута постійна увага до теперішнього часу [9]. Здвоєна гребінка з напівхвильовою висотою вздовж осі ВР автоматично узгоджена по фазі з гладкою поверхнею дзеркала ВР, але ця умова виконується тільки у відносно вузькій смузі частот. Тому для дослідження та розробки ГДВ залишаються актуальними задачі розширення смуги перестроювання по частоті, підвищення ККД та стабільності генерованих коливань [10], а також зменшення їх масогабаритних параметрів [11]. Для розробки пакетованих ГДВ в ТГц діапазоні необхідно виконати дослідження та розробити малогабаритні ВРС із подовженим простором взаємодії, в яких резонансні моди мають супергаусовий розподіл резонансного поля.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано відповідно до планів науково-дослідних робіт у відділі теорії дифракції та дифракційної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України у рамках держбюджетних тем "Електродинаміка відкритих резонансних систем, періодичних структур із композиційними матеріалами та антенних систем; прямі та зворотні задачі розробки когерентних джерел, елементної бази і

вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль” (0111U010480) та “Генерація, посилення, детектування та розповсюдження терагерцевого випромінювання: електродинамічне моделювання та експеримент” (0117U004034).

Мета і задачі дослідження

Мета роботи – експериментальними та теоретичними методами дослідити шляхи розширення функціональних можливостей ГДВ з періодичною структурою у вигляді здвоєної гребінки, що працюють в діапазоні 30-200 ГГц, та провести дослідження перспективних ВРС з подовженим простором взаємодії для розробки ГДВ у терагерцевому діапазоні частот.

Для досягнення мети досліджень необхідно було розв’язати наступні задачі:

1. Дослідити вплив параметрів здвоєної гребінки на ширину смуги перестроювання ГДВ по частоті.
2. Дослідити властивості малооб’ємних ВРС із мінімальним розміром гаусової плями поля на здвоєній гребінці.
3. Запропонувати та дослідити нові типи ВРС зі зменшеним впливом здвоєної гребінки на поле та добротність робочої моди.
4. Розробити експериментальний метод аналізу структури резонансного поля безпосередньо на поверхні дзеркал ВРС.
5. Дослідити особливості формування подовженого поля на періодичній структурі у ВРС із багатофокусним дзеркалом.

Об’єктом дослідження дисертації є процеси формування резонансних мод і процеси взаємодії з ними електронного потоку у відкритих резонансних системах генераторів дифракційного випромінювання.

Предметом дослідження є структура поля резонансних мод, їх омічні та радіаційні втрати та їх вплив на ширину смуги перестроювання частоти в генераторах дифракційного випромінювання.

Методи дослідження

Для розв’язання поставлених задач було використано та розроблено наступні методи:

- експериментальні методи досліджень резонансних мод у ВРС з урахуванням радіаційних втрат у вузлі зв’язку;
- лінійна теорія ГДВ із гаусовим розподілом поля вздовж простору взаємодії;
- метод аналізу властивостей резонансних мод за допомогою двовимірної моделі ВРС із довільним профілем дзеркал;
- експериментальний метод аналізу структури резонансного поля безпосередньо на поверхні дзеркала ВРС за допомогою рухомого вузла зв’язку;
- експериментальний метод визначення омічних втрат у періодичній структурі типу здвоєної гребінки;
- експериментальні методи дослідження вихідних параметрів ГДВ у “гарячому” режимі роботи.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Досліджено вплив параметрів здвоєної гребінки на ширину смуги перестроювання ГДВ по частоті, та показано, що вона суттєво залежить від подовження H_{10} -хвилі в елементарних хвилеводах, утворених протилежними щілинами здвоєної гребінки. Встановлено, що оптимальна висота здвоєної гребінки b по критерію “широка смуга перестроювання ГДВ по частоті плюс висока добротність генерованих коливань” складає: $0,65 < b/\lambda_\pi < 0,90$ (λ_π - довжина хвилі у вільному просторі).

2. Для розрахунку стартових струмів ГДВ запропоновано експериментальний метод визначення частки енергії поля робочої TEM_{00q} -моди, яка зосереджена безпосередньо в щілинах здвоєної гребінки, і показано, що вона зростає зі збільшеннями висоти здвоєної гребінки та становить $(0,9 \div 4,5)$ від енергії резонансного поля в одній варіації сталої хвилі у ВРС.

3. Розроблено експериментальний метод аналізу структури резонансного поля безпосередньо на поверхні дзеркала ВР за допомогою рухомого вузла зв'язку. Метод придатний для аналізу резонансного поля з роздільною здатністю $\sim 0,1$ мм як в традиційних ВР, так і в малооб'ємних ВР із мінімальною відстанню між дзеркалами.

4. Досліджено особливості формування подовженої плями поля TEM_{00q} -моди у ВРС із фокусуючим дзеркалом, складеним з $2 \div 4$ циліндричних поверхонь (випадок H -поляризації), та встановлено, що розподіл поля на дзеркалі ВРС відповідає квазіоптичній сумі гаусових плям тільки для фокусуючого дзеркала, складеного з 2-х циліндричних поверхонь. Встановлено, що високу добротність мають вищі TEM_{0nq} -моди, в яких нулі в розподілі електричного поля співпадають зі стиками суміжних циліндричних поверхонь фокусуючого дзеркала.

5. Проведено моделювання ВРС для ГДВ на робочу частоту 340 ГГц, в якій для формування подовженого поля $TEM_{00_{11}}$ -моди з супергаусовим розподілом поля запропоновано методику згладжування стику двох дзеркал випуклою поверхнею циліндра. При радіусі кривизни циліндричних поверхонь $R_c = 300$ мм отримано довжину простору взаємодії $2\omega_{sx} = 11,7$ мм з показником супергаусового розподілу $s = 3,3$.

6. Вперше запропоновано та досліджено особливості роботи ГДВ на асиметричних модах, які виникають у ВРС при зміщенні здвоєної гребінки на периферію плями поля в напрямку, перпендикулярному до руху електронного потоку. Встановлено, що використання ВРС з асиметричними модами знижує деструктивний вплив гребінки на формування резонансного поля, зменшує омичні та радіаційні втрати у ВРС і збільшує смугу перестроювання ГДВ по частоті в 1,5 раза, яка для ГДВ 8-мм діапазону становить $\Delta f/f_\pi = 9,4\%$ при вихідній потужності $P_{max} = 35$ Вт.

7. Вперше запропоновано та досліджено особливості роботи ГДВ на міжтиповому коливанні у його ВРС, що виникає при створенні умов для зв'язку між парною TEM_{001} -модомою та непарною TEM_{101} -модомою, що має невеликі радіаційні втрати. Вибрано оптимальний зв'язок між модами та

продемонстровано ефективну роботу ГДВ поблизу МКТ на одній із гілок зв'язаних мод у широкій смузі частот без впливу вищих мод на вихідні характеристики генератора.

Практичне значення одержаних результатів

Отримані результати досліджень ГДВ із періодичною структурою у вигляді здвоєної гребінки дають можливість суттєво розширити смугу перестроювання по частоті, підвищити стабільність генерованих коливань та зменшити масогабаритні параметри цих джерел в діапазоні частот 30-200 ГГц.

Результати досліджень особливостей формування подовженого розподілу резонансного поля у ВР із багатофокусним дзеркалом дозволяють розробити малогабаритні ВРС із супергаусовим розподілом поля для ГДВ терагерцевого діапазону частот.

Запропонований метод аналізу структури резонансного поля безпосередньо на поверхні дзеркала ВР може бути використаний в багатьох практичних застосуваннях відкритих резонаторів, таких як діелектрометрія, технологічний контроль мікродротів, розробка ЛПД-генераторів та інше.

Отримані результати досліджень властивостей резонансних мод в асиметричних ВР, зокрема мод із керованим зв'язком, будуть корисними при встановленні закономірностей збудження мод у складних ВР з багатьма дзеркалами.

Особистий внесок здобувача

У роботах, опублікованих в співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в участі при плануванні та проведенні експериментів, постановки завдань та проведення електродинамічного моделювання, обговоренні отриманих результатів і підготовки наукових матеріалів до публікацій. У роботах [1*-10*] автором самостійно було проведено розрахунки з використанням 2-D моделі відкритого резонатора з довільним профілем дзеркал. В роботах [7*,10*] автором було запропоновано оригінальний метод розрахунку профілю поверхні фокусуєчого дзеркала для ВР з супергаусовою модою та виконано аналіз структури резонансного поля.

Апробація результатів дисертації

Результати досліджень за темою дисертації доповідались на наукових семінарах Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, а також на міжнародних конференціях: The 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves “MSMW-2016” (Kharkiv, 2016); The International Young Scientists Forum on Applied Physics “YSF-2015” (Dnipropetrovsk, 2015); The International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering “YSF-2016” (Kharkiv, 2016); The 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering “YSF-2017” (Lviv, 2017).

За результатами проведених досліджень отримано 1 патент України на винахід.

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 10 наукових роботах, в тому числі в 5 статтях [1*-5*] у фахових наукових виданнях, які належать до переліку МОН України, в 1 науковому іноземному журналі, в 4-х збірниках

доповідей на міжнародних конференціях [7*-10*], одержано 1 патент України на винахід [6*]

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, переліку умовних скорочень, вступу, 5-х розділів, висновків, списку використаних джерел, 1 додатка. Обсяг дисертації становить 163 сторінки. Вона містить 73 рисунки і 107 бібліографічних посилань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, наведено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та список публікацій.

В розділі 1 наведено огляд літератури за темою дисертаційної роботи. Розглянуто сучасний стан розробок джерел когерентного випромінювання в ММ та ТГц діапазонах і показано, що роль вакуумних генераторів у цих діапазонах тільки підсилюється в зв'язку зі зростанням наукових і прикладних досліджень в цих діапазонах. Серед вакуумних приладів ГДВ є порівняно новими перспективними джерелами електромагнітного випромінювання в ММ і ТГц діапазонах. Вони вигідно відрізняються від інших джерел О-типу високою стабільністю частоти, вузьким спектром вихідного сигналу, низьким рівнем шумів, широким діапазоном електромеханічного перестроювання та достатньо великим рівнем вихідної потужності [7, 8].

Відкрита резонансна система (ВРС), як елемент конструкції ГДВ, визначає його основні характеристики та є досить складним об'єктом для теоретичних і експериментальних досліджень. В Розділі 1 проведено аналіз результатів наукових публікацій стосовно застосування в ГДВ нових типів ВРС, сформульовано основні задачі, які потребують розв'язку для розширення функціональних можливостей ГДВ із періодичною структурою у вигляді здвоєної гребінки [12-14], що працюють в діапазоні 30-200 ГГц, та задачі, які забезпечать успішне просування ГДВ у ТГц діапазон частот. Так, для ГДВ у ММ діапазоні залишаються актуальними задачі розширення смуги перестроювання по частоті, розрідження спектру резонансних мод у його ВРС і суттєве зменшення масогабаритних параметрів. Для розробки ГДВ у ТГц діапазоні необхідно розробити ВРС із подовженим простором взаємодії та розрідженим спектром власних мод, підвищити ефективність використання резонансного поля електронним потоком і зменшити теплове навантаження на періодичну структуру.

В розділі 2 розглянуто принцип дії ГДВ, експериментальні методи «холодних» та «гарячих» досліджень ГДВ та строга 2-D модель [15] для аналізу резонансних мод, в якій здвоєну гребінку представлено прямокутною канавкою на дзеркалі ВРС. На рис.1 представлена схема ГДВ зі здвоєною гребінкою (а) та приклад розподілу резонансного поля (б), одержаний за допомогою 2-D моделі для напівхвильового режиму збудження здвоєної гребінки на частоті f_{π} . Як відомо [14], для ГДВ зі здвоєною гребінкою існує сітка оптимальних частот f_{π} ,

$f_{2\pi}, f_{3\pi}$, на яких здвоєна гребінка не збудує структуру резонансного поля у ВРС та не спричиняє додаткові радіаційні втрати: $f_{n\pi} = c\sqrt{n^2/(4b^2)+1}/\lambda_{cr}^2$, де $\lambda_{cr} \approx 2a$ - критична довжина H_{10} -хвилі, що рухається вздовж OZ в багатожолобковому хвилеводі, утвореному протилежними щілинами здвоєної гребінки [16].

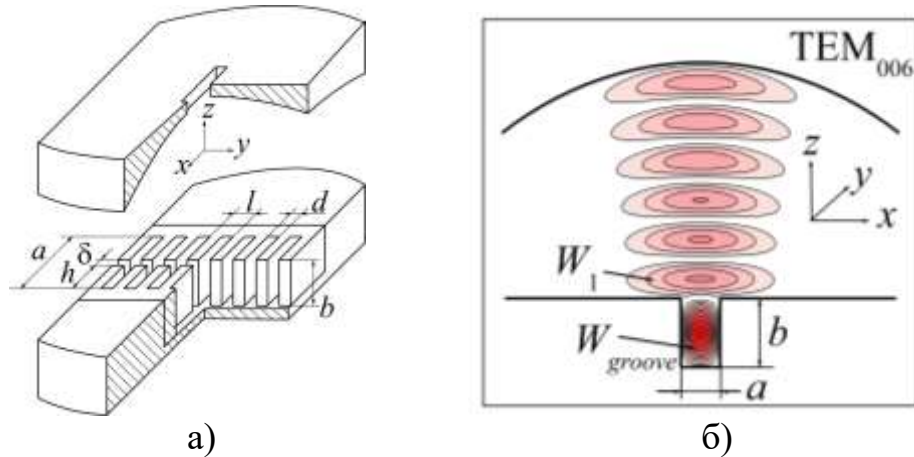


Рисунок 1 – Схема ГДВ із періодичною структурою у вигляді здвоєної гребінки (а) та приклад розподілу $|E_y|$ -компоненти поля для TEM_{006} -моди

Згідно лінійній теорії ГДВ [17] стартовий струм для виникнення коливань складає: $I_{st} = \frac{2,1 \cdot 10^{-5} S_b U_s^{3/2}}{L^2 \psi Q F_s(\alpha, \varphi, \varphi_p)}$, де S_b – площа перетину електронного потоку,

U_s – напруга прискорення електронного потоку, синхронного з s -ю просторовою гармонікою, L - довжина простору взаємодії,

$\psi = \int_{S_b} E_{sy}^2 ds / \int_{S_{ORS}} E_y^2 ds$ - коефіцієнт використання резонансного поля, Q -

добротність ВРС, $F_s(\alpha, \varphi, \varphi_p)$ - функція розсинхронізму. В дисертаційній роботі основну увагу прикуто до зменшення стартового струму в широкій смузі частот за рахунок збільшення добутку ψQ для ГДВ діапазону 30-200 ГГц, а також збільшення довжини простору взаємодії L в ТГц-діапазоні.

Для робочої моди TEM_{00q} по залежності $Q_0(q)$ запропоновано експериментальний метод визначення частки енергії резонансного поля, зосередженої безпосередньо в щілинах здвоєної гребінки, і показано, що вона зростає пропорційно $(b/\lambda_\pi)^3$ та становить $(0,9 \div 4,5)$ від енергії в одній варіації сталої хвилі між дзеркалами ВРС (рис.2,а,б). По куту нахилу залежності $Q_0(q)$ встановлені омічні втрати у здвоєній гребінці, і показано, що вони швидко зростають зі збільшенням висоти напівхвильової гребінки. Встановлено, що зменшення висоти напівхвильової здвоєної гребінки сприяє розширенню смуги перестроювання ГДВ по частоті (рис.3,а,б,в), а ширина смуги перестроювання по частоті визначається умовою $|\Delta\varphi| \leq 0,1\pi$, де $\Delta\varphi$ - різниця фаз для хвиль,

відбитих від здвоєної гребінки та від поверхні плоского дзеркала. По критерію «широка смуга перестроювання по частоті плюс висока добротність робочої моди» одержано оптимальну висоту здвоєної гребінки, яка становить ($0,65 < b/\lambda_\pi < 0,90$).

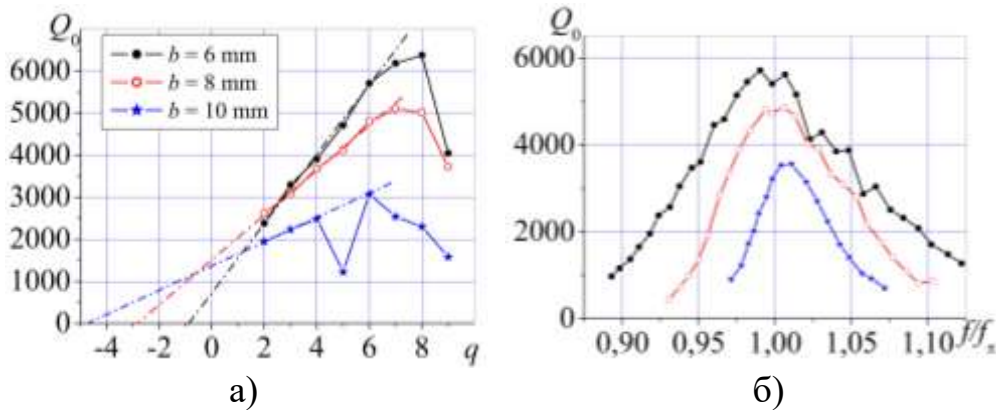


Рисунок 2 – Залежність $Q_0(q)$ для TEM_{00q} -моди (а) та $Q_0(f)$ для TEM_{006} -моди (б) у ВРС зі здвоєною гребінкою висотою 6 мм, 8 мм та 10 мм

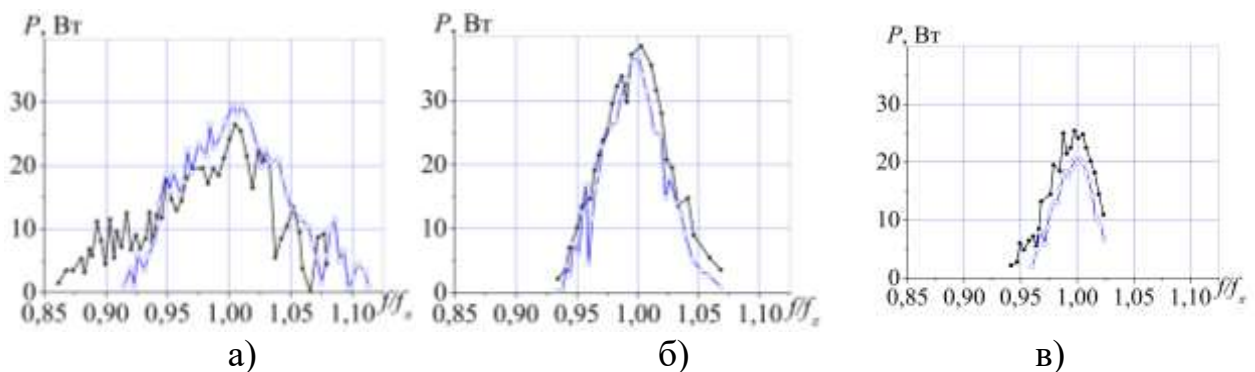


Рисунок 3 – Зміна вихідної потужності ГДВ в смузі перестроювання по частоті при висоті здвоєної гребінки 6 мм (а), 8 мм (б) та 10 мм (в) для TEM_{004} -моди (криві —●—) та TEM_{006} -моди (криві -○-)

Для зменшення масогабаритних параметрів ГДВ виконано дослідження малогабаритного ГДВ для K_a -діапазону з робочою TEM_{001} -модю, що мала практично мінімальний розмір плями поля на періодичній структурі $\sim 1,2\lambda$. Вихідна потужність генерованих коливань становила $P = 32$ Вт при робочому струмі $I_a = 140$ мА, а ширина смуги електронного перестроювання частоти в малогабаритному ГДВ збільшилась до $\Delta f_e = 64$ МГц.

В розділі 3 наведено результати експериментальних досліджень властивостей резонансних мод у ВР із фокуруючим дзеркалом, складеним із кількох відбивачів із циліндричною поверхнею. Для випадку H -поляризації встановлено структуру поля та добротність резонансних мод у смузі перестроювання по частоті $f = 25 \div 38$ ГГц при використанні фокууючого дзеркала, складеного з двох, трьох та чотирьох відбивачів. Для реєстрації розподілу резонансного поля вздовж простору взаємодії безпосередньо на

поверхні дзеркала досліджуваної ВРС було застосовано метод аналізу структури поля по зміні коефіцієнта зв'язку β резонансної моди з навантаженням (рис. 4,а). Встановлено, що у ВР із фокусуючим дзеркалом, складеним із двох відбивачів із циліндричною поверхнею, розподіл поля TEM_{00q} -моди близький до квазіоптичної суми гаусових плям (рис. 4,б), сформованих суміжними відбивачами, та суттєво відрізняється від квазіоптичної суми гаусових плям при використанні фокусуючого дзеркала, складеного з трьох (рис. 4,в) та чотирьох відбивачів із циліндричною поверхнею. Показано, що вищі TEM_{m0q} -моди у ВР зі складеним фокусуючим дзеркалом також можуть використовуватись для подовження простору взаємодії в багатокаскадному ГДВ, причому у випадку H -поляризації більшу добротність мають моди, в яких нулі в розподілі $E_x(x)$ співпадають зі стиками суміжних циліндричних поверхонь (рис.5,а,б,в).

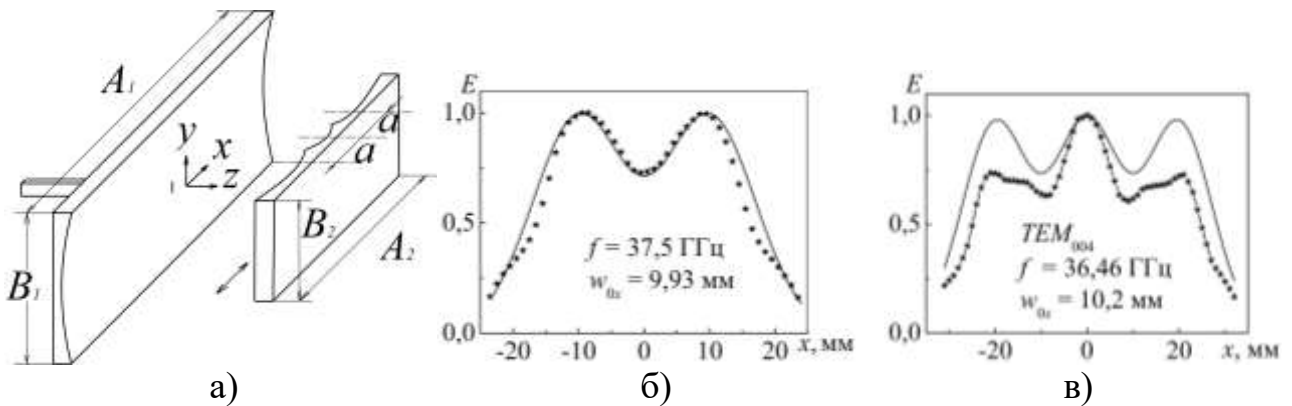


Рисунок 4 – Схема ВР із рухомих вузлах зв'язку для аналізу розподілу резонансного поля на поверхні дзеркала (а), та структура поля TEM_{004} -моди у ВР із фокусуючим дзеркалом, складеним із двох циліндричних відбивачів (б) і трьох циліндричних відбивачів (в) (суцільними лініями представлено розподіл поля, розрахований згідно квазіоптичному наближенню)

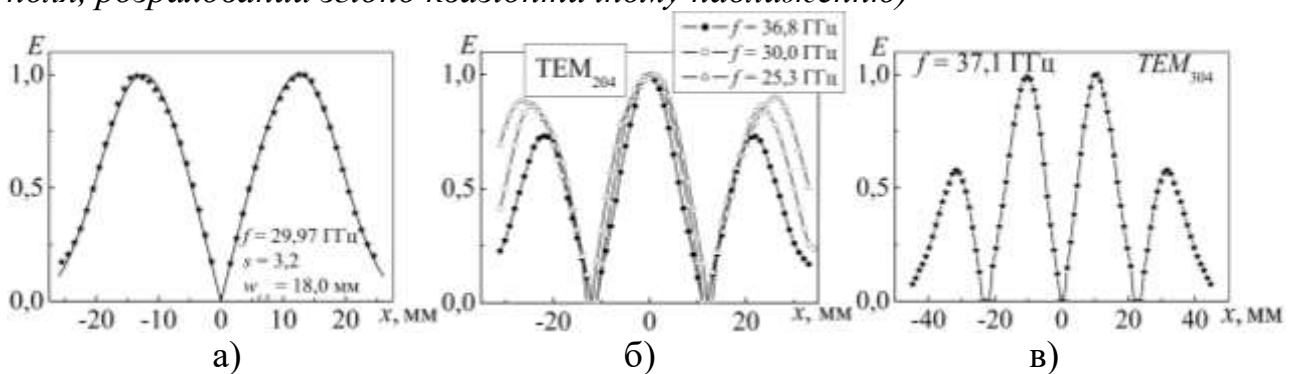


Рисунок 5 – Структура поля для TEM_{104} -моди у ВР із фокусуючим дзеркалом, складеним із двох циліндричних відбивачів (а), для TEM_{204} -моди у ВР із фокусуючим дзеркалом, складеним із трьох циліндричних відбивачів (б) і для TEM_{304} -моди у ВР із фокусуючим дзеркалом, складеним із чотирьох циліндричних відбивачів (в)

При виборі TEM_{10q} -моди як робочої моди для ГДВ необхідно забезпечити у ВР пригнічення (зниження добротності) прилеглої по частоті TEM_{00q} -моди. З

цією метою було проведено дослідження властивостей ВР із фокусуєчим дзеркалом, складеним із двох відбивачів, в якому на стику циліндричних поверхонь було утворено плоско-паралельну щілину (рис.6,а). Ця щілина сприяє ефективному висвітленню із ВР енергії резонансного поля TEM_{00q} -моди (рис.6,б). Для TEM_{10q} -моди поле на стику відбивачів близьке до нуля та щілина не збільшує радіаційні втрати у ВР (рис.6,в).

При використанні дзеркала з двох циліндричних відбивачів і виборі як робочої TEM_{00q} -моди потрапляння електричного поля на стик циліндричних поверхонь складеного дзеркала призводить до суттєвих дифракційних втрат, спричинених зломом ліній струму на поверхні фокусуєчого дзеркала. Для зменшення дифракційних втрат і формування супергаусового розподілу поля TEM_{00q} -моди на поверхні дзеркал такого ВР було запропоновано методику згладжування стику поверхонь суміжних відбивачів. Згладжування стику циліндричних поверхонь суміжних відбивачів і знаходження профілю складеного фокусуєчого дзеркала виконувалось за допомогою додавання до контуру дзеркала випуклої поверхні третього циліндру з радіусом кривизни R_b (рис.7,а).

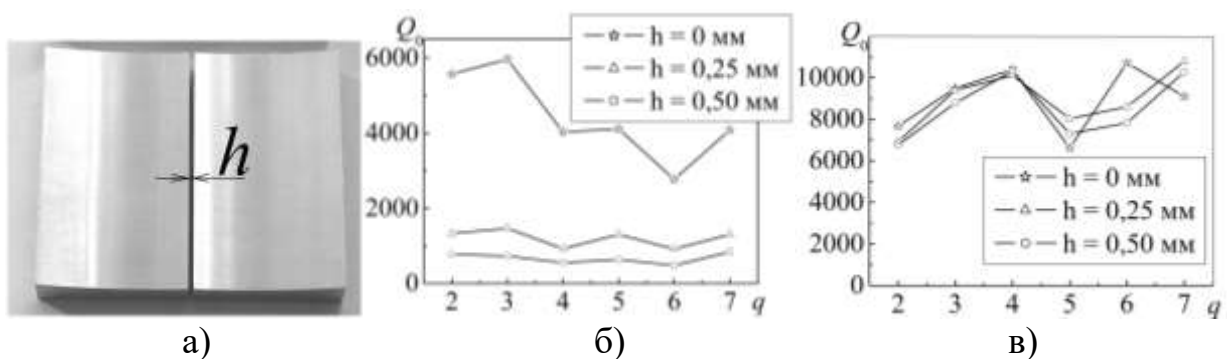


Рисунок 6 – Структура поля TEM_{104} -моди ВР із фокусуєчим дзеркалом, складеним із двох циліндричних відбивачів (б), трьох циліндричних відбивачів на TEM_{204} -моді (в) та чотирьох циліндричних відбивачів на TEM_{304} -моді

Відстань між точками дотику циліндричних поверхонь складає:

$$b = a \frac{R_b}{R_b + R_c}$$
 , де R_b – радіус згладжування стику циліндричних поверхонь, R_c – радіус кривизни поверхонь суміжних відбивачів складеного дзеркала, a – відстань між центрами кривизни суміжних відбивачів.

Після вибору оптимального радіусу згладжування було проведено порівняльний аналіз зміни добротності TEM_{004} -моди по діапазону перестроювання частоти для ВР із фокусуєчим дзеркалом без згладжування стику поверхонь відбивачів та при радіусі згладжування $R_b = 130$ мм (рис.7). Встановлено, що при згладжуванні стику на поверхні складеного дзеркала сумарна добротність ВР підвищувалась більше ніж в 4 рази (рис.7,б), а розподіл поля на плоскому дзеркалі мав супергаусовий характер (рис.7,в). Запропоновану методику згладжування стику поверхонь на складеному фокусуєчому дзеркалі було застосовано для розрахунку ВР із подовженим

полем на частоту $f = 340$ ГГц. Вдалося збільшити довжину плями поля майже в 2 рази та отримати супергаусовий розподіл амплітуди в порівнянні з ВР, що мав одне циліндричне дзеркало та гаусів розподіл амплітуди в плямі поля на TEM_{00-11} -моді: при добротності ВРС $Q_0 = 18400$ одержано довжину плями поля $2\omega_{sx} = 11,7$ мм.

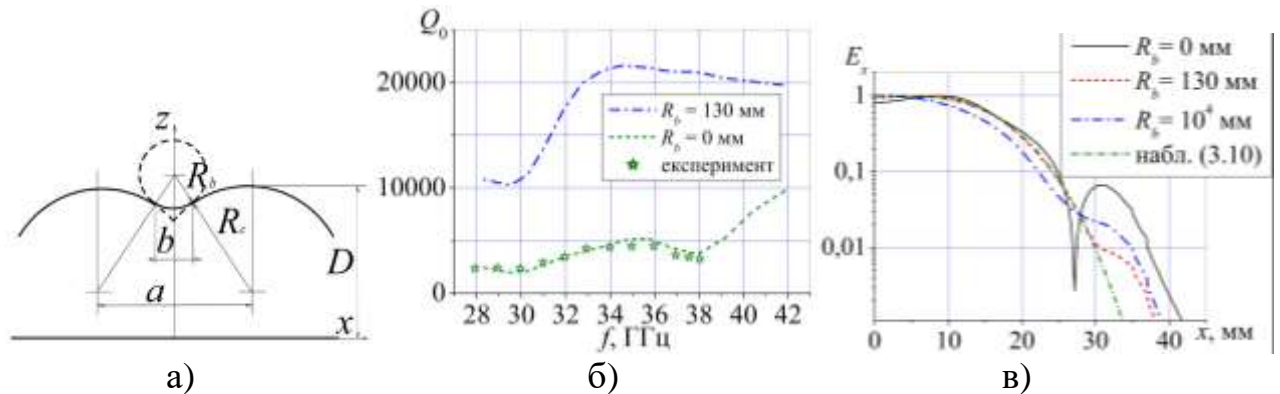


Рисунок 7 – ВР зі згладженим стиком суміжних поверхонь складеного фокуруючого дзеркала: а) схема контурів дзеркал для 2-D моделі (випадок Н-поляризації); б) зміна добротності TEM_{00q} -моди по діапазону перестроювання частоти у ВР без згладжування стику циліндричних поверхонь ($R_b = 0$ мм) та у ВР із радіусом згладжування $R_b = 130$ мм (зірочки - експеримент); в) розподіл E_x -компоненти поля TEM_{00q} -моди поблизу поверхні плоского дзеркала

У розділі 4 для зменшення впливу зведеної гребінки на структуру робочої моди, розширення діапазону перестроювання ГДВ по частоті та підвищення стабільності частоти генерації проведено дослідження властивостей резонансних мод в асиметричній ВРС, де зведеною гребінку зміщено на периферію плями поля робочої TEM_{00q} -моди в напрямку, перпендикулярному до руху електронного потоку (рис.8).

Наведено результати експериментальних досліджень властивостей робочої TEM_{00q} -моди у ВРС при симетричному й асиметричному розміщенні зведеної гребінки на плоскому дзеркалі, а також наведено результати 2D-моделювання й експериментальних досліджень структури резонансних полів у симетричній та асиметричній ВРС.

Було встановлено, що в асиметричній ВРС зведена гребінка при відстроюванні від оптимальної частоти f_π лише “зсуває” розподіл резонансного поля (рис.8,б) без суттєвого збільшення втрат на випромінювання із резонатора, тобто знижує свій вплив на поле робочої TEM_{00q} -моди та зменшує омичні втрати у гребінці. Це сприяє підвищенню добротності ВРС (рис.9,а) і розширює смугу перестроювання ГДВ по частоті.

Для об’єктивної оцінки переваг ГДВ з асиметричною ВРС проведено порівняння вихідних характеристик генератора в «гарячому» режимі на одному макеті ГДВ при симетричному й асиметричному розміщенні зведеної гребінки в плямі поля робочої TEM_{00q} -моди. Для ГДВ з обома типами ВРС проведено порівняння ширини діапазону одномодового перестроювання по частоті,

величини пускового струму та рівня вихідної потужності та загального ККД генератора (рис.9,б,в).

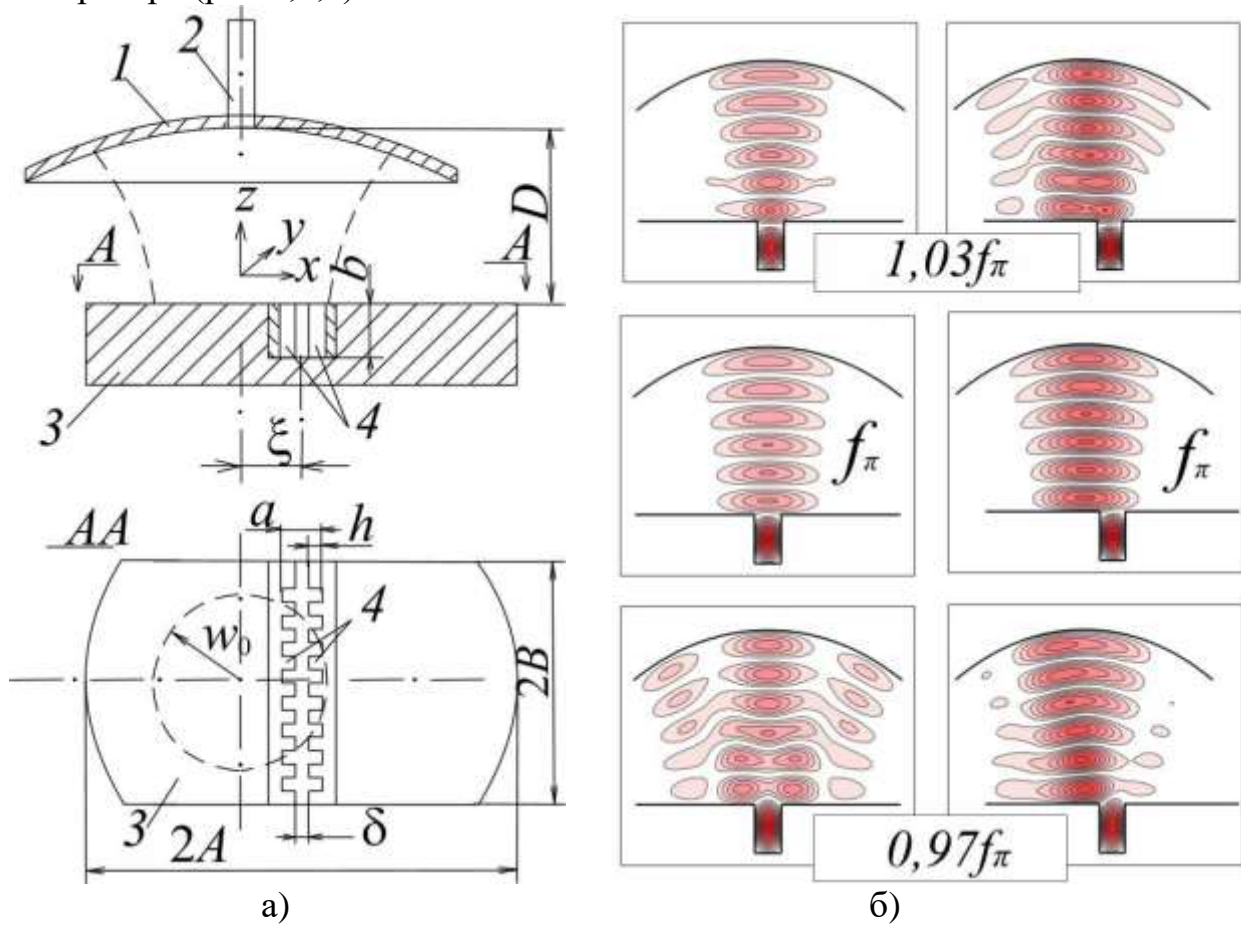


Рисунок 8 – Схема асиметричної ВРС (а) (1 – сферичне дзеркало; 2 – вузол зв'язку з навантаженням; 3 – плоске дзеркало; 4 – здвоєна гребінка) та зміна структури резонансного поля для TEM_{006} -моди по діапазону перестроювання частоти (б): (ліва колонка – симетрична ВРС; права колонка – асиметрична ВРС)

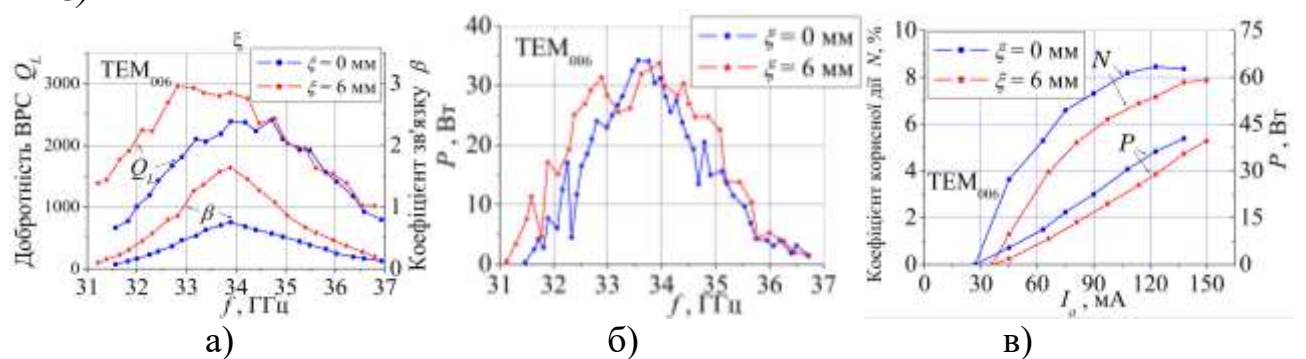


Рисунок 9 – Порівняльні характеристики експериментального макета ГДВ із симетричною й асиметричною ВРС при роботі на TEM_{006} -моді: а) добротність ВРС і коефіцієнт зв'язку з навантаженням; б) вихідна потужність ГДВ; в) залежність ККД і вихідної потужності ГДВ від робочого струму

Зміщення здвоєної гребінки на периферію плями поля сприяло розширенню смуги перестроювання ГДВ по частоті в 1,3 раза, і хоча призвело

до збільшення стартового струму ГДВ в $\sim 1,5$ раза, але також зменшило ефективну довжину простору взаємодії та вплив перегрупування в електронному потоці на вихідні параметри ГДВ. Так, при робочому струмі $I_a = 150$ мА загальний ККД у ГДВ із асиметричною ВРС склав $N = 11\%$ і ще не мав насичення при рівні вихідної потужності $P = 60$ Вт, а при використанні симетричної ВРС вихідні параметри ГДВ при $I_a = 150$ мА складали тільки: $N = 9,4\%$; $P = 50$ Вт.

У розділі 5 наведено детальний аналіз особливостей конкуренції мод у ГДВ із симетричною й асиметричною ВРС. Також представлено результати розробки й експериментальних досліджень ГДВ із перестроюванням частоти на одній із гілок зв'язаних мод $TEM_{001} \leftrightarrow TEM_{101}$, що виникають у ВРС при цільовому зсуві між площинами симетрії дзеркал.

Розглянемо властивості TEM_{001} та TEM_{101} -мод, збуджуваних у симетричній ВРС із прямокутною канавкою на плоскому дзеркалі й ідеальною провідністю дзеркал. Внаслідок подовження H_{10} -хвилі в прямокутній канавці крутизна дисперсійної кривої для TEM_{001} -моди вище, ніж у дисперсійної кривої для TEM_{101} -моди (рис.10,а). При перестроюванні частоти на робочій TEM_{001} -моді спостерігається суттєва зміна розподілу E_y -складової резонансного поля (рис.10,б, А,В,С), а на нижній границі смуги перестроювання частоти спостерігається взаємодія мод із парними поперечними індексами $TEM_{001} \leftrightarrow TEM_{201}$, яка супроводжується зниженням радіаційної добротності у ВРС до $lg Q_{rad} = 2 \div 3$. Резонансне поле непарної TEM_{101} -моди не проникає у прямокутну канавку, а його структура поля практично не змінюється по діапазону перестроювання частоти (рис.10,б, D). Поблизу точки перетину дисперсійних кривих TEM_{001} та TEM_{101} -мод (при $f = 30,107$ ГГц, $D = 6,29$ мм) не спостерігається локальної зміни добротності ВРС, тобто взаємодія між TEM_{001} та TEM_{101} -модами в симетричній ВРС відсутня.

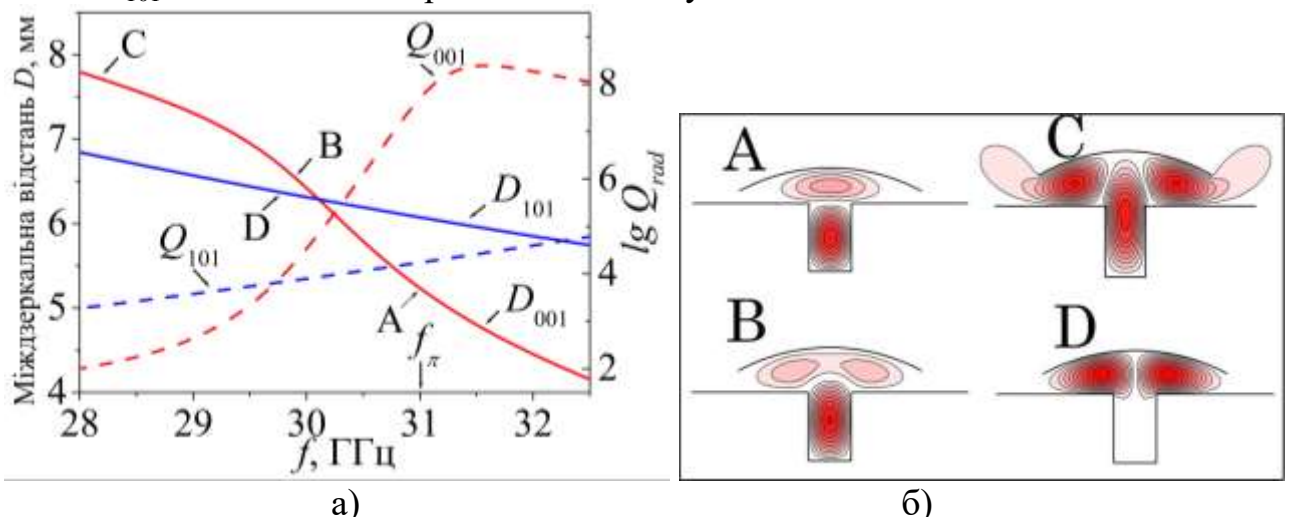


Рисунок 10 – Дисперсійна діаграма $D(f)$ та радіаційна добротність $Q_{rad}(f)$ для 2-D моделі симетричної ВРС із прямокутною канавкою на плоскому дзеркалі (а), та розподіл E_y -складової резонансного поля (б) в точках А, В, С, D для дисперсійних кривих, приведені на рис.10,а

Точка перетину дисперсійних кривих ($f_{\text{МКТ}}, D_{\text{МКТ}}$) для TEM_{001} та TEM_{101} -мод у симетричній ВРС (рис.11,а) відповідає координатам Морсівської критичної точки (МКТ) [18] для дисперсійного рівняння зв'язаних мод $\text{TEM}_{001} \leftrightarrow \text{TEM}_{101}$ у ВРС зі зсувом $\xi \neq 0$ між площинами симетрії дзеркал. На дисперсійній діаграмі поблизу МКТ ($f_{\text{МКТ}} = 30,107$ ГГц, $D_{\text{МКТ}} = 6,29$ мм) утворюється зона зв'язаних мод $\text{TEM}_{001} \leftrightarrow \text{TEM}_{101}$ із нижньою та верхньою гілками для парціальних частот, котра розширюється зі збільшенням ширини зсуву ξ між площинами симетрії дзеркал.

Особливості розподілу E_y -складової резонансного поля при перестроюванні частоти на нижній та верхній гілках зв'язаних мод $\text{TEM}_{001} \leftrightarrow \text{TEM}_{101}$ при зсуві між площинами симетрії дзеркал $\xi = 2,45$ мм наведено на рис.11,б. Перестроювання вниз по частоті на нижній гілці зв'язаних мод супроводжується трансформацією структури поля з TEM_{001} у TEM_{101} -моду (поля А, В, С на рис.11,б). При перестроюванні вниз по частоті на верхній гілці зв'язаних мод спостерігається трансформація структури поля з TEM_{101} в TEM_{201} -моду (поля Е, F, G на рис.11,б). Відмітимо, що в 2-D моделі спостерігається суттєвий рівень резонансного поля в прямокутній канавці при перестроюванні ВРС як на нижній, так і на верхній гілках зв'язаних мод $\text{TEM}_{001} \leftrightarrow \text{TEM}_{101}$, що дає підставу для збудження генерації в ГДВ на обох гілках зв'язаних мод. Можливість отримання генерації в ГДВ на зв'язаних модах вже була продемонстрована в експерименті іншими авторами [19,20].

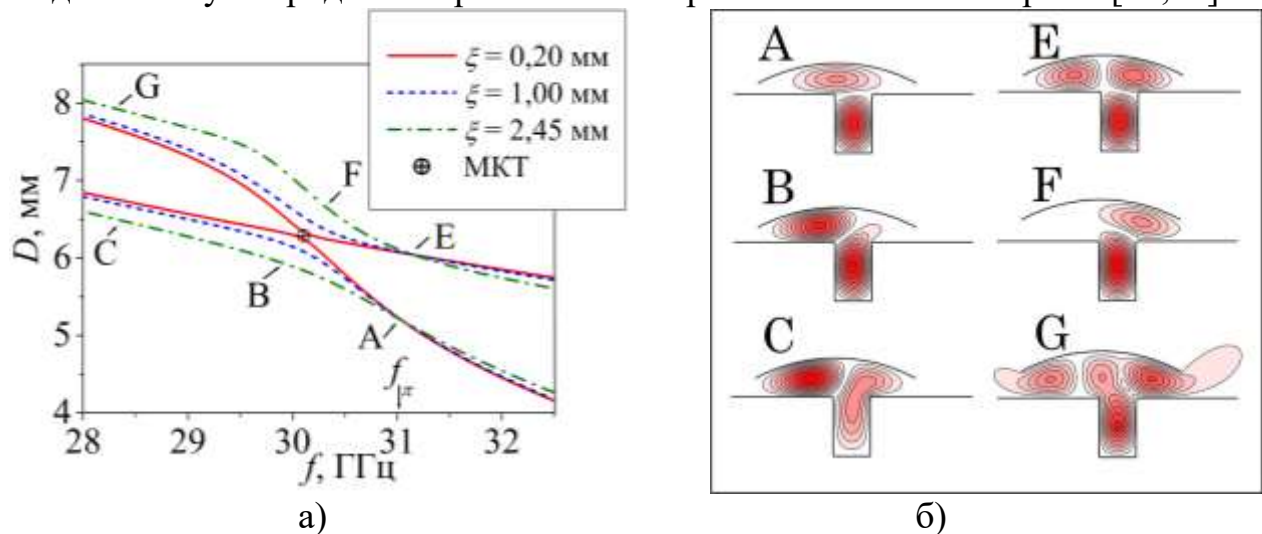


Рисунок 11 – Дисперсійна діаграма для зв'язаних мод $\text{TEM}_{001} \leftrightarrow \text{TEM}_{101}$ у ВРС при декількох значеннях зсуву ξ між площинами симетрії дзеркал (а), та розподіл E_y -складової резонансного поля у ВРС зі зсувом $\xi = 2,45$ мм в точках А, В, С, Е, F, G (б)

Було проведено «гарячі» дослідження ГДВ на зв'язаних модах, які показали, що при невеликому зсуві між площинами симетрії дзеркал ($\xi = 0,2$ мм) перестроювання частоти в ГДВ спостерігалось на TEM_{001} та TEM_{201} -модах, а локальна взаємодія TEM_{001} та TEM_{101} -мод спостерігалась поблизу МКТ ($f_{\text{МКТ}} = 29,30$ ГГц, $D_{\text{МКТ}} = 6,30$ мм). При збільшенні зсуву до $\xi = 2,5$ мм генерація коливань в ГДВ спостерігалась окремо як на нижній, так і

на верхній гілках зв'язаних мод $TEM_{001} \leftrightarrow TEM_{101}$. У ГДВ спостерігалось збудження коливань також на TEM_{201} -моді, яка при $\xi = 2,5$ мм також вступає у взаємодію з TEM_{301} -модом, що призводить до зниження крутизни її дисперсійної кривої (рис.12,а). При роботі ГДВ на нижній гілці зв'язаних мод $TEM_{001} \leftrightarrow TEM_{101}$ спостерігалось симетричне розширення смуги перестроювання по частоті, та зникли провали у вихідній потужності. При робочому струмі $I_a = 120$ мА максимум вихідної потужності ГДВ на нижній гілці зв'язаних мод $TEM_{001} \leftrightarrow TEM_{101}$ складав $P = 30$ Вт та практично не відрізнявся від максимальної вихідної потужності в ГДВ з малим зсувом ($\xi = 0,2$ мм) між площинами симетрії дзеркал (рис.12,б). Збудження коливань в ГДВ на верхній гілці зв'язаних мод $TEM_{001} \leftrightarrow TEM_{101}$ спостерігалось у смузі частот $29 \text{ ГГц} < f < 30,5 \text{ ГГц}$, а рівень вихідної потужності не перевищував $P = 4,5$ Вт.

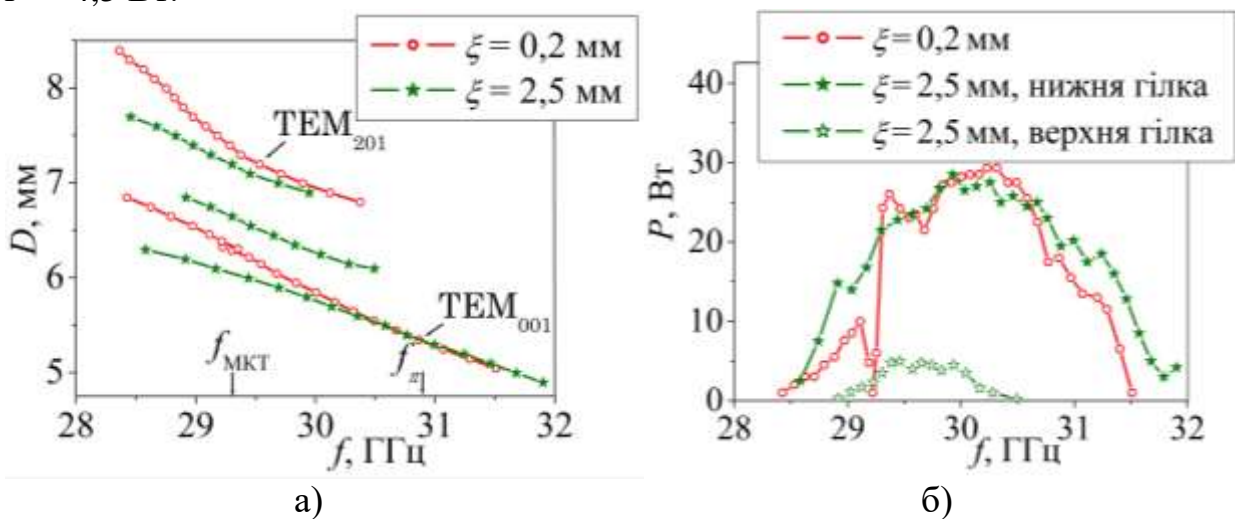


Рисунок 12 – Дисперсійна діаграма для зв'язаних мод при роботі ГДВ у «гарячому» режимі (а). Зміна вихідної потужності ГДВ (б) при роботі на зв'язаних модах $TEM_{001} \leftrightarrow TEM_{101}$

Отже, результати 2-D моделювання зв'язаних мод в асиметричній ВРС узгоджуються з експериментальними даними, отриманими при «холодних» дослідженнях макету ГДВ, а при «гарячих» дослідженнях ГДВ, що працював на зв'язаних модах $TEM_{001} \leftrightarrow TEM_{101}$, одержано розширення смуги перестроювання по частоті з 7% до 11,5% без провалів в вихідній потужності генератора.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну задачу сучасної радіофізики - розробка та дослідження генераторів дифракційного випромінювання (ГДВ) та їх відкритих резонансних систем (ВРС) із метою розширення смуги перестроювання по частоті, зменшення масогабаритних параметрів та освоєння терагерцевого діапазону частот.

Основні результати роботи зводяться до наступного:

1. У ГДВ із періодичною структурою у вигляді здвоєної гребінки досліджено вплив висоти гребінки b на добротність ВРС і ширину смуги перестроювання по частоті. Встановлено, що поведінка добротності ВРС по смузі перестроювання частоти на TEM_{00q} -моді має резонансний характер із максимумом поблизу частоти f_π , яка відповідає повному фазовому узгодженню здвоєної гребінки з полем ВРС при $b = 0,5\lambda_g$ (λ_g – довжина H_{10} -хвилі в багатожолобковому хвилеводі, утвореному протилежними щілинами здвоєної гребінки). Показано, що при збільшенні висоти здвоєної гребінки ширина смуги перестроювання ГДВ знижується пропорційно $(\lambda/\lambda_g)^2$.

2. Встановлено, що оптимальна висота здвоєної гребінки за критерієм “широка смуга перестроювання ГДВ по частоті плюс висока добротність коливаль” відповідає умові $0,65 < b/\lambda_\pi < 0,90$, а ширина смуги перестроювання по частоті визначається умовою $|\Delta\varphi| \leq 0,1\pi$, ($\Delta\varphi$ - різниця фаз між хвилями, відбитими від здвоєної гребінки та поверхні плоского дзеркала). В макеті ГДВ для K_a -діапазону з висотою здвоєної гребінки $b/\lambda_\pi = 0,67$ при роботі на TEM_{006} -моді було отримано максимальну ширину смуги перестроювання по частоті $\Delta f/f_\pi = 12\%$ при добротності ВРС $Q_0 > 3000$.

3. Для розрахунку стартових струмів ГДВ запропоновано експериментальний метод визначення частки енергії поля робочої TEM_{00q} -моди безпосередньо в щілинах здвоєної гребінки та показано, що вона зростає пропорційно $(b/\lambda_\pi)^3$ та складає $(0,9 \div 4,5)$ від енергії резонансного поля в одній варіації сталої хвилі у ВРС. За результатами експерименту розраховано омічні втрати у ВРС зі здвоєною гребінкою та показано, що вони різко зростають з подовженням H_{10} -хвилі в багатожолобковому хвилеводі, утвореному протилежними щілинами здвоєної гребінки.

4. Вперше запропоновано та досліджено особливості роботи ГДВ на асиметричних модах, які виникають у ВРС при зміщенні здвоєної гребінки на периферію плями поля в напрямку, перпендикулярному до руху електронного потоку. Встановлено, що використання ВРС із асиметричними модами знижує деструктивний вплив здвоєної гребінки на формування резонансного поля та зменшує омічні втрати у гребінці, що сприяє підвищенню добротності ВРС і розширює смугу перестроювання ГДВ по частоті в 1,5 раза, яка для ГДВ 8-мм діапазону становить $\Delta f/f_\pi = 9,4\%$ при вихідній потужності $P_{\max} = 35$ Вт.

5. Вперше запропоновано та досліджено особливості роботи ГДВ на міжтиповому колюванні у його ВРС, що виникає при створенні умов для зв'язку між парною TEM_{001} -модю та непарною TEM_{101} -модю, що має невеликі радіаційні втрати. Показано, що при виборі оптимального зв'язку між робочою TEM_{00q} -модю та найближчою TEM_{10q} -модю виникає можливість організувати перестроювання частоти ГДВ поблизу МКТ на одній із гілок зв'язаних мод у широкій смузі частот без впливу вищих мод на вихідні характеристики генератора, а саме: одержано розширення смуги перестроювання по частоті з 7% до 11,5% без провалів у вихідній потужності генератора при $P_{\max} = 30$ Вт.

6. Для зменшення масогабаритних параметрів виконано дослідження малогабаритного ГДВ для K_a -діапазону з робочою TEM_{001} -модю, що має

практично мінімальний розмір плями поля на періодичній структурі $\sim 1,2\lambda$. Вихідна потужність генерованих коливань становить $P = 32$ Вт при робочому струмі $I_a = 140$ мА, а ширина смуги електронного перестроювання частоти в малогабаритному ГДВ збільшується до $\Delta f_e = 64$ МГц.

7. Вперше запропоновано й апробовано метод рухомого вузла зв'язку для експериментальних досліджень розподілу резонансного поля безпосередньо на поверхні дзеркала ВР: розподіл E -компоненти поля реєструється по зміні коефіцієнта зв'язку ВР із навантаженням при переміщенні вузла зв'язку в плямі поля досліджуваної моди. Метод придатний для аналізу структури резонансного поля в малооб'ємних ВР з роздільною здатністю $\sim 0,1$ мм.

8. Для подовження простору взаємодії в ГДВ терагерцевого діапазону досліджено властивості резонансних мод у ВРС з багатофокусним дзеркалом, складеним із декількох відбивачів із циліндричною поверхнею. Встановлено, що розподіл поля TEM_{00q} -моди (випадок H -поляризації) близький до квазіоптичної суми гаусових плям, сформованих двома відбивачами, та суттєво відрізняється від квазіоптичної суми гаусових плям, сформованих трьома та чотирма відбивачами. Показано, що вищі TEM_{m0q} -моди у ВРС зі складеним фокусуєчим дзеркалом також можуть використовуватись для подовження простору взаємодії в ГДВ, причому у випадку H -поляризації більшу добротність мають моди, в яких нулі в розподілі $E(x)$ співпадають зі стиками суміжних циліндричних поверхонь.

9. Для формування плями поля з супергаусовим розподілом поля TEM_{00q} -моди у ВРС із фокусуєчим дзеркалом, складеним із двох відбивачів, запропоновано просту методику згладжування стику відбивачів випуклою поверхнею циліндра з оптимальним радіусом кривизни. Для терагерцевого діапазону ($f = 340$ ГГц) проведено 2-D моделювання ВРС зі згладженим стиком складеного фокусуєчого дзеркала на $TEM_{00,11}$ -моді: при сумарній добротності $Q_0 = 18400$ одержано супергаусовий розподіл в плямі поля довжиною $2\omega_{sx} = 11,7$ мм.

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Paoloni C., Gamzina D., Letizia R., Zheng Y., Luhmann N.C. (2020): Millimeter wave traveling wave tubes for 21st Century // Journal of Electromagnetic waves and Applications, DOI: 101080/09205071.2020.1848643.

2. Soltani H.B., Abiri H. (2018): Criteria for Determining Maximum Theoretical Oscillation Frequency of Extended Interaction Oscillator for Terahertz Applications // IEEE Transactions on Electronic Devices, DOI: 10.1109/IED.2018.2808164.

3. Horoyski P., Berry D. (2013) High power CW 264 GHz tunable Extended Interaction Oscillator // IVEC Conference paper 2013, DOI: 10.1109/IVEC.2013.6570976.

4. Yang J., Cai K., Geng G. et al. (2019) A staggered double-vane slow wave structure with double sheet electron beams for 340 GHz traveling wave tube // *Journal of Electromagnetic waves and Applications*, DOI: 101080/09205071.2019.1624628.

5. Lewis R.A. A review of terahertz sources // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2014. Vol. 47. No. 37. 374001.

6. Ponomarenko S.S., Kishko S.A., Khutoryan E.M., Kuleshov A.N., Zavertanniy V.V., Lopatin I.V., Yefimov B.P. The 400 GHz Continuous-Wave Clinotron Oscillator // *IEEE Trans. on Plasma Science.* 2013. V. 41, N. 1. P. 82–86.

7. Шестоपालов В.П. Дифракционная элетроника. -Харьков. 1976. Изд-во Харьк. ун-та. -232с.

8. Мирошниченко В.С. Генераторы дифракционного излучения на пути к терагерцам // ISSN 1028-821X. Радиофизика и электроника, 2008, т.13, спец. вып., сс.290-300.

9. Демченко М.Ю., Мирошниченко В.С., Свищев Ю.В., Сенкевич Е.Б. Электродинамическая система для генератора дифракционного излучения с резонансным согласованием дифракционной решетки // *Радиофизика и электроника.* 2007. Т.12, №2, сс.383-388.

10. Єрьомка В.Д., Мірошниченко В.С., Демченко М.Ю. Орбітрон - генератор дифракційного випромінювання // Патент України: UA. 105215, H01J 25/00. опубл. 25.04.2014

11. Скрынник Б.К., Корнеев В.К. Малообъемный пакетированный ГДИ с изохронной дифракционной решеткой // *Радиофизика и электроника.* – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. –2002. - Т.7, №1. - С.127-132.

12. А.С. СССР №669963, 1976г. Генератор дифракционного излучения. Еремка В.Д., Корнеев В.К., Скрынник Б.К., Шестоपालов В.П.

13. Корнеев В.К., Мирошниченко В.С. Пакетированные ГДИ диапазона частот 25-100 ГГц // I Украинский симпозиум «Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн» -Харьков .1991. 15-18 Октября. Т.1, сс.130-131.

14. Демченко М.Ю., Корнеев В.К., Мирошниченко В.С., Скрынник Б.К. Многодиапазонный ГДИ с двойной решеткой // *Радиофизика и электроника.* –Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. - 1999, т.4, №2, сс.99-103.

15. Демченко М.Ю., Корнеев В.К., Мирошниченко В.С., Поединчук А.Е., Свищев Ю.В., Тучкин Ю.А. Открытый резонатор с прямоугольной канавкой на зеркале, теория и эксперимент // *Радиофизика и электроника.* – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 2000. - Т. 5, № 3. - С.19-29.

16. Svezhentsev A.Y., Miroshnichenko V.S. and Vandenbosh G.A. Fast h-Waves in Double Comb Infinite Arrays // *Progress in Electromagnetic Research C.* Vol.80. 119-129. 2018. doi: 10.2528/PIERC1709140.

17. Ревин И.Д., Скрынник Б.К., Сысоев А.С., Третьяков О.А., Шестопапов В.П. К линейной теории генераторов дифракционного излучения // Известия вузов. Радиофизика. т.20, №5, 1977. -С.764-776.
18. Шестопапов В.П. Морсовские критические точки дисперсионных уравнений. –Киев: Наук. думка. 1992. –211с.
19. Курин В.Г., Скрынник Б.К., Шестопапов В.П. Экспериментальное исследование междутиповых колебаний. // Докл. АН СССР. -1991. Т.317, №1. – С.93-96.
20. Курин В.Г., Скрынник Б.К., Шестопапов В.П. Междутиповые колебания (волны) генератора дифракционного излучения. // Докл. АН СССР. - 1992. Т.324, №5. –С.997-999.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- 1*. Мирошниченко В.С., Ковалев Е.А. Открытая резонансная система с фокусирующим зеркалом, составленным из нескольких отражателей с цилиндрической поверхностью // *Радиофизика и электроника*. 2014. –Т.5(19), №4. – С.73–82.
- 2*. Ковалев Е.А., Мирошниченко В.С. Диапазон перестройки частоты генератора дифракционного излучения с периодической структурой в виде сдвоенной гребенки // *Радиофизика и электроника*. 2016. –Т.7(21), №2. – С.36–44.
- 3*. Miroshnichenko V.S., Kovalov I.O. Diffraction Radiation Oscillator with Asymmetric Open Resonant System. Part I. Cold Test Results of Open Resonant System. // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2016. –Vol. 8, No 2. P.02033(7pp).
- 4*. Miroshnichenko V.S., Kovalov I.O. Diffraction radiation oscillator with asymmetric open resonant system. Part 2. The hot test results of diffraction radiation oscillator. // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2016. –Vol. 8, No 2. P.02034(8pp).
- 5*. Kovalov I.O., Miroshnichenko V.S. and Senkevich Ye.B. Diffraction Radiation Oscillator with Frequency Tuning on Mutual Coupled Modes in an Open Resonant System // *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol.87, pp.1-11, 2018.
- 6*. Мирошниченко В.С., Ковальов Є.О. Генератор дифракційного випромінювання // Патент на винахід. UA 114548 C2, H01J 25/00, H01J 25/02. Україна. Бюл. №12. 26.06.2017 р.
- 7*. Kovalov I.O., Miroshnichenko V.S. The field structure of open resonant system with multifocal mirror // 2015 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), Dnepropetrovsk, Ukraine, Sept.29 2015 – Oct.2 2015.
- 8*. Kovalov I.O., Miroshnichenko V.S. - The Features of Diffraction Radiation Oscillator Operating on the 1st Gaussian Mode of the Open Resonant System // 2016 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2016) – October 10-14, 2016. - Kharkiv, Ukraine.
- 9*. Miroshnichenko V.S. and Kovalov I.O., "Diffraction radiation oscillator with the asymmetric open resonant system," 2016 9th International Kharkiv

Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkiv, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/MSMW.2016.7538042.

10*. Kovalov I.O., Miroshnichenko V.S. Excitation of super-Gaussian modes in an open resonant system with a focusing mirror composed of paired cylindrical reflectors / 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017), Lviv, Ukraine, October 17-20 2017.

Анотація

Ковальов Є.О. Відкриті резонансні системи для генераторів дифракційного випромінювання з розвинутим простором взаємодії. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2021.

В дисертаційній роботі досліджено генератор дифракційного випромінювання з різними типами відкритих резонансних систем. Проведено дослідження впливу параметрів періодичної структури у вигляді здвоєної гребінки на ширину діапазону перестроювання ГДВ по частоті. Розглянуто особливості використання у ГДВ малогабаритної ВРС, що дозволяє уникнути збудження вищих мод, які розташовані вище по частотному діапазону. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень властивостей мод у ВР із фокусуєчим дзеркалом, складеним із кількох відбивачів із циліндричною поверхнею. Показано, що для роботи ГДВ на основній TEM_{00q} -моді найбільш придатною є ВР із фокусуєчим дзеркалом, складеним із двох відбивачів. Задля зменшення дифракційних втрат і формування супергаусових полів у ВРС було запропоновано методику згладжування стику циліндричних поверхонь фокусуєчого дзеркала. Також було проведено дослідження ГДВ із асиметричною ВРС, в якій здвоєна гребінка зміщується на периферію плями поля робочої TEM_{00q} -моди в напрямку, перпендикулярному до руху електронного потоку. В роботі наведено детальний аналіз особливостей конкуренції мод у ГДВ із симетричною й асиметричною ВРС і представлено результати розробки й експериментальних досліджень особливостей роботи ГДВ на зв'язаних модах в його ВРС.

Ключові слова: генератор дифракційного випромінювання, відкрита резонансна система, періодична структура, здвоєна гребінка, міліметровий діапазон, складене дзеркало, супергаусове поле.

Abstract

Kovalov I.O. Open resonant systems of diffraction radiation oscillators with developed interaction space. – On the manuscript.

Thesis for scientific degree of candidate of science in physics and mathematics on specialty 01.04.03 – radiophysics. – O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine, Kharkiv, 2021.

In the thesis, a diffraction radiation oscillator with different types of open resonant system is studied. It is shown a study of parameters influence of periodical structure in form of double comb on the frequency tuning range of DRO. The peculiarities of using small-sized ORS in DRO, allow avoiding the excitation of higher modes, which are upper in a frequency range. The results of theoretical and experimental studies of modes properties in ORS with a focal mirror composed of several reflectors with the cylindrical surface are presented. It is shown, that ORS with focal mirror composed of two reflectors is the most suitable for operation of DRO on the main TEM_{00q} mode. To decrease diffraction loss and to form super-Gaussian fields in ORS it is suggested to use the method of blending the joint of cylindrical reflectors. The Studies of DRO with the asymmetric ORS, where the double comb is shifted to the periphery of the field spot of operating TEM_{00q} mode in a direction perpendicular to the motion of the electron beam, are performed. The thesis presents a detailed analysis of the peculiarities of modes competition in DRO with symmetric and asymmetric ORS. The results of development and experimental studies of DRO with periodic structure in form of double comb and frequency tuning on coupled modes in its ORS are also presented.

Key words: diffraction radiation oscillator, open resonant system, periodic structure, double comb, millimetre waves, composed mirror, super-Gaussian field.