

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Електронної та біомедичної інженерії \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв \_\_\_\_\_  
(повна назва)

## АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

\_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_  
(рівень вищої освіти)

\_\_\_\_\_ (позначення документа)

\_\_\_\_\_ Нерегулярні резонансні структури НВЧ діапазону \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МНПМ-19-1 \_\_\_\_\_

Дороган М.М. \_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна  
техніка \_\_\_\_\_

Тип програми освітньо-професійна \_\_\_\_\_

Освітня програма Мікро- та наноелектронні  
прилади та пристрої \_\_\_\_\_

Керівник докт. фіз.-мат. наук, професор зав.  
каф. МЕЕПП Бондаренко І.М. \_\_\_\_\_

Допускається до захисту

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_ (підпис)

Бондаренко І.М.  
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Електронної та біомедичної інженерії \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка \_\_\_\_\_

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_

Освітня програма Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої \_\_\_\_\_

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Дорогану Максиму Миколайовичу \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «НЕРЕГУЛЯРНІ РЕЗОНАНСНІ СТРУКТУРИ НВЧ ДІАПАЗОНУ» \_\_\_\_\_

затверджена наказом по університету від \_\_\_\_\_ 2020 р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

Провести дослідження щодо поширеності нерегулярних структур в техніці НВЧ діапазону, методів визначення їх характеристик, прикладів реалізації та перспективних можливостей застосування

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1. Типи резонансних структур НВЧ діапазону, їх характеристики, порівняння та напрямки застосування;

2. Приклади нерегулярних структур НВЧ діапазону

3. Напрямки застосування складних нерегулярних структур НВЧ діапазону

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) \_\_\_\_\_

Слайди – 36 шт. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Типи резонансних структур НВЧ діапазону, їх характеристики, порівняння та напрямки застосування	26.10	
2	Приклади нерегулярних структур НВЧ	13.11	
3	Напрямки застосування складних нерегулярних структур НВЧ діапазону	25.11	
4	Пояснювальна записка	03.12	

Дата видачі завдання 30 жовтня 2020 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ проф. зав. каф. МЕЕПП Бондаренко І.М.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи магістра містить: 51 с., 30 рис., 7 табл., 25 джерел, 2 додатки.

РЕЗОНАНСНІ СТРУКТУРИ, КОАКСІАЛЬНИЙ ЗОНД, НАДВИСОКІ ЧАСТОТИ, НЕРЕГУЛЯРНІ, ДОБРОТНІСТЬ, РЕЗОНАНСНА ЧАСТОТА.

Об'єкт дослідження – нерегулярні резонансні структури НВЧ діапазону.

Мета роботи – аналіз можливостей та напрямків застосування нерегулярних резонансних структур НВЧ діапазону.

Метод досліджень – Теоретично-експериментальний. Аналіз статей та праць по цій темі разом з експериментальним дослідженням резонансних структур.

Опис розділів

У першому розділі розглянуто типи та наведено характеристики резонансних структур НВЧ діапазону.

У другому розділі описані можливі типи нерегулярних резонансних структур та наведено результати їх досліджень.

У третьому розділі обговорюються та аналізуються можливі напрямки застосування нерегулярних резонансних структур.

## ABSTRACT

The explanatory note of the attestation work of the master contains: 51 pages, 30 figures, 7 tables, 25 references, 2 annexes.

RESONANT STRUCTURES, COAXIAL PROBE, EXTREMELY HIGH FREQUENCY, IRREGULAR, QUALITY, RESONANCE FREQUENCY.

The object of research – irregular resonant structures of the microwave range.

The purpose of the work – analysis of possibilities and directions of application of irregular resonant structures of the microwave range.

Research method – Theoretical and experimental. Analysis of the state and works on this topic together with the experimental study of resonant structures.

Description of sections

The first section considers the types and characteristics of the resonant structures of the microwave range.

The second section describes the possible types of irregular resonant structures and presents the results of their research.

The third section discusses and analyzes possible applications of irregular resonant structures.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....	7
ВСТУП.....	8
1 ТИПИ РЕЗОНАНСНИХ СТРУКТУР НВЧ ДІАПАЗОНУ, ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОРІВННЯ ТА НАПРЯМКИ ЗАСТОСУВАННЯ.....	11
1.1 Характеристики резонансних структур НВЧ діапазону.....	11
1.2 Порівняння резонансних структур НВЧ діапазону .....	14
1.2.1 Призматичні прямокутні резонатори на видах коливань $H_{01n}$ .....	18
1.2.2 Циліндричний резонатор на виді коливань $H_{011}$ .....	20
2 ПРИКЛАДИ НЕРЕГУЛЯРНИХ СТРУКТУР НВЧ ДІАПАЗОНУ.....	23
2.1 Нерегулярні коаксіальні структури.....	23
2.2 Резонансні структури на основі мікροстрічкових структур.....	30
3 НАПРЯМКИ ЗАСТОСУВАННЯ СКЛАДНИХ НЕРЕГУЛЯРНИХ СТРУКТУР НВЧ ДІАПАЗОНУ.....	34
3.1 Мікрохвильова скануюча зондова мікроскопія.....	34
3.2 Безелектродна лампа на основі резонансної нерегулярної НВЧ структури.....	37
3.3 Мікрохвильовий зонд на основі компенсованого нерегулярного поза межного хвилеводу.....	42
ВИСНОВКИ.....	50
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	51

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ВП – вимірювальний перетворювач

ЕМП – електромагнітне поле

ЛМД – локальна мікрохвильова діагностика

НВЧ – над висока частота

РВП – резонаторні вимірювальні перетворювачі

СЗМ – скануюча зондова мікроскопія

СММ – скануюча мікрохвильова мікроскопія

## ВСТУП

Прийняття рішення щодо застосування резонансних структур в НВЧ діапазоні, зазвичай, базується на основі декількох основних положень, а саме: напрямок застосування (тобто задача, яку потрібно вирішити в приладі або в системі за допомогою резонансної структури); наявність (можливість) аналітичного опису або модельного уявлення; технологічність.

В більшості випадків, з урахуванням наведених положень, в мікрохвильовій техніці використовуються резонансні елементи, які побудовані на основі відрізків регулярних ліній передачі (прямокутних і циліндричних хвилеводів, коаксіальних та планарних ліній) і мають прості геометричні форми. Але зустрічаються такі випадки застосування резонансних структур де може бути зручнішим використання резонаторів не класичної форми. Наприклад, при роботі з якоюсь вибірковою структурою поля або в сполученні з мікро- та нанорозмірними елементами складної конструкції.

Сучасний стан фізики і техніки НВЧ дозволяє реалізацію високочутливих методів і засобів безконтактного контролю та дослідження фізико-технічних і фізико-хімічних властивостей напівпровідникових та діелектричних матеріалів і структур [1-5]. Методи НВЧ діагностики відрізняються різноманітністю підходів до вирішення теоретичних питань, вибору методик вимірювання і конструкцій вимірювальних перетворювачів (ВП) НВЧ. Первинні вимірювальні перетворювачі НВЧ датчиків за типом фізичних явищ можна розділити на резонаторні і хвильові [1-4,6,7]. В свою чергу, резонаторні перетворювачі (РВП) можна розділяти на РВП з об'ємною, апертурною, поверхневою і мікророздільною взаємодією. При радіохвильовому контролі традиційно використовуються антени ВП. У ВП цього типу корисний сигнал визначається інтегралом по області взаємодії хвилі і зразка, тому вони не можуть бути застосовані до проведення

локальних досліджень. У ВП хвилеводного типу, як і в антенних, для отримання інформаційних сигналів використовуються відбиті хвилі і хвилі, що пройшли скрізь об'єкт дослідження. Хвилеводні методи контролю частіше для дослідження напівпровідникових і складених діелектричних структур використовують спосіб, заснований на вимірюванні коефіцієнту відбиття електромагнітної випромінювання від зразка, який застосовується в якості кінцевого навантаження хвилеводу. ВП на основі хвилеводних ліній вимагають якісного механічного ущільнення зі зразком, для виключення розривів ліній струму провідності, що може внести значну погрішність до вимірювань, і, як правило, вимагають проведення попереднього практичного експериментального калібрування вимірювальних засобів, оскільки їх теоретичне калібрування обмежено складністю рішення відповідних аналітичних виразів.

Для проведення досліджень характеристик напівпровідникових плівок товщиною менш 30 мкм чутливості таких ВП недостатньо внаслідок невисокої локалізації поля в зразках. Застосування РВП дозволяє зменшити вплив значної частини недоліків хвилеводних ВП. Це відбувається за рахунок накопичення енергії НВЧ коливань в резонаторі і, відповідно, накопиченню результатів впливу збурення електромагнітного поля (ЕМП) зразками, які досліджуються. Результати, які досягнуті в напрямку створення НВЧ РВП і отримані при їх практичному застосуванні доказують їх перспективність для високочутливого дослідження характеристик діелектриків і напівпровідників [1-2, 8-9]. За способом взаємодії електромагнітного поля РВП з об'єктом дослідження виділяють резонаторні ВП об'ємної і апертурної взаємодії. При об'ємної взаємодії зразок розміщується у порожнині вимірювального резонатора, вносячи при цьому збурення в структуру електромагнітного поля. Це дозволяє визначати електрофізичні параметри досліджуваного зразка за ступенем збурення НВЧ поля, при усередненні його за об'ємом. У іншому випадку зразок пов'язаний з полем резонатора крізь апертуру, за рахунок чого виникають можливості локалізації області, змінні параметри

якої вимірюються. До того ж, в цьому випадку взаємодія може бути створена ближньопольовою, що надає можливість подолання бар'єру Аббе і забезпечити визначення роздільної здатності завдяки геометричним параметрам апертури, а не довжиною хвилі електромагнітних коливань.

# 1 ТИПИ РЕЗОНАНСНИХ СТРУКТУР НВЧ ДІАПАЗОНУ, ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОРІВННЯ ТА НАПРЯМКИ ЗАСТОСУВАННЯ

## 1.1 Характеристики резонансних структур НВЧ діапазону

Максимальну добротність мають такі НВЧ резонаторні структури у яких: не має втрат на випромінювання, дуже малі втрати в діелектриках або вони відсутні (об'ємні резонатори з провідними стінками); малий поверхневий опір матеріалу провідникових стінок або вони відсутні (наприклад, діелектричні резонатори); значна величина геометричного фактора, який пропорційний відношенню об'єму резонаторної структури до площі її поверхні, а також залежить від моди коливань на якій відбувається резонанс (тобто, розподілу складових електромагнітних полів в резонаторі і струмів на його робочих поверхнях). Розрахунок резонансних частот, добротності і розмірів призматичних і циліндричних резонаторів, що збуджуються на різних видах коливань можна зробити за допомогою співвідношень, які наведені роботах [10-13].

Для резонансних частот:

призматичний (прямокутний) порожнистий резонатор (види коливань  $H_{mnp}$  і  $E_{mnp}$ ) –

$$F_0 = \frac{c}{2} \times \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{L}\right)^2} \quad (1.1)$$

де  $a, b, L$  – розміри резонатора;  $c$  – швидкість світла;

$m, n, p$  – число напівхвиль, що укладаються уздовж відповідних стінок резонатора ( $m = 0, 1, 2, 3 \dots$ ;  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ ;  $p = 0, 1, 2, 3 \dots$ );

циліндричний порожнистий резонатор (види коливань  $H_{nip}$ ) –

$$F_0 = \frac{c}{2 \times \pi} \times \sqrt{\left(\frac{\mu_{ni}}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi \times p}{L}\right)^2} \quad (1.2)$$

де  $\mu_{ni}$  - і-тий корінь першої похідної функції Бесселя n-го порядку ( $\mu_{01} = 3,832$ ;  $11 \mu_{11} = 1,841$ );

$$p = 1, 2, 3 \dots$$

Для добротностей:

призматичний порожнистий резонатор (види коливань  $H_{mnp}$ ) –

$$Q_{mnp} = \frac{c \times \pi \times \mu_0}{R_{\pi}} \times \frac{(a \times b \times L/4) \times (s^2 + t^2) \times (s^2 + t^2 + f^2)^{3/2}}{a \times L \times [s^2 \times f^2 + (s^2 + t^2)^2] + b \times L \times [t^2 \times f^2 + (s^2 + t^2)^2] + a \times b \times [s^2 \times t^2 + (s^2 + t^2)^2]}$$

де:  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  Гн/м;

$R_{\pi} = (\rho \times \pi \times F \times \mu_0)^{1/2}$  - поверхневий опір матеріалу стінок резонатора;

$\rho$  - – питомий опір матеріалу стінок резонатора;

$$s = m/a; t = n/b; f = p/L$$

призматичний порожнистий резонатор (види коливань  $E_{mnp}$ ) –

$$Q_{mnl} = \frac{c \times \pi \times \mu_0}{R_{\pi}} \frac{(a \times b \times L/4) \times (s^2 + t^2) \times \sqrt{s^2 + t^2 + f^2}}{s^2 \times b \times a \times L + t^2 \times a \times (b + L)} \quad (1.4)$$

циліндричний порожнистий резонатор (види коливань  $H_{nip}$ ) –

$$Q_{nip} = \frac{\pi \times F_0 \times \mu_0}{R_{\pi}} \frac{R \times \left[ \left( \frac{\mu_{ni}}{R} \right)^2 + \left( \frac{\pi \times p}{L} \right)^2 \right] \times \left[ 1 - \left( \frac{n}{\mu_{ni}} \right)^2 \right]}{\left( \frac{\mu_{ni}}{R} \right)^2 + \frac{2 \times R}{L} \left( \frac{\pi \times p}{L} \right)^2 + \frac{1}{\mu_{ni}} \left( \frac{\pi \times n \times p}{L} \right)^2 \left( 1 - \frac{2 \times R}{L} \right)} \quad (1.5)$$

У загальному випадку всі вирази для власних добротностей об'ємних резонаторів можна представити у вигляді:

$$Q_0 = G/R_{\pi} \quad (1.6)$$

Для об'ємних резонаторів однією з умов досягнення високих добротностей можна вважати максимальне відношення об'єму резонатора до площі його внутрішньої поверхні, оскільки енергія електромагнітних хвиль, що накопичується в резонаторі пропорційна його об'єму, а втрати визначаються в основному втратами в провідних стінках (для резонатора без

будь-якого заповнення) і відповідно залежать від їх площі. При цій умові найкращою формою для об'ємного резонатора буде сферична, для призматичного - кубічна, для циліндричного - така, при якій діаметр циліндра дорівнює його довжині ( $D = 2R = L$ ). При розрахунку передбачалося, що резонатори виготовлені з міді з питомим опором  $\rho = 0,0172 \times 10^{-6}$  Ом·м.

Таблиця 1.1 – розрахунки параметрів призматичних резонаторів

$F_0$ , ГГц	Вид коливань	Розміри, мм	$Q_0$
10	H101	$a = b = L = 21$	$\sim 1,61 \cdot 10^4$
	E111	$a = b = L = 26$	$\sim 9,85 \cdot 10^3$
36	H101	$a = b = L = 16,4$	$\sim 8,485 \cdot 10^3$
	E111	$a = b = L = 20,1$	$\sim 5,2 \cdot 10^3$

Таблиця 1.2 – розрахунки параметрів циліндричного резонатора

$F_0$ , ГГц	Вид коливань	Розміри, мм	$Q_0$
10	H011	$2R = L = 39,56$	$\sim 3,0 \cdot 10^4$
36	H011	$2R = L = 11,0$	$\sim 1,58 \cdot 10^4$

З таблиць видно, що максимальна добротність досягається, як в призматичних, так і в циліндричних резонаторах на видах коливань H-типу. Оскільки на практиці забезпечити виконання всіх вимог досягнення максимальної добротності одночасно неможливо, конструкцію резонансного елемента обирають виходячи з умов їх практичного застосування. Тому завжди буде існуватиме різноманіття резонансних НВЧ структур, для кожної з яких треба забезпечувати максимальну добротність при визначеному застосуванні. У той же час стабільність відповідного значення добротності також визначається рядом таких, наприклад, факторів, як фізичні властивості матеріалів, особливості конструкції і технології виготовлення, умови

експлуатації. Резонансна частота і її стабільність значно впливають на можливість використання НВЧ резонаторів. Значення резонансної частоти резонансних НВЧ елементів головним чином залежить від їх геометричних розмірів, а при використанні діелектричних матеріалів ще й величиною діелектричної проникності. Таким чином, стабільність резонансної частоти буде залежати від стабільності підтримання незмінними геометричних розмірів і значення діелектричної проникності. З цього, як і для вимог досягнення і підтримання високої добротності, виникають вимоги до вибору матеріалів, конструкції, технології виготовлення, умов експлуатації.

## 1.2 Порівняння резонансних структур НВЧ діапазону

Датчики, що використовують в якості первинного перетворювача, РВП, дозволяють зв'язати зміну резонансної частоти і добротності зі змінами, наприклад, нерівності поверхні, діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат об'єкту, який досліджується. В такій системі інформаційний сигнал формується на основі аналізу вимірених змінних значень резонансної частоти і добротності РВП. При цьому чим вище добротність РВП, тим точніше вимірюються відповідні зміни резонансної частоти і вище чутливість вимірювань внесених за рахунок взаємодії з об'єктом дослідження втрат. Максимальні значення власної добротності досягаються за допомогою використання в якості РВП об'ємних НВЧ резонаторів ( $\sim 10^3 \dots 10^4$ , в залежності від виду коливань і матеріалу резонаторної структури). У той же час, треба мати на увазі, що наведені значення величин добротності не враховують особливостей реальних конструкцій і технології виготовлення резонаторів, які призводять, зазвичай, до зростання втрат і, відповідно, до зниження добротності порівняно з ідеальним випадком завдяки неминучої присутності стикових з'єднань, шорсткості (неідеальної гладкості) робочих поверхонь, наявності

мікрodefektів. Практичні значення добротності можуть відрізнятися від оціночних в два-три рази навіть при високій якості виготовлення резонаторів.

При проведенні досліджень, наприклад, в скануючої мікрохвильової мікроскопії (СММ) найбільш ефективною конструкцією зонда, яка безпосередньо взаємодіє з досліджуваним об'єктом, є коаксіальна. В зв'язку з цим виникає необхідність аналізу та побудови такої системи резонаторної частини РВП, що може бути ефективно сполучена за структурою поля з коаксіальним мікрозондом.

Функціонально РВП для СММ можна представити у вигляді такого набору елементів: резонатор, елементи зв'язку резонатора з вимірювальною схемою, відрізок лінії, що має з одного боку елемент зв'язку з резонатором, а з іншого – зондову структуру для формування необхідного локального розподілу поля, що взаємодіє з виділеною ділянкою досліджуваного об'єкта. Відповідні характеристики РВП в цілому будуть визначатися параметрами і конструкцією складових його елементів, а також конструктивним та електродинамічним сполученням і узгодженням їх один з одним.

Робоча добротність РВП буде, головним чином, визначатися добротністю резонатора. У резонаторі, який покладений в основу вимірювального перетворювача в СММ, повинні бути елементи зв'язку для включення в вимірювальну схему, а також елемент з'єднання або елемент зв'язку з мікрозондовою структурою. Це призведе до зростання втрат в резонаторі і його добротність буде зменшуватися:

$$Q_n = \frac{Q_0}{1 + \sum_i \beta_i} \quad (1.7)$$

де  $Q_n$  – навантажена добротність резонатора;

$$\beta_i = \frac{\overline{P_{\text{вн}i}}}{P_p} \text{ – величина коефіцієнта зв'язку;}$$

$\overline{P_{\text{вн}i}}$  – середня потужність втрат у відповідному елементі зв'язку або потужність, яка випромінюється з резонатора через відповідний елемент зв'язку при вимкненому джерелі сигналу;

$\overline{P_p}$  – середня потужність втрат в резонаторі

Оскільки величина добротності РВП в СММ визначає чутливість вимірювань електрофізичних параметрів, необхідно забезпечувати її максимальне значення. Для цього треба зменшувати коефіцієнти зв'язку. В той же час, для забезпечення роботи вимірювальної схеми і ефективною взаємодією поля мікрозондової структури з об'єктом вимірювання величина зв'язку повинна бути достатньою для надійного функціонування всієї вимірювальної системи в цілому. До того ж, треба забезпечити таку конструкцію елементів зв'язку щоб вона була технологічною і досить просто сполучалася з пристроями НВЧ частини вимірювальної схеми. Тобто, вимоги до елементів зв'язку можна поділити на дві групи. Перший набір вимог буде визначатися умовами роботи зонда, інший – умовами роботи системи формування вимірювального сигналу.

Зондова структура являє собою відрізок коаксіальної лінії, з одного боку якого розташований виступаючий загострений внутрішній провідник лінії (зонд), а з іншого – елемент зв'язку у вигляді штиря або петлі. Іноді в зонд завдяки плавному переходу трансформується власна структура резонаторного перетворювача (наприклад, в коаксіальних резонаторів перетворювачах [3, 14-18]). Цей пристрій повинен забезпечувати ефективну взаємодію поля, випромінюваного з резонатора, з досліджуваним об'єктом і прийом відбитих і перевипромінених об'єктом хвиль. Мікрозонд, при цьому, повинний бути взаємним пристроєм зі значенням коефіцієнта зв'язку з резонатором порядку одиниці. Величина коефіцієнта зв'язку може регулюватися механічно ступенем занурення петлевого або штирьового елемента в об'єм резонатора. При таких значеннях коефіцієнта зв'язку навантажена добротність РВП буде зменшуватися майже в два рази порівняно з власним значенням (1) за рахунок тільки мікрозондового пристрою.

Основною умовою роботи системи формування вимірювального НВЧ сигналу є отримання на НВЧ детекторі значення сигналу, достатнього для подальшої обробки. Вплив РВП на величину сигналу на детекторі буде визначатися коефіцієнтом передачі. Зменшення коефіцієнтів зв'язку при прохідному включенні веде до зростання перехідного загасання РВП, а при відбивном включенні оптимальним буде режим роботи з  $\beta = 1$ , при якому амплітуда сигналу, відбитого від резонатора, стане мінімальною.

Збільшення перехідного загасання завдяки зменшенню коефіцієнтів зв'язку при прохідному включенні можна компенсувати його додатковим посиленням після детектора, однак це буде вести до зменшення відносини сигнал/шум і необхідності додаткового застосування схем модуляційної обробки сигналів. Тобто, вибір прийнятних для роботи системи формування вимірювальних НВЧ сигналів значень коефіцієнтів зв'язку веде до зменшення значення навантаженої добротності РВП. Загальне зменшення добротності РВП в порівнянні з власним значенням добротності резонатора буде приблизно в три рази.

Наступна група вимог до конструкції елементів зв'язку визначається технічними характеристиками вимірювальної системи та РВП. При використанні широкодіапазонної по частоті вимірювальної системи та РВП, які працюють на різних резонансних частотах, що розташовані в широкому діапазоні частот, переважним буде використання коаксіальних елементів зв'язку з вимірювальною системою, які мають діапазонні властивості. При роботі з РВП який складається з одного резонансу краще використовувати хвильові елементи зв'язку, які мають менші втрати, мають простіші конструкції і більш технологічні.

З викладеного вище витікає що аналіз і дослідження необхідно проводити для складених конструкцій РВП, що мають резонаторну частину, зондову структуру та елементи зв'язку з вимірювальної схемою.

Завдання аналізу:

- умови забезпечення максимальної добротності РВП;

– вплив конструктивних параметрів елементів зв'язку на функцію передачі і добротність РВП;

– впливу параметрів об'єкта, який досліджується, на характеристики складових РВП;

– зміни характеристик складових елементів РВП в залежності від конструкції і геометрії мікрозондової структури.

Результати аналізу дозволять визначитися з набором можливих варіантів побудови РВП і його частин. З умови використання коаксіальної структури мікрозонда для аналізу були обрані такі типи РВП:

– на основі прямокутних резонаторів на типах коливань  $H_{01n}$ ;

– на основі циліндричного резонатора на виді коливань  $H_{011}$ .

### 1.2.1 Призматичні прямокутні резонатори на видах коливань $H_{01n}$ .

У табл. 1.3 наведені теоретичні оцінки значень добротності для мідних призматичних прямокутних резонаторів, що збуджуються на типах коливань  $H_{01n}$ . Дані таблиці показують, що максимальні значення добротності мають рівносторонні резонатори, але резонатори на основі прямокутних хвилеводів також забезпечують досить високі значення. Перевагою таких резонаторів є простота виготовлення і сполучення з хвилевідними лініями передачі. Використання прямокутних хвилеводів і робота на основному типі хвилі дозволяють, забезпечити одномодовий режим в робочому діапазоні частот.

Таблиця 1.3 – Параметри об'ємних призматичних резонаторів

Ф <sub>0</sub> , ГГц	Тип коливань	Розміри, мм	Q <sub>0</sub>
10	$H_{101}$	$a = b = L = 21$	$\sim 1,61 \cdot 10^4$

	$H_{101}$	$a = 23, b = 10, L = 20$	$\sim 5,41 \cdot 10^3$
	$H_{103}$	$a = 23, b = 10, L = 60$	$\sim 6,027 \cdot 10^3$
36	$H_{101}$	$a = b = L = 16,4$	$\sim 8,485 \cdot 10^3$
	$H_{101}$	$a = 7,2, b = 3,4, L = 5$	$\sim 3,605 \cdot 10^3$
	$H_{105}$	$a = 7,2, b = 3,4, L = 25$	$\sim 4,138 \cdot 10^3$

Типовий розподіл електричного поля і зовнішній вигляд РВП на основі прямокутних хвилеводів показаний на рис. 1.1 [1, 20].

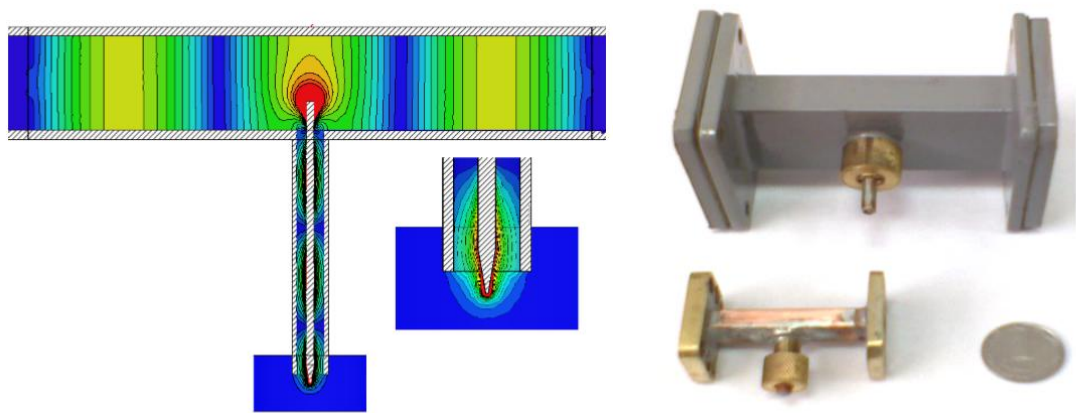


Рисунок 1.1 — Розподіл полів і зовнішній вигляд РВП на основі відрізків прямокутних хвилеводів

На експериментальних зразках РВП на основі регулярних хвилеводних структур (рис. 1.1) були отримані добротності  $\sim 1,7 \times 10^3$  на частоті 9,89 ГГц і типі коливань  $H_{103}$ ,  $\sim 2,7 \times 10^3$  на частоті 35,88 ГГц на типі коливань  $H_{107}$ . Отримані значення добротності природно нижче, ніж даються теоретичними оцінками і модельними експериментами.

Результати аналізу впливу електрофізичних параметрів досліджуваного об'єкта на  $f_p$  і  $Q$  РВП показані на рис. 1.2.

З графіків (рис. 1.2) слідує, що РВП на основі резонатора на відріжку прямокутного хвилеводу при оптимальному виконанні його елементів дозволяє ефективно фіксувати значення електрофізичних параметрів досліджуваних об'єктів в широкому діапазоні їх зміни. Незважаючи на

велику різноманітність резонансних елементів, які використовуються в РВП СММ, максимальне значення добротності може бути досягнуто в циліндричних резонаторах, збуджуваних на видах коливань  $H_{01n}$ . Припустиме значення добротності для таких резонаторів досягає значень  $10^4$  і більше. Навіть при приєднанні до такого резонатора елементів зв'язку і зондової структури величина добротності такого РВП повинна бути досить великою.

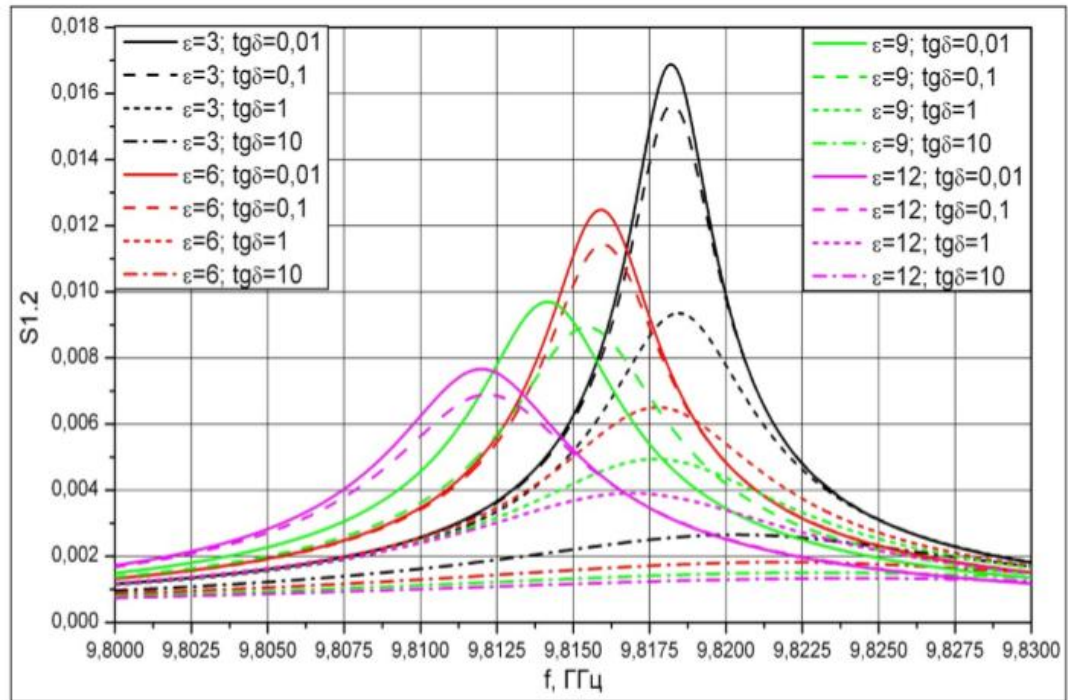


Рисунок 1.2 — Вплив електрофізичних параметрів об'єкта на  $f_p$  і  $Q$  РВП

### 1.2.2 Циліндричний резонатор на виді коливань $H_{011}$ .

Незважаючи на велику різноманітність резонансних елементів, що використовуються в РВП ЛМД, максимальне значення добротності може бути досягнуто в циліндричних резонаторах, збуджуваних на видах коливань  $H_{01n}$ . Оцінене значення добротності для таких резонаторів досягає величини  $10^4$  і більше. Навіть при приєднанні до такого резонатору елементів зв'язку і зондової структури величина добротності такого РВП повинна бути досить великою. Тому представляється доцільним проведення аналізу елементів і структури РВП на основі циліндричного резонатора на виді коливань  $H_{011}$ .

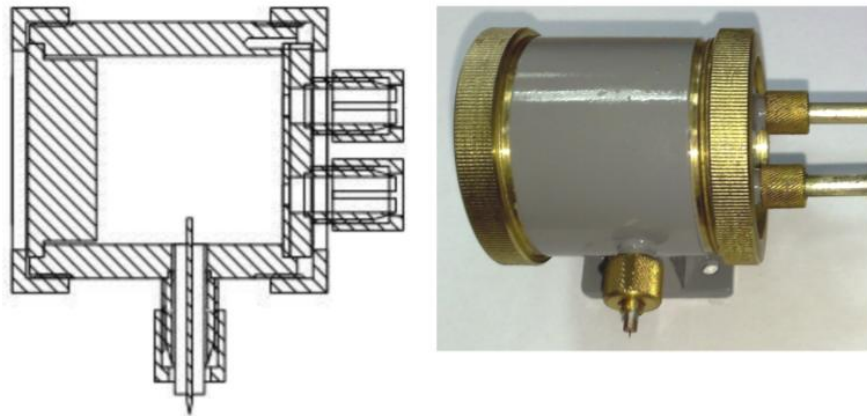


Рисунок 1.3 — РВП на основі циліндричного резонатора, збуджуваного на типу коливань  $H_{011}$

Результати розрахунків, проведених для циліндричних мідних резонаторів, порушених на вигляді коливань  $H_{011}$ , наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 - Значення  $f_p$  и  $Q$  (тип коливань  $H_{011}$ )

Заповнення	Розміри, мм	$f_p$ , ГГц	$Q_0$
Вакуум (повітря)	$d = h = 39,55$	10,10	$\sim 3 \cdot 10^4$
Фторопласт	$d = h = 26,5$	10,66	$\sim 4 \cdot 10^3$

Розрахунок для резонатора, заповненого діелектриком, проводився з метою з'ясування можливості зменшення габаритів РВП при збереженні високої добротності. Отримані результати показують, що навіть в разі застосування в якості заповнювача фторопласта добротність істотно зменшується за рахунок втрат в діелектрику. Добротність такого резонатора стає порівняна з добротністю резонаторів на основі відрізків хвилеводів, які в конструктивному і технологічному плані значно простіше. При використанні діелектрика з меншими втратами добротність вдасться збільшити, але такі діелектрики менш технологічні.

Робоча добротність резонатора за рахунок елементів зв'язку знижується (1) і вимагає оптимізованого підбору величини зв'язку з урахуванням вимог

вимірювальної системи і збереження в той же час досить високого значення добротності для забезпечення високої чутливості РВП в цілому

На підставі аналізу результатів проведених чисельно-аналітичних і експериментальних досліджень зразків РВП можна зробити наступні висновки:

- найбільш практичними конструкціями РВП з точки зору їх технологічності і досить високої добротності (до  $(1 \dots 3) \times 10^3$ ) представляються конструкції вимірювальних перетворювачів на основі призматичних резонаторів (відрізків прямокутних хвилеводів), порушуваних на типах коливань  $H_{10n}$ ;

- при необхідності створення РВП з вихідними добротностями порядку  $10^4$  представляється доцільним використання в якості основи РВП циліндричних резонаторів, збуджуваних на типах коливань  $H_{01n}$ , незважаючи на більш складну їх конструкцію в порівнянні з РВП на призматичних резонаторах;

## 2 ПРИКЛАДИ НЕРЕГУЛЯРНИХ СТРУКТУР НВЧ ДІАПАЗОНУ

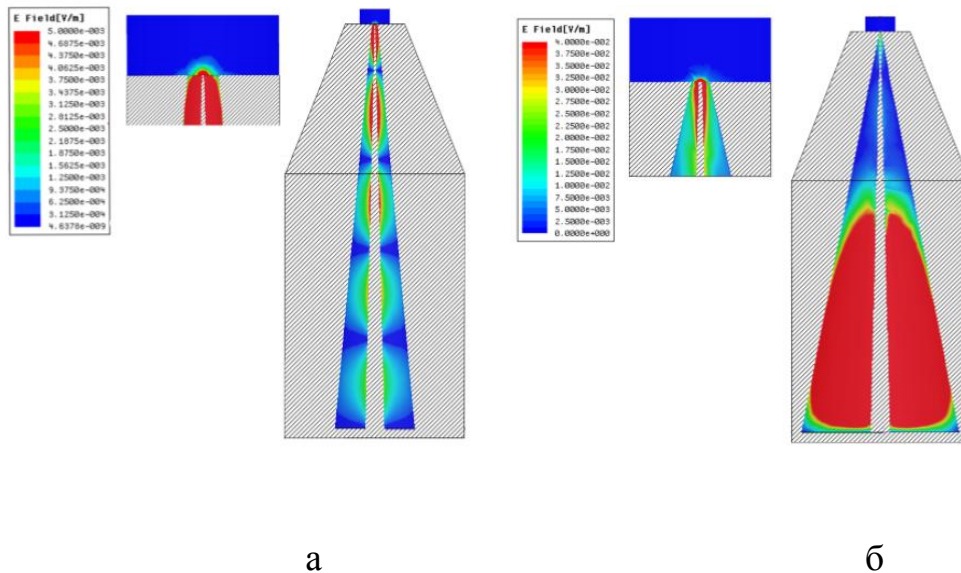
Основним пристроєм системи вимірювань в скануючій зондовій мікроскопії (СЗМ), що визначає чутливість і роздільну здатність, є вимірювальний перетворювач чи мікрозонд, який безпосередньо взаємодіє з досліджуваним об'єктом [14]. У ближньопольовій скануючій мікрохвильовій мікроскопії (СММ) таким пристроєм є відрізок лінії передачі, що закінчується мініатюрним зондом або резонатора вимірювальний перетворювач (РВП), з'єднаний або поєднаний з мікрозондовою структурою. При цьому переважним є використання РВП, що дозволяє отримувати більш високу чутливість вимірювань [15, 16]. Оскільки в СММ найбільш ефективною конструкцією зонда є коаксіальна виникає необхідність побудови такої системи резонатора частини РВП, яка сполучається за структурою поля з коаксіальним мікрозондом.

## 2.1 Нерегулярні коаксіальні структури

У коаксіальній лінії при значних відношеннях діаметрів внутрішнього і зовнішнього провідників можливе виникнення вищих типів хвиль, у тому числі і хвилі типу  $H_{01}$ . Вищі типи хвиль в будь яких лініях, зазвичай, вважаються небажаним чинником і від них намагаються позбутися. Однак, збудження хвилі  $H_{01}$ -типу у коаксіальній структурі можна використати для створення високодобротного коаксіального резонатора. Наявність у такого резонатора центрального провідника дозволяє досить просто здійснити його сполучення з коаксіальною мікрозондовою структурою [22]. При цьому, однак, необхідно здійснити заходи щодо зняття виродження видів коливань  $H_{01n}$  і  $E_{11n}$ , а також забезпечити конструктивну жорсткість тонкого центрального провідника, що трансформується у зондову структуру.

В конструкції коаксіального конусного чвертьхвильового резонатора можна також реалізувати коливання ТЕМ і плавний перехід від резонатора до зонду (рис.2.1). Однак така конструкція буде мати низьку добротність

чвертьхвильових резонансів, які навіть для теоретичних розрахунків не більше кількох тисяч, а на практиці завдяки зв'язкам і втратам у з'єднаннях можуть бути і менше  $10^3$ .



а – чвертьхвильовий резонанс (ТЕМ,  $L = 9\lambda / 4$ ,  $f_p = 8,32$  ГГц,  $Q = 1,55 \times 10^3$ ); б - коливання  $H_{111}$  ( $f_p = 7,85$  ГГц,  $Q = 1,15 \times 10^4$ )

Рисунок 2.1 — Структури полів при резонансах в конусних коаксіальних резонаторах

Як показує модельний експеримент, в кінчному коаксіальному резонаторі також можливе порушення коливань відмінних від ТЕМ, при збільшенні відносини внутрішнього діаметра зовнішнього екранного провідника до діаметру внутрішнього (рис.2.1). Добротність резонатора виходить при цьому в кілька разів більшою, ніж для коливань хвиль ТЕМ типу.

Варіацією кута розкриття конуса, його довжини і відносини відповідних діаметрів провідників можна забезпечити необхідне значення резонансної частоти.[21-23]



R1, мм	16	15,5	16	16,5	16	16	16	18	18
$f_p$ , Гц	7,8603	8,0249	7,8136	7,8296	8,113	8,261	8,42	7,8510	8,0078
Q	11223	11063	10693	11184	11109	11053	10935	11460	11385

З даних Таблиці 2.1 можна зробити висновок, що на подібних видах коливань можна забезпечити досить високі значення добротності. При подальшій зміні розмірів нерегулярної коаксильної структури з'ясувалося, що в ній можуть порушуватися і інші високодобротні види коливань, наприклад, виду квазі- $H_{112}$  (див. Рис. 2.3 і Таблицю 2.2).

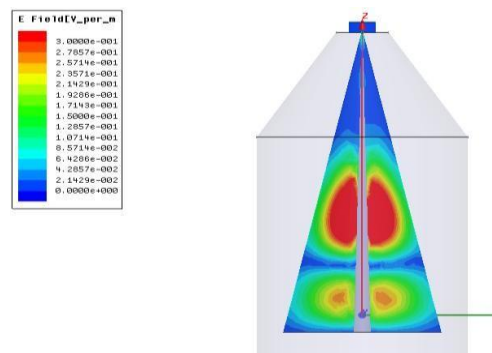


Рисунок 2.3 — Розподіл поля виду коливань квазі- $H_{112}$  в нерегулярній коаксильній структурі

Таблиця 2.2. Значення  $f_p$  і Q для виду коливань квазі- $H_{112}$  в нерегулярній коаксильній структурі

L, мм	86	86	86	86	88	88	90	90	96
R1, мм	18	19	20	21	19	21	19	21	21
$f_p$ , ГГц	9,1708	8,9087	8,638	8,5532	8,98	8,4713	8,896	8,3891	8,1895

Q	12059	12613	12882	13381	12678	13303	12578	13246	13548
---	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

L, мм	96	101	106	106	111	111
R <sub>1</sub> , мм	22	22	17	21	18	20
f <sub>p</sub> , ГГц	7,9626	7,813	8,9682	7,884	8,529	7,9903
Q	13648	13911	12046	13583	12483	13303

З Таблиці 2.2 видно, що в цьому випадку можуть бути отримані великі значення добротності і великі значення резонансних частот, ніж для коливань квазі-Н<sub>111</sub>.

Таким чином, нерегулярні коаксіальні структури, порушувані на вищих видах коливань, можуть бути з успіхом застосовані для створення високодобротних РВП з досить далеко рознесеними резонансами. Однак їх реалізація пов'язана з подоланням ряду труднощів, а саме: аналітичний розрахунок таких систем утруднений, отже, визначення конкретних геометричних розмірів конструкцій під задане значення частоти буде здійснюватися перебором модельних систем і подальшої експериментальної підгонкою; технологія отримання якісних конічних поверхонь і співвісного високоточного сполучення двох конусів (внутрішнього провідника і зовнішнього) складна і вимагає розробки спеціальних технологічних оснащень. Тому використання такого типу РВП обґрунтовано тільки в тому випадку, якщо неможливо рішення задачі іншими способами або є налагоджена технологія виготовлення таких пристроїв.

У той же час результати, отримані при моделюванні РВП на основі нерегулярних коаксіальних структур, доводять можливість побудови високодобротних конічних коаксіальних перетворювачів, порушуваних на вищих видах коливань, і дозволяють провести розробку високочутливих резонаторних перетворювачів розглянутого типу для скануючого

мікрохвильового мікроскопа, що має привести до підвищення чутливості проведених з його допомогою досліджень.

Порівняння і аналіз структури електромагнітних полів в поперечному перетині зони збудження кінчного РВП і одного з можливих вищих типів хвиль в коаксіальній лінії показують, що високодобротний резонансний відгук в кінчному коаксіальному РВП можна ідентифікувати з нижчим типом коливань  $H_{111}$  в циліндричному резонаторі. Зміною розмірів і геометрії можна домогтися збудження і інших типів високодобротних коливань. В цьому випадку можуть бути отримані значення добротності і резонансних частот вище, ніж для типу коливань квазі- $H_{111}$ . Забезпечення роботи розглянутих резонансних нерегулярних структур на обраному типі коливань досить складна електродинамічна і технічна задача, оскільки така структура має багатомодовість і може збуджуватись на різних типах коливань в робочому діапазоні частот. При цьому можуть збуджуватися як резонанси  $n$ -чвертьхвильового коаксіального резонатора, так і резонанси на вищих типах коливань.

При виборі в якості пристроїв зв'язку коаксіальних ліній, що підключаються до досліджуваної структури через торцеву стінку, і орієнтації петель зв'язку з урахуванням конфігурації полів необхідного виду коливань, АЧХ такого РВП буде виглядати так, як показано на рис.2.4. Видно, що в робочому діапазоні залишилося тільки три високодобротних резонанса.

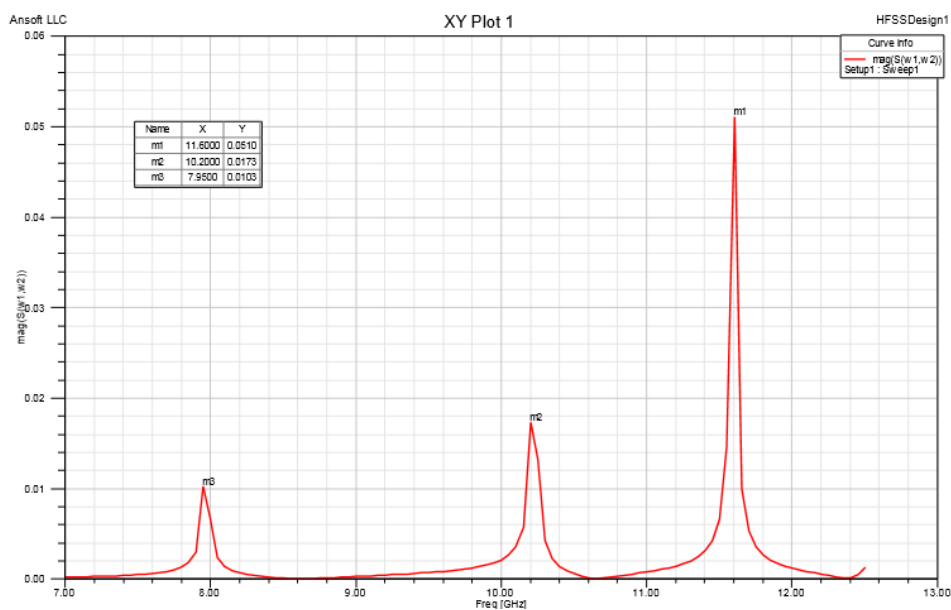


Рисунок 2.4 — АЧХ РВП на основі нерегулярної коаксіальної структури

Експериментальна перевірка результатів чисельного моделювання проводилася за допомогою макета РВП, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 2.5.

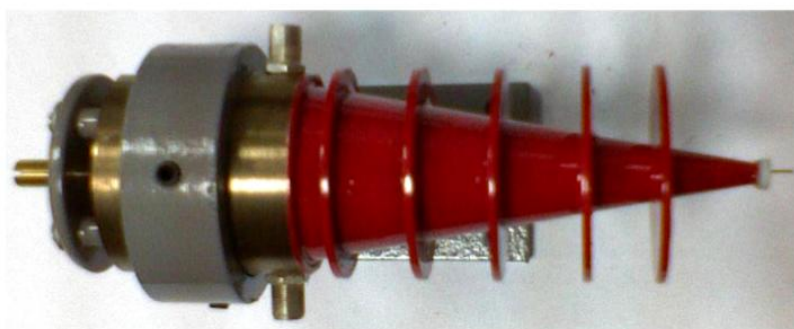


Рисунок 2.5 — Зовнішній вигляд експериментального макета РВП на основі нерегулярної коаксіальної структури

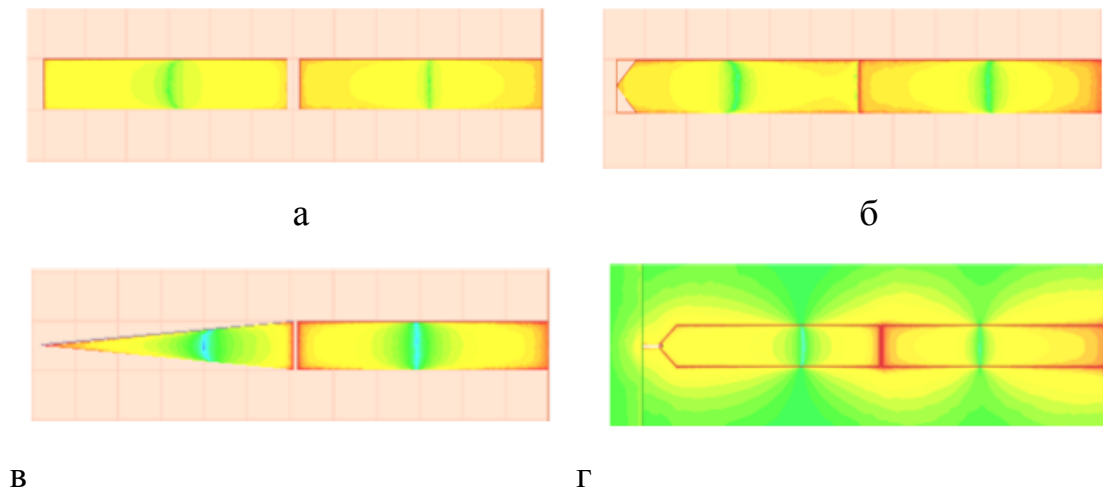
Для РВП з центральним коаксіальним провідником був зафіксований резонанс на частоті 9,98 ГГц з добротністю  $\sim 1,3 \times 10^3$ , для РВП без коаксіального провідника був отриманий резонанс на частоті 9,5 ГГц з добротністю  $\sim 4 \times 10^3$ . Оскільки зміна параметрів зовнішнього середовища в

першому випадку призводить до зміни частоти і добротності, а в другому - немає, можна стверджувати, що в першому випадку ми маємо резонанс хвилі TEM чвертьхвильового коаксіального резонатора, а в другому - резонанс хвилі вищого типу. Зв'язок високодобротного типу резонансу з зондовою частиною забезпечується шляхом розміщення аксіального провідника в позамежній ділянці конуса. Таким чином, нерегулярні коаксіальні структури, порушені на вищих типах коливань, можуть бути з успіхом застосовані для створення високодобротних РВП з досить далеко рознесеними резонансами.

Однак їх реалізація пов'язана з подоланням ряду труднощів, а саме: аналітичний розрахунок таких систем утруднений, отже, визначення конкретних геометричних розмірів конструкцій під задане значення частоти буде здійснюватися перебором модельних систем і подальшої експериментальної підгонкою; технологія отримання якісних конічних поверхонь і співвісного високоточного сполучення двох конусів (внутрішнього провідника і зовнішнього) складна і вимагає розробки спеціальних технологічних оснащень. Тому використання такого типу РВП обґрунтовано тільки в тому випадку, якщо неможливо рішення задачі іншими способами або є налагоджена технологія виготовлення таких пристроїв.

## 2.2 Резонансні структури на основі мікροстрічкових структур

Ще одним варіантом реалізації РВП для локальної діагностики є використання планарних (смужкових і мікросмужкових) структур [2, 7]. В цьому випадку резонансні властивості забезпечуються або півхвильовими, або кільцевими резонансними елементами, а локалізація поля - загостренням одного з кінців півхвильового смужкового резонатора або підключенням окремих відрізків смужкових ліній з зондовим загостренням (рис. 2.6).



а - півхвильовий відрізок лінії з загостренням, б - півхвильовий відрізок лінії у вигляді нерегулярної структури, в - півхвильовий відрізок лінії з загостренням і наконечником, г - кільцевий резонатор з приєднаним відрізком лінії із загостренням.

Рисунок 2.6 — Топології і розподіл електричних полів в РВП на основі смугових структур

Модельний експеримент показав, що РВП на напівхвильових відрізках ліній зберігають свої резонансні властивості, незважаючи на введення в їх топологію загострених елементів. При цьому на загостренні спостерігається підвищена напруженість поля, особливо в разі нерегулярної структури (рис. 2.6, в). У той же час добротність таких РВП невисока (всього кілька десятків). Для РВП на основі кільцевого резонатора (рис. 2.6, г) виявлено можливість отримання більш високих значень добротності (рис. 2.7). З наведених графіків амплітудно-частотних характеристик коефіцієнтів відбиття при різних значеннях величин  $\text{tg}\delta$  зразків з діелектричної проникністю  $\epsilon \sim 7$ , які розміщені в області вістря зонда, видно, що в діапазоні частот 7 ... 11 ГГц спостерігається три резонансних відгуку розглянутого РВП. При цьому для всіх резонансних відгуків спостерігається сильна залежність їх форми від  $\text{tg}\delta$  зразків поблизу вістря, що свідчить про можливість використання перетворювачів такого типу для діагностики

різних матеріалів і об'єктів. Найбільш висока чутливість до зміни величини втрат в зразку проявляється на частотах 7,64 ГГц і 10,11 ГГц.

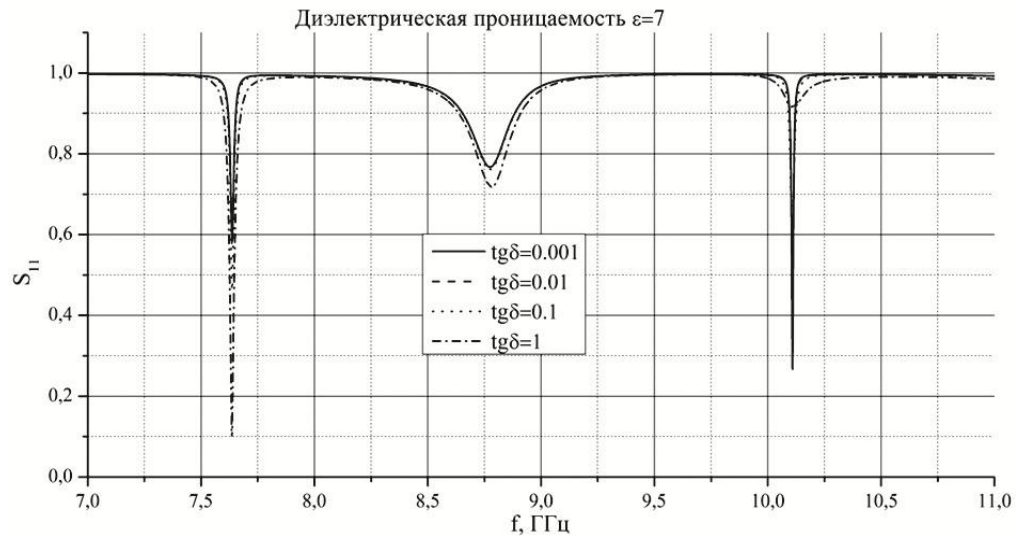


Рисунок 2.7 — АЧХ коефіцієнта відбиття РВП на основі кільцевого резонатора стоячій хвилі в смузі частот 7 ... 11 ГГц.

Варіювання величини діелектричної проникності зразка в межах 1 ... 12 показує зростання чутливості розглянутого РВП до величини втрат в зразку зі збільшенням  $\epsilon$ . При успішній реалізації РВП на основі смужкових і мікросмужкових структур, що створюються за допомогою планарних технологій, які досить добре відпрацьовані при виготовленні мікро- і нанорозмірних елементів сучасної мікроелектроніки, відкриваються можливості побудови інтегральних механізмів формування інформаційних сигналів СММ, що включають в себе як первинний перетворювач (сенсор), так і систему формування та попередньої обробки сигналів, а також розробки такої конструкції мікрозонда, яку можна використовувати одночасно і для атомносилової і тунельної мікроскопії.

Зміна топології напівхвильових резонансних відрізків мікросмужкових ліній не приводить до істотної зміни їх резонансних властивостей;

РВП на основі кільцевих смугових резонаторів стоячих хвиль дозволяють підвищити добротність більш ніж на порядок в порівнянні з півхвильовими резонаторами;

АЧХ РВП на основі смугових резонансних структур мають чутливістю до змін параметрів об'єктів, розташованих поблизу зондів, що може бути використано для діагностик.

### 3 НАПРЯМКИ ЗАСТОСУВАННЯ СКЛАДНИХ НЕРЕГУЛЯРНИХ СТРУКТУР НВЧ ДІАПАЗОНУ

#### 3.1 Мікрохвильова скануюча зондова мікроскопія

Необхідність вивчення електрофізичних параметрів різних об'єктів на мікро- та нанорозмірному рівні привело в останні роки розвитку таких методів діагностики як зондова мікроскопія, одним з яких є метод скануючої мікрохвильової мікроскопії (СММ) [14-17]. Основою СММ є ближньопольова взаємодія локальних мікрохвильових електромагнітних полів мікрозондових структур, з локалізованими (ступінь локалізації залежить від розмірів і конструкції мікрозондів) поверхневими і приповерхневими шарами матеріалів, що досліджуються.

Функціональна схема (СММ) поєднує як мінімум три системи: систему позиціонування по осях  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ ; систему формування сигналів вимірювальної інформації і систему обробки результатів вимірювань. Всі ці системи функціонують спільно і синхронно як в режимі реального часу, так і з запам'ятовуванням і подальшою обробкою накопичених результатів вимірювань.

Незважаючи на важливість цих систем і їх елементів, тим не менш, можна виділити ті з них, які в максимальній мірі впливають на параметри СММ. В першу чергу, це мікрохвильовий вимірювальний перетворювач (включаючи РВП), конструкція і схемне рішення якого визначає чутливість і роздільну здатність вимірювань.

Не менш важливою частиною СММ також є система формування і обробки інформаційних сигналів, яка призначена для виділення і вимірювання змін параметрів ВП (або РВП).

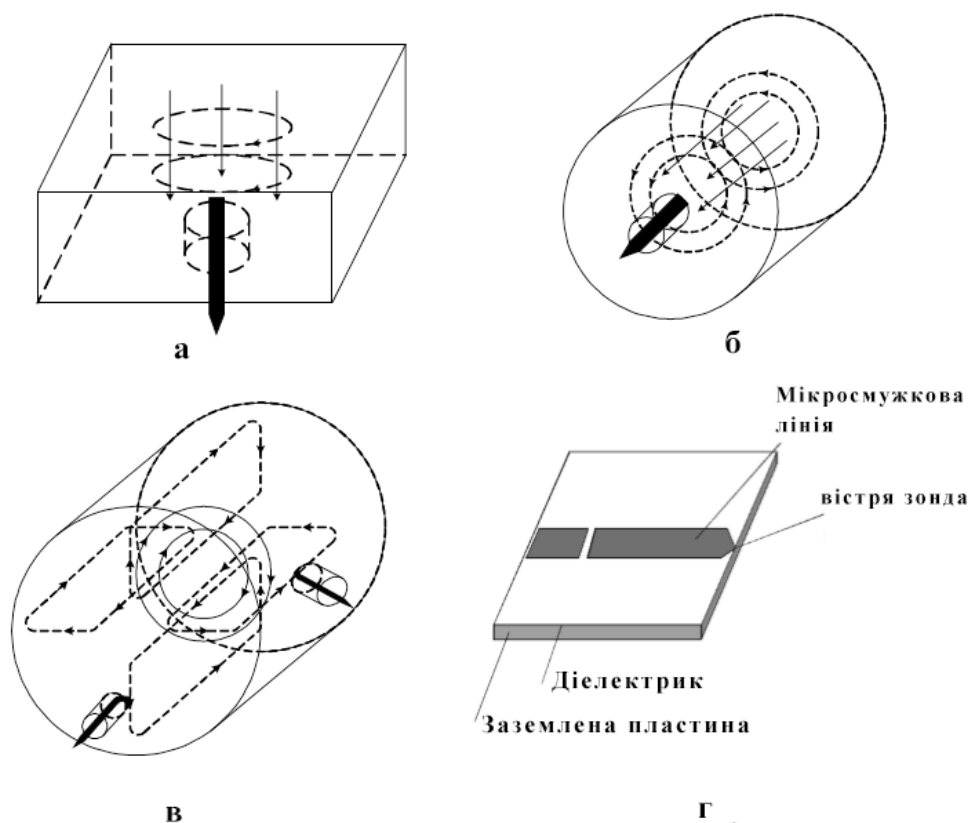
РВП, що застосовуються в СММ, використовують мікрозондові структури, геометричні розміри і форма яких, в свою чергу, багато в чому визначають функціональні і метрологічні можливості СММ в цілому.

Така мікрозондова структура є малорозмірним хвилевідним або коаксіальним випромінювачем (мікроантенной), яка безпосередньо входить в резонатор або з'єднується з ним за допомогою елемента зв'язку. При створенні і конструюванні такого РВП повинен бути виконаний ряд вимог.

При дослідженні електрофізичних характеристик матеріалів, середовищ і об'єктів для зондування використовується електрична складова електромагнітного поля створюваного зондом в області досліджуваного зразка. Зонд являє собою структуру, яка формує конфігурацію електричного поля. Для формування необхідної конфігурації поля необхідно враховувати характер взаємодії зондової структури з відповідними складовими поля резонатора.

В той же час конструкція і технологія виготовлення резонатора повинні забезпечувати його максимальну власну добротність при збудженні на виді коливань, необхідному для сполучення з мікрозондовою структурою. Аналогічні вимоги треба виконувати при використанні зондів, що формують необхідну конфігурацію магнітної складової електромагнітного поля за необхідності дослідження магнітних характеристик.

Типові конструкції резонаторних перетворювачів з мікрозондовими структурами наведені на рис. 3.1.



а – призматичний (прямокутний) резонатор на виді коливань  $H_{101}$ ; б – циліндричний резонатор на Е-виді коливань; в – циліндричний резонатор на виді коливань  $H_{011}$ ; г – мікροстрічковий резонатор.

Рисунок 3.1 — Конструкції резонаторних перетворювачів з мікрозондовими структурами

Для забезпечення ближньопольової мікрохвильової мікроскопії достатньо провести одноразове або вибіркове за часом вимірювання значень резонансної частоти і добротності, а потім проводити вимірювання змін цих значень, або деяких визначених функцій перетворення при дослідженні локальної мікроділянки поверхні. Це дає можливість значно зменшити об'єм інформації, що обробляється. Для цього можна проводити вимірювання величин (або функцій), зміна яких була б пропорційна зміні електрофізичних характеристик поверхні при переміщенні уздовж неї. Таке рішення до того ж дає можливість здійснити автоматизацію вимірювань, що проводяться. Це можуть бути зміни резонансної частоти і добротності від початкових значень

або інші параметри, що змінюються пропорційно. Зрозуміло що метрологічні можливості СММ і в цьому випадку будуть багато в чому залежати від якості відповідних вимірювальних систем з РВП включно.

### 3.2 Безелектродна лампа на основі резонансної нерегулярної НВЧ структури

В останні роки ведуться інтенсивні дослідження, пов'язані з розробкою і вивченням процесів функціонування сірчаних НВЧ-ламп [8, 9]. Сірчани НВЧ-лампи мають ряд переваг в порівнянні з іншими джерелами світла: відсутність електродів, висока ефективність  $\sim 25\%$ , високий колірний індекс  $\sim (70 \dots 80)\%$ , спектральні характеристики, близькі до сонячного світла [8]. Принцип їх дії полягає в стимуляції НВЧ електромагнітним полем режиму іонізації неону і ударному збудженні молекулярної і атомарної сірки іонами неону з подальшим випромінюванням фотонів. Мінімальна напруженість поля, необхідного для виникнення об'ємного розряду в буферному газі, складає величину  $\sim (20 \dots 30)$  кВ / м [8]. Істотним недоліком НВЧ-ламп є необхідність в потужних джерелах НВЧ випромінювання (від сотень ватів до кіловата і більше) і, як наслідок, їх відносна недовговічність, обумовлена виробленням ресурсу НВЧ джерела.

У роботі [21] наведені результати досліджень високодобротних типів коливань в нерегулярних гібридних структурах. Показано, що добротності резонансів, збуджуваних в таких структурах, можуть досягати величин  $10^3 - 10^4$ . Особливістю розглянутих резонансних структур є те, що вони мають осьову симетрію, а їх форма може одночасно відповідати конструкціям світловідбивних і світлонаправляючих дзеркальних елементів джерел світлового випромінювання.

Конструкція резонатора наведена на рис. 3.2, а. Резонатор має кінчну структуру, у вузькій частині якої розташований збуджувальний коаксіальний елемент. Амплітудно-частотна характеристика приведена на рис. 3.2, б.

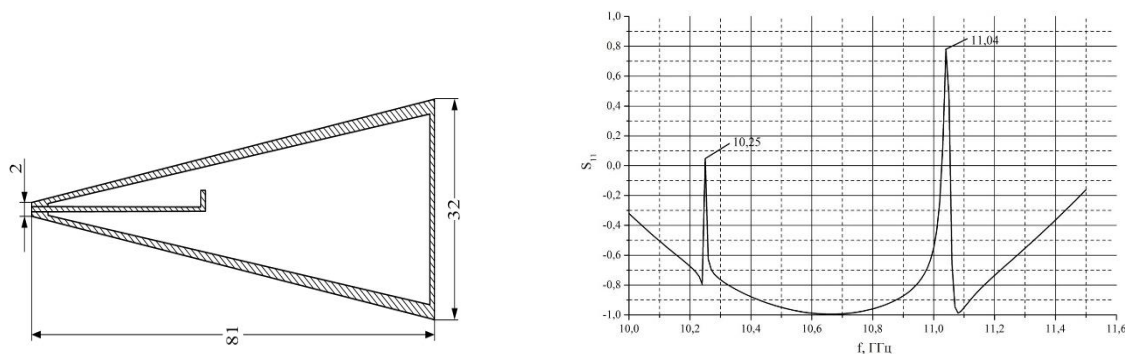


Рисунок 3.2 — Конструкція (а) і амплітудно-частотна характеристика (б) нерегулярної резонаторної структури

Вже згадана структура має два яскраво виражених високодобротних резонанса на частотах 10,25 і 11,04 ГГц. Подальший аналіз показує можливість досягнення високих значень напруженості полів в областях формування відповідних резонансів. На рис. 3.3 і 3.4 наведені структури полів в резонаторі при резонансах на частотах 10,25 і 11,04 ГГц, а також значення напруженості електричного поля, що досягаються при різних величинах НВЧ потужності, що вводиться в резонатор.

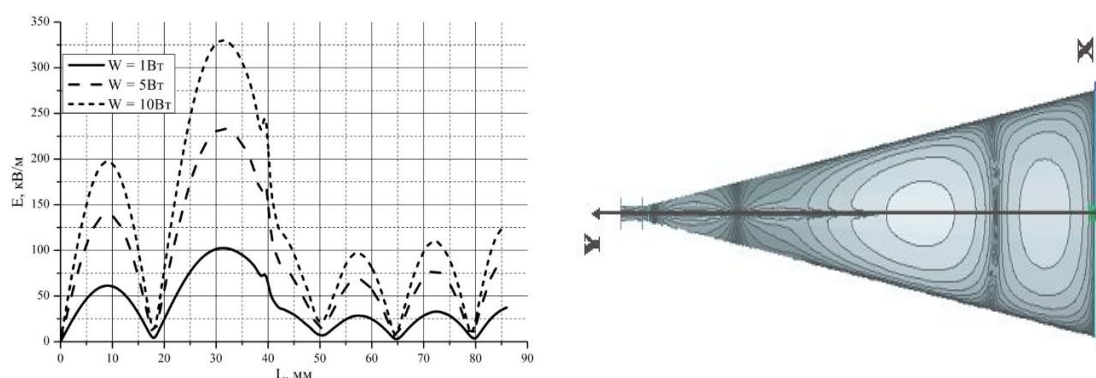


Рисунок 3.3 — Структура поля в резонаторі на частоті 10,25 ГГц та значення напруженості електричного поля на осі X по довжині L

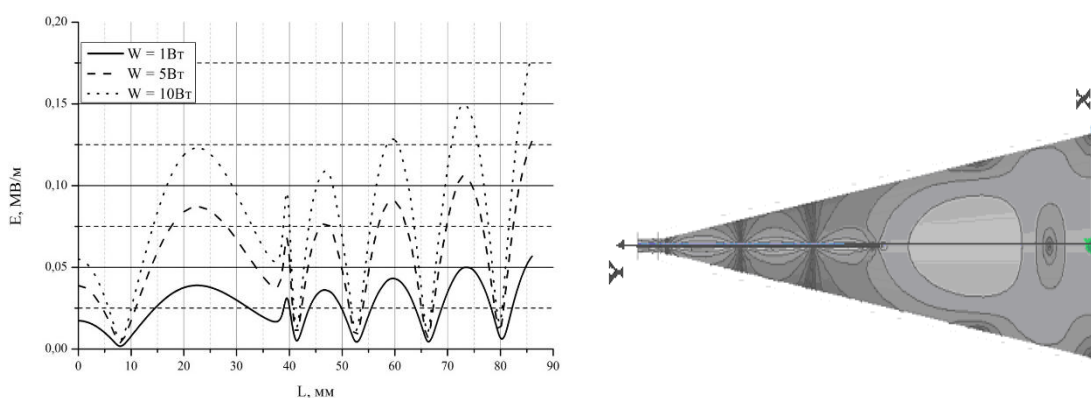


Рисунок 3.4 — Структура поля в резонаторі на частоті 11,04 ГГц та значення напруженості електричного поля на осі X по довжині L

Видно, що вже при потужності накачування декілька ват досягаються значення напруженості електричних полів, достатні для виникнення розряду в середовищі яке містить сіру.

Рівні НВЧ потужності в одиниці або навіть в десятки ватт досягаються за допомогою напівпровідникових генераторів, що відкриває можливості зниження енергоспоживання, підвищення надійності і довговічності сірчаних НВЧ ламп, а також створення малогабаритних джерел світла такого типу.

Аналіз структури полів, що спостерігаються в нерегулярних резонаторних структурах при резонансах, показує, що в області розміщення коаксіального провідника структура поля подібна структурам стоячих хвиль в коаксіальних лініях. Відповідно ця частина резонатора може бути трансформована в відповідну коаксіальну лінію з невеликим ступенем нерегулярності для узгодження з високодобротним резонаторним обсягом.

Геометрія області високодобротного резонансу пропонованих резонансних структур може бути адаптована під вимоги формування необхідного спрямованого світлового випромінювання.

Чисельні дослідження модельних резонаторних структур, геометрія яких ближче до геометрії направляючих світлових відбивачів, показує, що

можливість порушення високочастотних типів коливань в цьому випадку також зберігається (див. Рис. 3.5 – 3.7).

Для структури з геометрією усіченого конуса був отриманий резонанс на частоті 10,26 ГГц з добротністю порядку  $1,41 \cdot 10^4$ , який мав два максимуму напруженості електричного поля (рис. 3.5).

Для подібної ж структури, але з заокругленням усіченої частини, також порушується резонанс з двома максимумами напруженості на частоті 10,33 ГГц з добротністю  $\sim 1,55 \cdot 10^4$  (рис. 3.6).

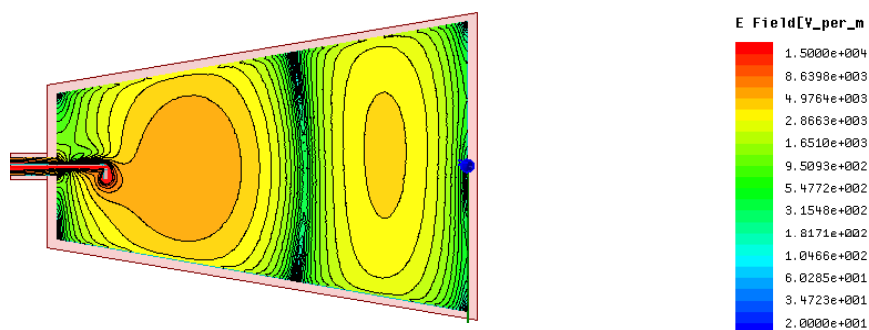


Рисунок 3.5 — Резонаторна структура з геометрією усіченого конуса, розподіл поля та величина напруженості поля

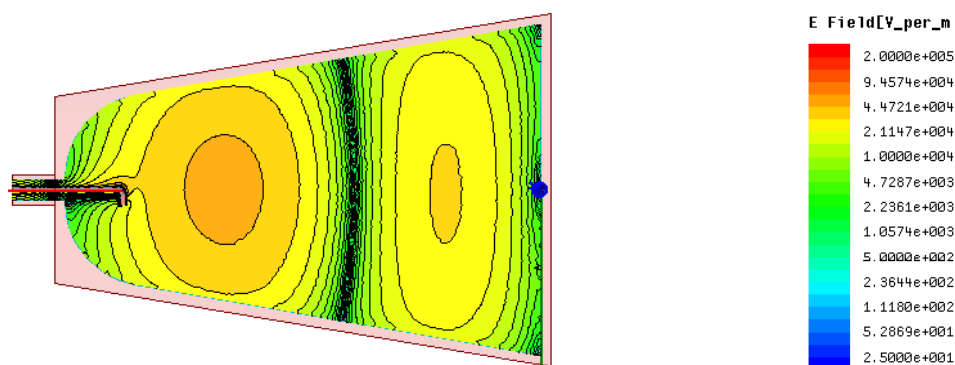


Рисунок 3.6 — Резонаторна структура з заокругленням усіченої частини, розподіл поля та величина напруженості поля

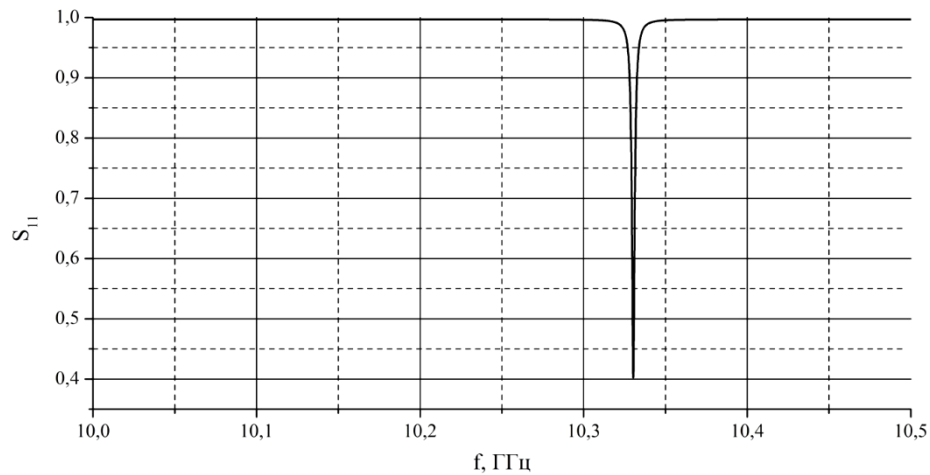


Рисунок 3.7 — Амплітудно-частотна характеристика коефіцієнта відбиття

Оскільки наявність другого максимуму напруженості поля в розглянутій структурі не є необхідним, був проведений аналіз укороченого резонатора структури з розмірами: радіус округленої частини  $R_c \approx 9,5$  мм, зовнішній діаметр  $D_n \approx 25,2$  мм, довжина  $L \approx 25$  мм (рис. 3.8).

При цьому був отриманий резонанс на частоті 9,664 ГГц з добротністю  $\sim 1,19 \cdot 10^4$ .

Розглянуті структури призначені для одночасного вирішення задач іонізації газу і формування світлового пучка, проведено аналіз характеристик резонаторної структури з імітатором колби з іонізованим газом у вигляді провідника з високою провідністю, розміщеного в області підвищеної напруженості електричного поля (рис.3.9). У цьому випадку також спостерігається резонанс на частоті 9,55 ГГц з добротністю  $\sim 0,72 \cdot 10^4$ .

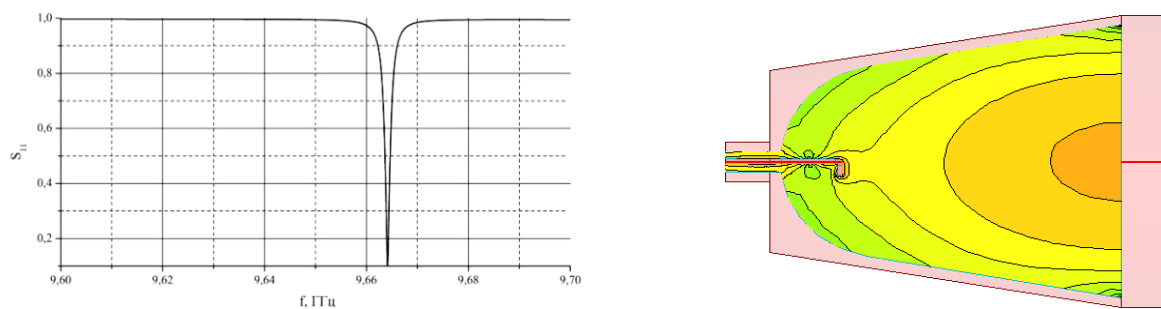


Рисунок 3.8 — Укорочена резонаторна структура, амплітудно-частотна характеристика коефіцієнта відбиття та розподіл поля

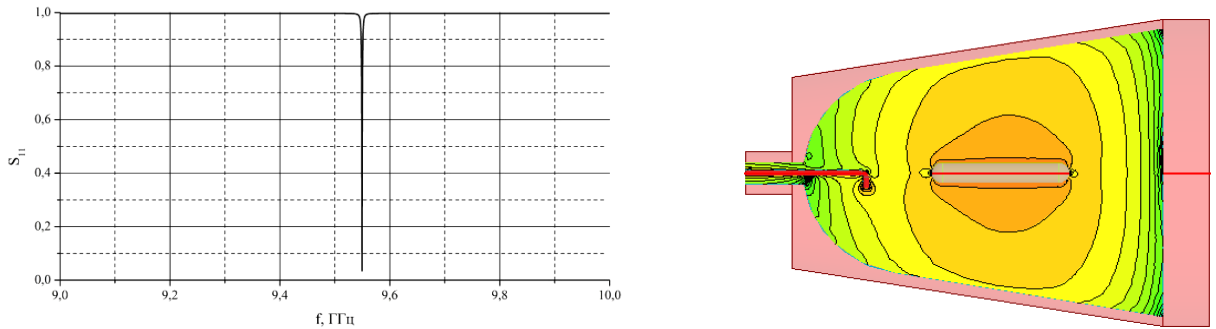


Рисунок 3.9 — Укорочена резонаторна структура з імітатором, амплітудно-частотна характеристика коефіцієнта відбиття та розподіл поля

На основі аналізу процесів збудження нерегулярних резонансних структур на вищих типах коливань виявлена можливість досягнення внутрішньо-резонаторних напружень електричних полів, достатніх для появи розряду в сіровмісній плазмі при рівні потужності НВЧ сигналів накачки менше 10 Вт. Використання нерегулярних резонансних структур дозволяє в єдиній конструкції відповідати властивостям, забезпечуючи високодобротні НВЧ-резонанси та формування направленого світлового випромінення, а також істотно знизити вимоги до джерела НВЧ

### 3.3 Мікрохвильовий зонд на основі компенсованого нерегулярного позамежного хвилеводу

Нерегулярний хвилевід скорочено можна представити в виді, показаному на рис. 3.10. Амплітуда хвилі в позамежному хвилеводі ( $\lambda > \lambda_{кр}$ ) зменшується за експоненціальним законам:

$$E(z) = E_0 \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - \lambda_{кр}^2 \div \lambda^2} \times z\right) \quad (3.1)$$

де  $E_0$  - амплітуда хвилі на вході позамежного хвилеводу

$\lambda_{кр}$  - критична довжина хвилі позамежного хвилеводу на робочому типі хвилі

$\lambda$  - робоча довжина хвилі

$E(z)$  - амплітуда хвилі при деякому значенні координати  $z$ .

Величини загасання в такому позамежному прямокутному хвилеводі регулюється за допомогою діелектрика, що вводиться в позамежну ділянку. При цьому величина діелектричної проникності  $\varepsilon$  визначається з умови:

$$\varepsilon = (\lambda/2a)^2 \quad (3.2)$$

Перехід від стандартного хвилеводу до позамежного здійснюється плавно, щоб уникнути небажаних додаткових перевідбиттів в лініях зв'язку. Хвилевід ділиться на два відрізки, один з яких розташований до площини відсічення і не вносить помітного загасання в амплітуду хвилі, що розповсюджується, і другий, який розташований за площиною відсічення і є нерегулярним позамежним хвилеводом. Координата площині відсічення визначається з умови рівності  $\lambda_{кр}$  робочої довжині хвилі  $\lambda$  для даного перетину хвилеводу. З рис. 3.10 можна визначити, що площина відсічення буде розташована на відстані від початку нерегулярного хвилеводу  $(2a - \lambda)/4tg\theta$ .

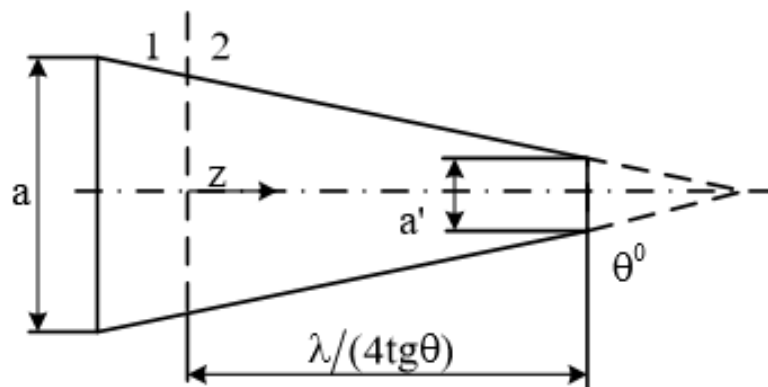


Рисунок 3.10 — Схема нерегулярного хвилевіда

Мінімальний розмір апертури зондової структури на основі прямокутного хвилеводу визначається зі співвідношення (3.2) при заданому значенні діелектричної (або магнітної) проникності матеріалу заповнення. На рис. 3.11 представлений графік залежності, за допомогою якого можна

визначити значення величини діелектричної (або магнітної) проникності для конкретної апертури зондової структури в залежності від робочої довжини хвилі. З графіків рис. 3.11 випливає, що при розмірах апертур  $a' = 1 \dots 5$  мм величина проникності заповнення перевищує значення 10 (максимальне для твердих технологічних діелектриків) і, відповідно, в цих випадках необхідно вибирати заповнення з  $\mu > 10$ . На рис. 3.12 представлені залежності довжин нерегулярних ділянок хвилевода ( $z$ ) від робочої довжини хвилі ( $\lambda$ ) при різних кутах відкриття апертури.

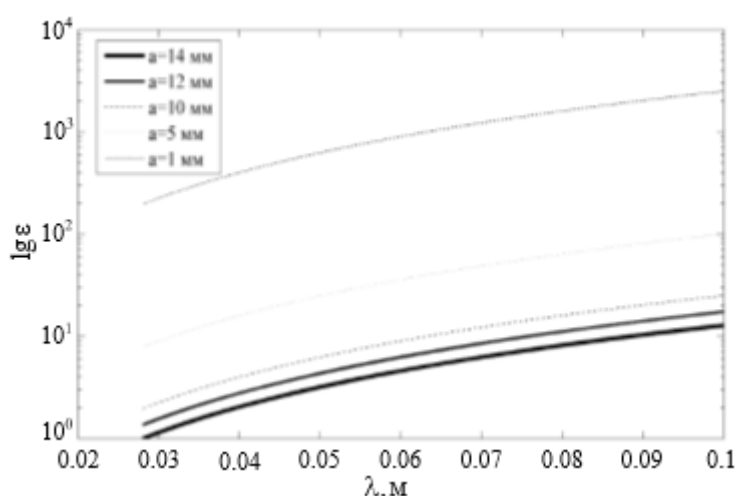


Рисунок 3.11 — Залежність величини  $\epsilon$  (або  $\mu$ ) від  $\lambda$  при заданих розмірах апертури зондової структури

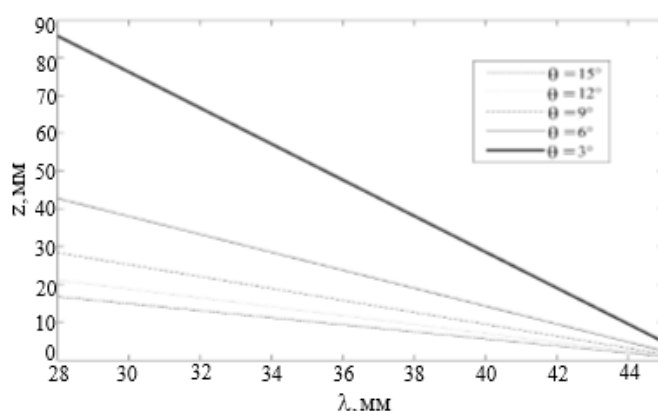


Рисунок 3.12 — Залежність довжини нерегулярної ділянки хвилевода ( $z$ ) від  $\lambda$  при різних кутах розкриття апертури

Якщо уявити нерегулярний поза межний хвилевід у вигляді великої кількості з'єднаних один з одним регулярних хвилеводів довжиною  $\Delta z$ , то для розрахунку коефіцієнта загасання можна використовувати наступне співвідношення [24]:

$$\alpha_i = 20l g \left( \exp \left\{ - \sum_{k=1}^n \frac{\pi}{\left( \frac{\lambda}{4tg\theta} - k\Delta z \right) tg\theta} \times \sqrt{1 - \frac{\left[ 4 \left( \frac{\lambda}{4tg\theta} - k\Delta z \right) tg\theta \right]^2}{\lambda^2}} \times \Delta z \times 2 \right\} \right) \quad (3.3)$$

де  $n = z/\Delta z$ .

На рис. 3.13 наведено графіки  $\alpha(z)$ , які обчислені для поза межних нерегулярних хвилеводів за формулою (3.3). При цьому:  $\lambda = 32$  мм,  $\Delta z = 1$  мм,  $a = 23$  мм,  $\theta = 15^\circ, 12^\circ, 9^\circ, 6^\circ, 3^\circ$ . Як видно з графіків (рис.3.13) через високі загасання в поза межному хвилеводі втрати енергії досягають рівня 80-90 дБ. Чим менше кут розкриття апертури і більше довжина нерегулярного ділянки хвилеводу, тим рівень загасання вище. Більш того, рівень загасання 80-90 дБ досягається при довжинах поза межних ділянок значно менших, ніж визначаються з графіків рис. 3.12.

Чисельне моделювання розглянутих хвилеводних структур з поза межними ділянками дозволяє виявити коефіцієнти відображення і передачі (Рис.3.14-3.19) [25].

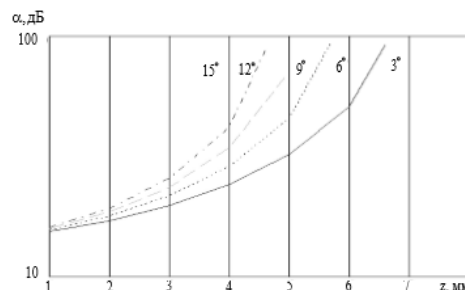


Рисунок 3.13 — Графіки залежності коефіцієнта загасання від довжини поза межної ділянки нерегулярного хвилеводу

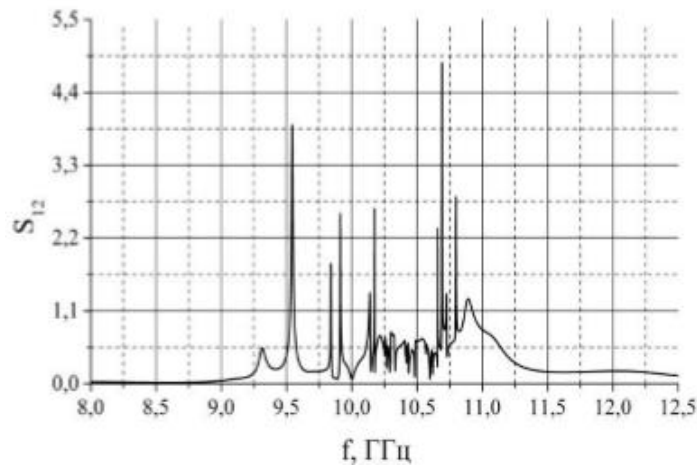


Рисунок 3.14 — Коефіцієнт передачі для нерегулярного хвилеводу (23x10) - (3x3) при  $\varepsilon$  (або  $\mu$ ) = 25

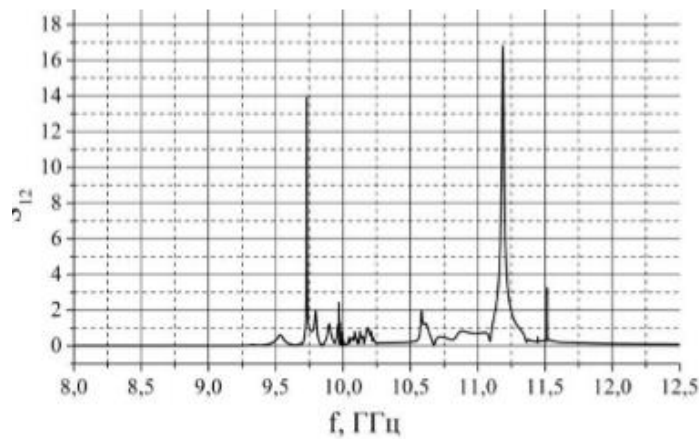


Рисунок 3.15 — Коефіцієнт передачі для нерегулярного хвилеводу (23x10) - (3x3) з клиноподібним узгоджувачем при  $\varepsilon$  (або  $\mu$ ) = 25

На вузькому кінці хвилеводу формується поле з підвищеною напруженістю, проте в регулярній частині виникають стоячі хвилі, а коефіцієнти відображення і передачі в робочому діапазоні мають сильно порізані характеристики. Це обумовлено, по-перше, вибором діелектрика зі зниженим значенням  $\varepsilon$  (за формулою (3.2) для таких розмірів величина  $\varepsilon$  повинна бути  $\sim 100$  і більше) і, по-друге, різким неузгодженим переходом в

регулярній і не позамежної частини хвилеводу від області без заповнення до області із заповненням.

Використання клиновидного узгоджувача дозволяє в деяких випадках значно зменшити амплітуду стоячих хвиль в непозамежній області і підвищити напруженість поля в вузькій частини позамежної ділянки. При збільшенні значення проникності ( $\varepsilon$  або  $\mu$  або  $\varepsilon \times \mu$ ) спостерігається звуження робочого діапазону і зменшення кількості резонансних відгуків.

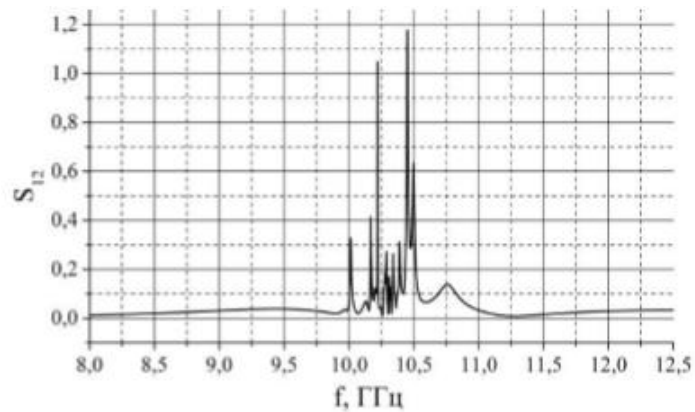


Рисунок 3.16 — Коефіцієнт передачі для нерегулярного хвилеводу (23x10) - (2x2) при  $\varepsilon$  (або  $\mu$ ) = 56,25.

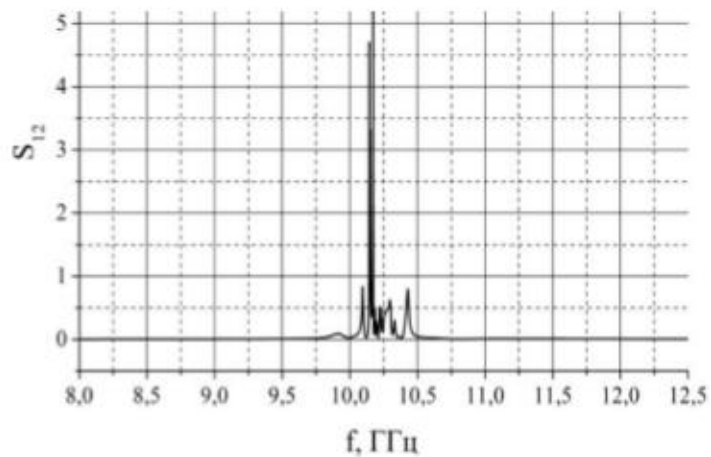


Рисунок 3.17 — Коефіцієнт передачі для нерегулярного хвилеводу (23x10) - (2x2) з клиноподібним узгоджувачем при  $\varepsilon$  (або  $\mu$ ) = 56,25.

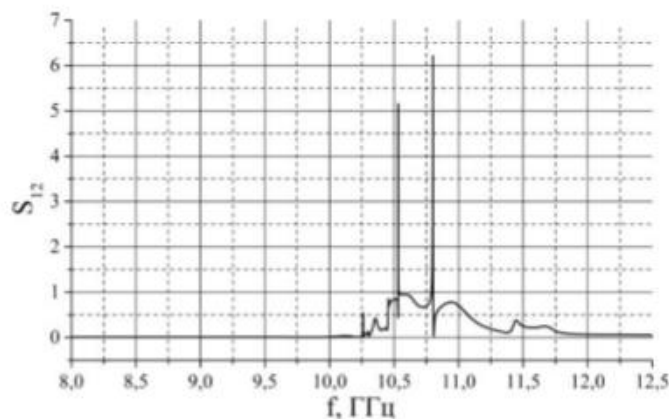


Рисунок 3.18 — Коефіцієнт передачі для нерегулярного хвилеводу (23x10) - (1x1) при  $\varepsilon$  (або  $\mu$ ) = 225

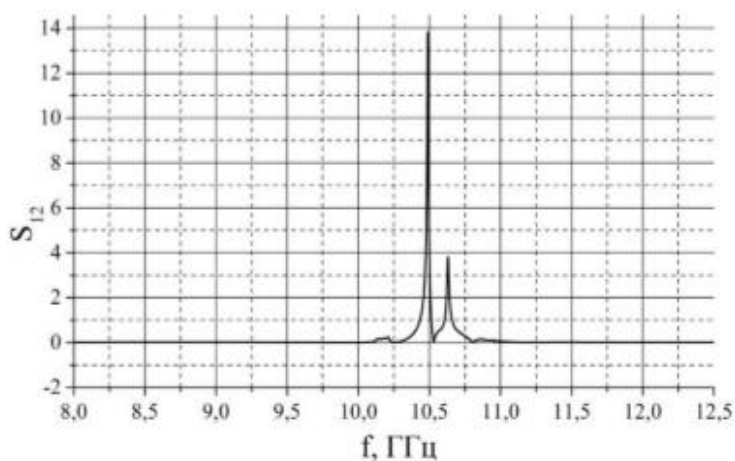


Рисунок 3.19 — Коефіцієнт передачі для нерегулярного хвилеводу (23x10) - (1x1) з клиноподібним узгоджувачем при  $\varepsilon$  (або  $\mu$ ) = 225

Фактично при дуже сильному ступені поза межності (розміри вихідних перетинів 3x3, 2x2, 1x1 мм), що компенсується за допомогою заповнення з великими значеннями проникності, характеристики можливої зондової структури на основі прямокутного нерегулярного хвилеводу погіршуються в зв'язку з скороченням робочого діапазону частот і проявом резонансних явищ. Оскільки розподіл полів, розраховувався для відповідних максимальних значень коефіцієнтів передачі і при цьому не спостерігалось резонансних розподілів в області вставок, можна припустити, що їх

джерелом є процеси в регулярних і непоза межних областях, що обумовлені недостатнім узгодженням поза межної і непоза межної частин хвилеводу.

Розглянуті в роботі нерегулярні хвилевідні структури з поза межністю, знімаються за допомогою діелектричного або магнітного заповнення, представляються достатньо перспективними для створення мікрозондових структур для локальної мікрохвильової безконтактної діагностики різних матеріалів та об'єктів. Достоїнством цих пристроїв є їх конструктивна простота, а також можливість формування в вихідній частині фіксованої поляризації електромагнітного поля. К недолікам можна віднести необхідність більш твердого підбору матеріалу заповнення з необхідними характеристиками та прийняття мір по оптимізації геометрії зовнішніх частин вставки для узгодження її з регулярною частиною хвилевіда.

## ВИСНОВКИ

За допомогою методів математичного моделювання та експериментально проведено дослідження різних типів мікрохвильових резонаторних вимірювальних перетворювачів з мікрозондовими сенсорними елементами коаксіального типу. Необхідність проведення таких досліджень пов'язана з їх широким застосуванням для локального неруйнівного контролю і діагностики електрофізичних характеристик мікро- та нанорозмірних об'єктів і структур.

При аналізі резонаторних вимірювальних перетворювачів з мікрозондовими елементами за основний критерій обрано досягнення максимальної добротності, яка визначає чутливість вимірювань. Досліджено структури вимірювальних перетворювачів на основі коаксіального резонатора, геометричні розміри якого плавно змінюються, також проведено дослідження мікрохвильових вимірювальних перетворювачів на основі гібридних нерегулярних об'ємних і планарних структур. Розглянуто характер розподілу електромагнітного поля в структурах перетворювачів, амплітудно-частотні характеристики та їх зміни при взаємодії із зовнішніми об'єктами. Досліджено практичні конструкції резонансних вимірювальних перетворювачів, які можуть бути використані як у скануючій мікрохвильовій мікроскопії, так і в інших вимірювальних системах і комплексах. Показано можливість створення високодобротних вимірювальних перетворювачів на основі гібридних нерегулярних структур, що збуджуються на вищих типах коливань. Результати досліджень, які були проведені, дозволяють розширити практику та галузі застосування нерегулярних резонансних структур НВЧ діапазону.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Chen, L.F. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization / L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.k. Varadan – John Willy & Sons, Ltd, 2004. – 537 p.
2. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління / Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич та ін.; за ред. Я. І. Лепіха. – Одеса : Астропринт, 2011. – 352 с.
3. Лисовский, В.В. Теория и практика высокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов / В.В. Лисовский – Минск: УОБГАТУ, 2005. – 292 с.
4. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем: монографія / Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич та ін.; за ред. Я. І. Лепіха. – Одеса : Астропринт, 2010. – 296 с.
5. Scanning Probe Microscopy: Electronic and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale / Edited by S. Kalinin, A. Gruverman. – Springer Science Business Media, LLC, 2007. – 980 p.
6. Nyfors, E.G. Cylindrical microwave resonator sensors for measuring materials under flow / E.G. Nyfors – Dissertation for degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki University of Technology, 2000. – 181 p.
7. Федюнин, П.А. Микроволновая термовлагодетрия / П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, А.А. Воробьев, В.Н. Чернышов. под ред. П.А. Федюнина – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. – 208с.
8. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т.1. / И.В. Лебедев – М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.
9. Федоров Н.Н. Основы электродинамики. / Н.Н. Федоров – М.: Высшая школа, 1980. – 399 с.

10. Bondarenko, I.N. Analysis of resonant trasducer characteristics for a scanning microwave microscope / I.N. Bondarenko, Yu.S. Vasiliev, A.M. Prokaza // 21st International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, 2011, Conference Proceedings, art. № 6069099, pp. 665-666.
11. Бондаренко И.Н. Резонаторные измерительные преобразователи на основе регулярных волноводов / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.М. Проказа // Сб. научн. трудов 4 Международной научн. конф. «Функциональная база нанoeлектроники». – Кацивели, 2011, 30.09. – 3.10.2011. – С. 241-244.
12. Бондаренко И.Н. Измерительные преобразователи на основе резонансных волноводных регулярных структур / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.М. Проказа, С.И. Троицкий // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. –2011. – Вып. 167. – С. 129-134.
13. Бондаренко И.Н. Микрополосковые резонаторные измерительные преобразователи для сканирующей микроволновой микроскопии / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич // Сб. научн. трудов 6 Международной научн. конф. «Функциональная база нанoeлектроники». – Харьков-Крым, 2013, 30.09.-4.10.2013. – С. 86-89.
14. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник (в 2-х книгах) / Под ред. В.В.Клюева. – М. : Машиностроение, 1986. – Т.1. – 488 с.
15. Бензарь В.К. Техника СВЧ-влажнометрии. – Минск: Вышэйшая школа, 1974. – 304 с.
16. Гаврилин В.В., Григулис Ю.К., Пориньш В.М. Электромагнитные радиоволновые приборы для контроля слоев полупроводниковых и металлических слоев. – Рига: Зинатне, 1982. – 162 с.
17. Гордиенко Ю.Е. СВЧ диагностика слоистых полупроводниковых материалов: Дисс. докт. физ.-мат.наук. – Харьков: ХИРЭ, 1985. – 397 с.

18. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б. Измерение параметров полупроводников, микро- и наноструктур на СВЧ. – Саратов: СГУ, 2007. – 140 с.
19. Klein O., Donovan S., Dressel M. at all. Microwave cavity perturbation technique // International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1993. – Vol. 14. – № 12. – P. 2433–2517.
20. Мищенко С.В., Малков Н.А. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов. – Тамбов: ТГТУ, 2003. – 128 с.
21. Бондаренко И.Н. Высокодобротные типы колебаний в нерегулярных гибридных структурах / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич, Троицкий С.И. // Радиофизика и электроника, 2013, т. 4 (18), № 1, с.91-94.
22. Бондаренко И.Н., Рострипа Е.Е. Коаксиальный резонаторный измерительный преобразователь на виде колебаний  $H_{01n}$  // Сб. научн. трудов 3 Международной научн. конф. «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники», Харьков-Кацивели, 2010, с. 313-315.
23. Бондаренко, И.Н. Высокодобротный резонаторный измерительный преобразователь на основе нерегулярной коаксиальной структуры / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич // Сб. научн. трудов 4 Международной научн. конф. «Функциональная база наноэлектроники», Кацивели, 2011, 30.09.3.10.2011. с.245-247.
24. Бондаренко, И.Н. Регулируемые элементы связи на основе запердельных волноводов / И.Н. Бондаренко, Н.О. Гнесь, А.С. Гнесь // Радиотехника. Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Х., 1986. – Вып. 76. – С. 114– 119.
25. Бондаренко И.Н. Измерительный зонд на основе запердельного волновода / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич, А.В. Шахов // Сб. научн. трудов 6 Международной научн. конф. «Функциональная база наноэлектроники», Харьков Крым, 2013, 30.09.-4.10.2013. с. 82-85.