

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

МІКРОХВИЛЬОВА НЕРУЙНІВНА ДІАГНОСТИКА МАЛОРОЗМІРНИХ
ОБ'ЄКТІВ

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу II рівня вищої освіти
групи МНПм-21-1

Сухін В.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро–та наносистемна
техніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Мікро– та наноелектронні
прилади і пристрої

(повна назва освітньої програми)

Керівник зав. каф. проф. Бондаренко І.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри Бондаренко І. М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2022 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
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Мікро– та наноелектронні прилади і пристрої
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Сухіну Віктору Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи МІКРОХВИЛЬОВА НЕРУЙНІВНА ДІАГНОСТИКА
МАЛОРОЗМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ

затверджена наказом по університету від 14.11.2022 р. № 1473Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 14.12. 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести теоретичні та експериментальні модельні дослідження щодо створення мікрохвильових пристроїв неруйнівної діагностики електрофізичних параметрів малorozмірних об'єктів та методик їх практичного застосування на прикладі вимірювання електрофізичних характеристик біологічних речовин.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Огляд напрямків неруйнівного контролю параметрів речовин та об'єктів з наведенням прикладів вимірювальних структурних схем, можливих об'єктів дослідження, параметрів контролю. Визначити засоби контролю параметрів малorozмірних об'єктів.

2. Визначити та обґрунтувати вибір засобів НВЧ діагностики малорозмірних об'єктів, можливу потенційну просторову роздільну здатність обраних засобів контролю.

3. Визначити перелік можливих об'єктів та параметрів контролю.

4. Визначити технічні і конструктивні параметри засобів НВЧ контролю, які впливають на чутливість вимірювань.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Слайди: 10 одиниць_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів	Примітка
1	Отримання завдання	15.11.2022	
2	Огляд інформаційних джерел	17.11 – 23.11	
3	Аналіз інформаційних джерел	24.11 – 27.11	
4	Вибір методу, конструкції та форми зонду	28.12 – 03.12	
5	Пояснювальна записка	05.12 – 07.12	
6	Підготовка презентації	08.12 – 10.12	
7	Рецензування, нормоконтроль	12.12. – 13.12	
8	Здача роботи на кафедрі	15.12.2022	

Дата видачі завдання 14 листопада 2022 р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____ зав. каф. проф. Бондаренко І.М.

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 52 сторінки, 30 рисунків, 2 додатки, 16 використаних джерел.

НВЧ, РАДІОХВИЛЯ, ДОБРОТНІСТЬ, ЧАСТОТА, РЕЗОНАНС, ЗОНД, НЕРУЙНІВНА ДІАГНОСТИКА, ВІЛЬНА ВОДА, МІКРОХВИЛЬОВА МІКРОСКОПІЯ.

Об'єкт дослідження – неруйнівна діагностика параметрів речовин та об'єктів.

Мета роботи – визначення та обґрунтування вибору засобів НВЧ діагностики електрофізичних характеристик малорозмірних об'єктів.

Метод досліджень – теоретичний, що включає аналіз теоретичних та експериментальних досліджень неруйнвної діагностики як мікрохвильової так і радіохвильової, через цей аналіз обереться метод, конструкція, та форма зонда.

Робота включає в себе аналіз та обробку досліджень неруйнвного контролю в мм діапазоні.

Отримані результати дозволяють обирати конструктив мікрохвильових сенсорів для неруйнвного контролю електрофізичних параметрів різного роду біологічних об'єктів, тканин та середовищ. Це відкриває додаткові можливості у вивченні їх властивостей, контролю життядіяльності та діагностиці захворювань.

ABSTRACT

The explanatory note contains 52 pages, 30 figures, 2 appendix, 16 used sources.

UHF, .RADIO WAVE, QUALITY, FREQUENCY, RESONANCE, PROBE, NON-DESTRUCTIVE DIAGNOSTICS, FREE WATER, MICROWAVE MICROSCOPY.

The object of research is non-destructive diagnostics of the parameters of substances and objects.

The purpose of the work is to define and justify the choice of microwave means for diagnosing the electrophysical characteristics of small-sized objects.

The research method is theoretical, which includes the analysis of theoretical and experimental studies of non-destructive diagnostics, both microwave and radio, through this analysis the method, design, and shape of the probe will be chosen.

The work includes the analysis and processing of non-destructive testing studies in the mm range.

The obtained results make it possible to choose the design of microwave sensors for non-destructive control of electrophysical parameters of various types of biological objects, tissues and environments. This opens up additional possibilities in the study of their properties, control of life activities and diagnosis of diseases.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ЗОНДОВИХ НАПРЯМКІВ ДІАГНОСТИКИ РЕЧОВИН ТА ОБ'ЄКТІВ	10
1.1 Скануюча тунельна мікроскопія	10
1.2 Атомно-силова мікроскопія	11
1.3 Електросилова мікроскопія.....	12
1.4 Магнітно-силова мікроскопія	12
1.5 Близькопольна оптична мікроскопія	13
1.6 Скануюча мікрохвильова мікроскопія	14
2 ОГЛЯД РАДІОХВИЛЬОВИХ НАПРЯМКІВ ДІАГНОСТИКИ.....	16
2.1 Хвильові методи діагностики	16
2.2 Хвильоводні методи діагностики	22
2.3 Резонаторний метод.....	24
2.4 Оптичні методи.....	24
3 СКАНУЮЧА МІКРОХВИЛЬОВА МІКРОСКОПІЯ.....	26
3.1 Близькопольова НВЧ-діагностика	26
3.2 Типові схеми мікрохвильових мікроскопів	28
4 ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАСОБІВ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ДІАГНОСТИКИ МАЛОРОЗМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ	37
4.1 Засоби контролю параметрів біоречовин	37
4.2 Вплив форми зонду	43
ВИСНОВКИ	50
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	51
ДОДАТКИ	

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АТМ – атомно-силова мікроскопія

БМД – ближньопольова мікрохвильова діагностика

БОМ – близькопольна оптична мікроскопія

ДМ – діаграми спрямованості

ЕСМ – електросилова мікроскопія

ЕМП – електромагнітне поле

КВА – коаксіальна вимірювальна апертура

МСМ – магнітно-силова мікроскопія

НВЧ – надвисокі частоти

ПРЗ – просторова роздільна здатність

РВП – радіовимірювальні перетворювачі

СММ – скануюча мікрохвильова мікроскопія

СТМ – скануюча тунельна мікроскопія

GFM – Given Field Method

FEM – Finite Elements Method

ВСТУП

Проблема створення неруйнуючих, нетравмуючих методів контролю біооб'єктів в умовах збільшення техногенних навантажень на природне середовище є *актуальною*.

Надвисокі частотні (НВЧ) методи зондування є одним зі шляхів руху у цьому напрямку. В порівнянні з іншими електрофізичними методами, НВЧ методи, завдяки можливості вимірювань у широкому частотному діапазоні, в якому лежать частоти релаксації макромолекул, мають суттєво більшу інформаційну спроможність. Більшість молекул біоречовин електрично нейтральні. Електрофізичні властивості молекули біоречовин набувають тоді, коли з ними зв'язуються молекули води, які мають яскраво виражений дипольний момент. Тому вирішення проблеми визначення зв'язків води з біологічними макромолекулами та створення методів контролю стану води у біологічних речовинах є кроком у загальній проблемі діагностики стану біооб'єктів [1].

Методи й техніка безелектродного неруйнівного вхідного й міжопераційного контролю основний розвиток набули в технології мікроелектроніки та НВЧ вологометрії.

З розвитком НВЧ діагностики з'явилася необхідність концентрації зусиль на розробці методів і засобів контролю малорозмірних об'єктів. Це визначило використання так званої ближньопольової взаємодії чутливого елемента з об'єктом, що призвело до побудови первинних вимірювальних перетворювачів на основі резонаторів.

Потреба неруйнівного контролю об'єктів довільної форми обумовила, крім того, перевагу так званої апертурної взаємодії поля вимірювальних резонаторів з об'єктом.

Саме ці принципи були покладені в основу більшості розробок з НВЧ сенсоріки в останні роки.

Основними задачами таких розробок є: створення високоефективних за метрологічними показниками мікрохвильових датчиків для безелектродного виміру й контролю основних електрофізичних параметрів напівпровідникових матеріалів і функціональних шарів твердотільної електроніки й мікроелектроніки; визначення вологовмісту в дисперсних і пористих середовищах, біооб'єктах і т.п.; різномасштабного, від міліметрового до субмікронного, сканування неоднорідності розподілу контрольованих параметрів по поверхні й об'єму об'єктів.

Мета даної роботи - визначення та обґрунтування вибору засобів НВЧ діагностики електрофізичних характеристик малорозмірних об'єктів.

1 ОГЛЯД ЗОНДОВИХ НАПРЯМКІВ ДІАГНОСТИКИ РЕЧОВИН ТА ОБ'ЄКТІВ

1.1 Скануюча тунельна мікроскопія

Тунельний мікроскоп з'явився першим у сімействі скануючих зондових мікроскопів [2]. Принцип роботи СТМ заснований на явищі тунелювання електронів через вузький потенційний бар'єр між металевим зондом і зразком, що проводить, в зовнішньому електричному полі (рис.1.1).

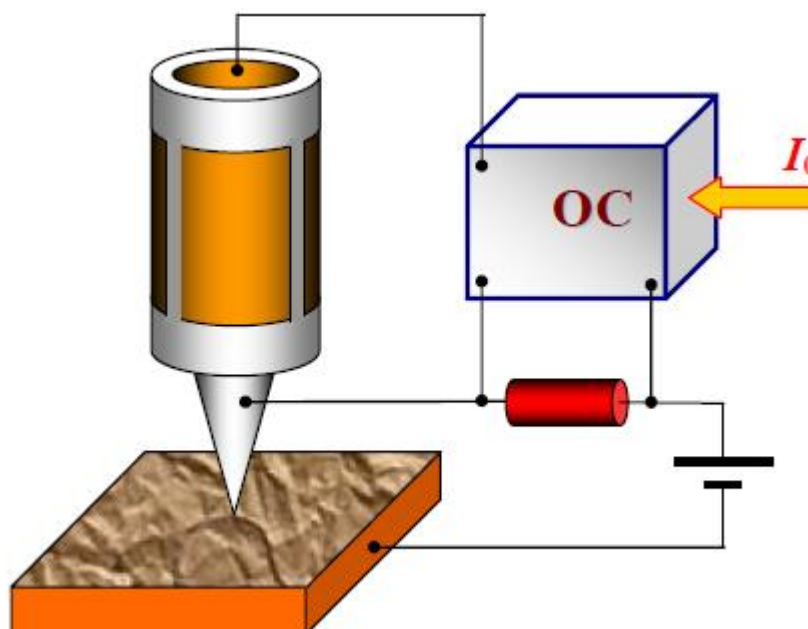


Рисунок 1.1 - Спрощена схема організації зворотного зв'язку по тунельному струму

У процесі сканування зонд рухається вздовж поверхні зразка, тунельний струм підтримується стабільним за рахунок дії зворотного зв'язку, і показання системи, що слідкує, змінюються в залежності від топографії поверхні. Такі зміни фіксуються, і їх основі будується карта висот. Інша методика передбачає рух голки на фіксованій висоті над поверхнею зразка. В цьому випадку фіксується

зміна величини тунельного струму і на основі цієї інформації йде побудова топографії поверхні. Відстань зонд – зразок в ангстремах (0,1 нм)

Цей пристрій використовується для вимірювання рельєфу провідних поверхонь з високою просторовою роздільною здатністю.

1.2 Атомно-силова мікроскопія

В основі роботи атомно-силового мікроскопа АСМ лежить силова взаємодія між зондом і поверхнею, для реєстрації якої використовуються спеціальні зондові датчики, що є пружною консоллю з гострим зондом на кінці (рис. 1.2). Сила, що діє на зонд з боку поверхні, призводить до згинання консолі. Реєструючи величину згину, можна контролювати силу взаємодії зонда з поверхнею. В даному випадку використовуються взаємодії обумовлені силами Ван-дер-Ваальса.

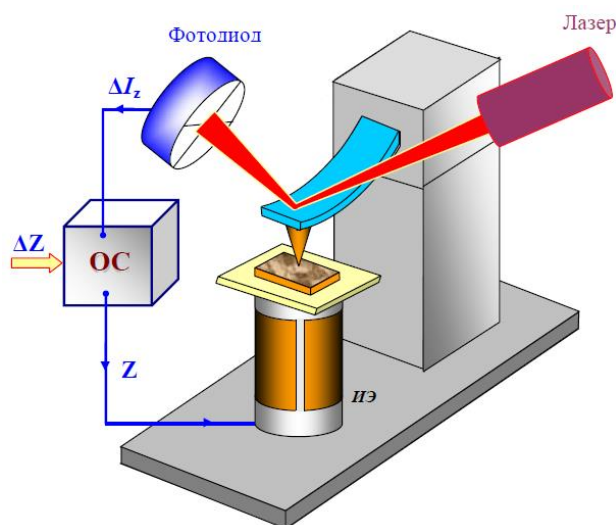


Рисунок 1.2 - Спрощена схема організації зворотного зв'язку в атомно-силовому мікроскопі

Цей мікроскоп використовується для вимірювання рельєфу провідних, та не провідних поверхонь з високою просторовою роздільною здатністю.

1.3 Електросилова мікроскопія

В електросиловій мікроскопії (ЕСМ) для отримання інформації про властивості поверхні використовують електричну взаємодію між зондом і зразком. Розглядається система, що складається з зондового датчика, у якого зонд має провідне покриття, і зразка, що являє собою тонкий шар матеріалу на підкладці, що добре проводить. Кантилевер відхиляється під впливом електростатичних сил заряджених зон поверхні зразка (рис. 1.3).

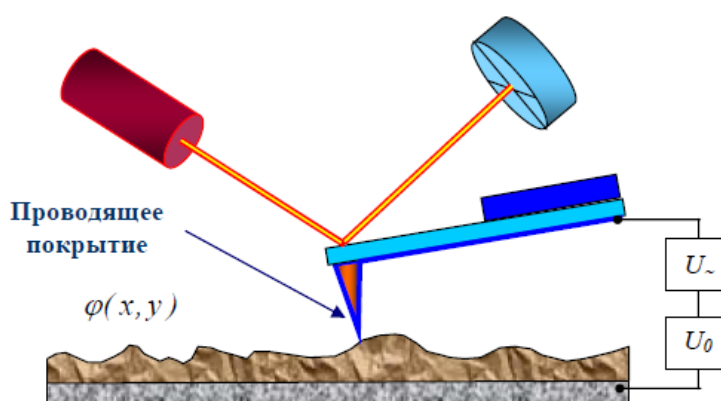


Рисунок 1.3 – Схема вимірювання електричної взаємодії зонда із зразком

Цей метод використовується для знаходження локальних діелектричних властивостей зразків малих товщин методом Кельвина під напругою.

1.4 Магнітно-силова мікроскопія

Магнітно-силовий мікроскоп використовується для дослідження локальних магнітних властивостей зразків. Даний прилад є атомно-силовим мікроскопом, у якого зонд покритий шаром феромагнітного матеріалу з питомою намагніченістю та при цьому відбувається магнітна взаємодія зонду та зразка (рис.1.4). Для отримання МСМ зображень зразків застосовуються квазістатичні та коливальні методики.

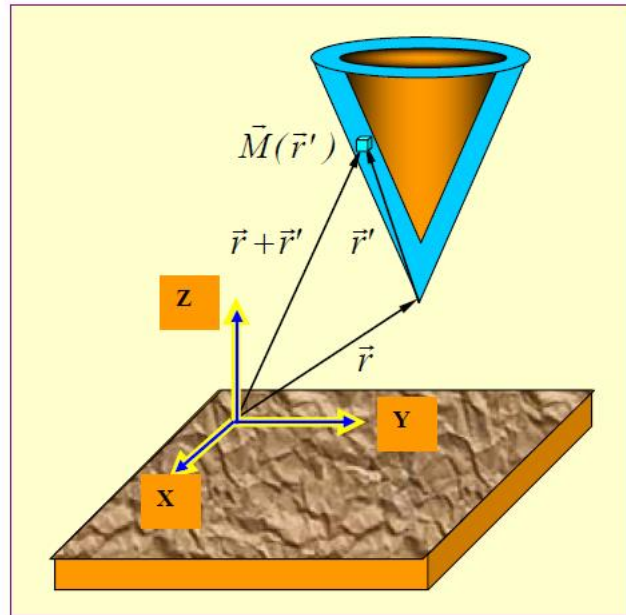


Рисунок 1.4 - Взаємодія МСМ зонда з магнітним полем зразка

Зображення МСМ виходить шляхом вимірювання зсуву амплітуди або фази при коливанні кантилевера, що відбувається під дією магнітної сили між поверхнею зразка і намагніченим кантилевером МСМ.

1.5 Близькопольна оптична мікроскопія

Близькопольний оптичний мікроскоп діє через явище проходження світла через субхвильові діафрагми. Для роботи БОМ необхідно утримувати зонд над поверхнею на відстані близько 10 нм і менше. Існують різні розв'язання даної проблеми, однак найбільшого поширення набули БОМ з так званим "shear force" методом контролю відстані між зондом і зразком (рис.1.5).

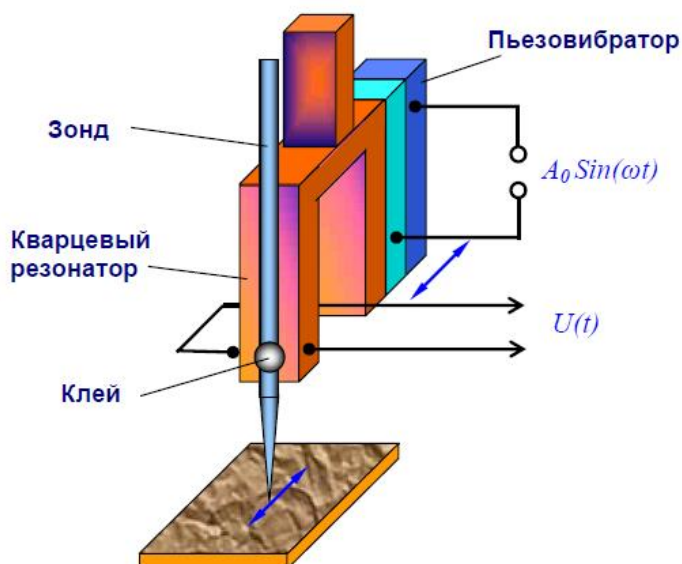


Рисунок 1.5 - Схема “shear-force” датчика відстані зонд-поверхня на основі кварцового резонатора камертонного типу

Він використовується для дослідження оптичних властивостей поверхні з дуже високою просторовою точністю, може робити зображення поверхні будь-яких об'єктів із точністю набагато краще, ніж оптична довжина хвилі. Відбувається це завдяки ближньому оптичному полю.

1.6 Скануюча мікрохвильова мікроскопія

Походить на тунельний (СТМ) та атомно-силової (АСМ) мікроскопії. Серед відмінностей фігурує можливість роботи у безконтактному режимі. При цьому величина зазору між вістрям зонда і об'єктом встановлюється відповідно до специфіки зображення, що формується (рис. 1.6). Головні параметри при використанні резонаторного сенсору це робоче значення невантаженої добротності (Q) відносна її зміна при скануванні $-\frac{\Delta Q}{Q}$; зміна резонансної частоти при скануванні $-\frac{\Delta f}{f}$. Ці параметри і сигнали сканування, що виділяються в такому вигляді, доцільно називати фундаментальними. На практиці виділяють значення навантаженої добротності, що залежить ще й від коефіцієнтів зв'язку RZ

із хвилеводним трактом. Зазвичай кількісні оцінки величини фундаментальних сигналів розраховується у наближенні теорії малих збурень.

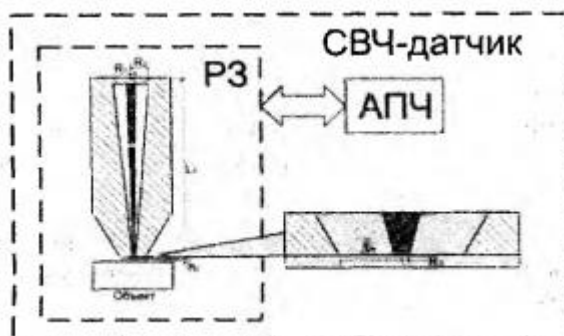


Рисунок 1.6 - Схема НВЧ датчика скануючого мікрохвильового мікроскопа на основі конусного резонаторного зонда

Може досліджувати діелектричні параметри та вологовмісність матеріалів, як наприклад біооб'єктів, полімерів. Перевага СММ перед СТМ та АСМ - багатопараметровість діагностики та можливість томографії.

2 ОГЛЯД РАДІОХВИЛЬОВИХ НАПРЯМКІВ ДІАГНОСТИКИ

До появи зондових методів діагностики найбільш поширеними засобами неруйнівного контролю параметрів і характеристик різного роду об'єктів, структур та середовищ були радіохвильові методи [3]. Вони і зараз дуже широко використовуються при проведенні різних видів неруйнівної діагностики. Тому, для більш ґрунтовного рішення завдань даної роботи треба також розглянути особливості радіохвильової діагностики.

2.1 Хвильові методи діагностики

Базова структура цих засобів складається з випромінювача, який формує відповідний розподіл зондуючого поля, об'єкта діагностики та приймального пристрою для вимірювання амплітуди і фази випромінювання, вибитого від об'єкта, або випромінювання, яке пройшло крізь нього. Зміни амплітуди і фази є інформаційними параметрами, пов'язаними з характеристиками досліджуваного об'єкту або середовища.

Розглянемо декілька цих схем.

Прилади амплітудно-фазові «на проходження». У цьому випадку внутрішній стан об'єкта контролю визначається впливом середовища на сигнал, що пройшов через зразок. Принципову схему методу наведено на рис. 2.1. Основою методу є наявність двох антен (приймальною та випромінюючою), що знаходяться по різні сторони об'єкта контролю і, як правило, співвісних між собою. В основному існують дві принципові блок-схеми приладів, у яких застосовано метод «на проходження» (рис. 2.2). Принцип роботи схеми, де всі елементи позначені суцільною лінією полягає в наступному. Енергія НВЧ від клистронного генератора 2 подається через вентиль 3 хвилевод і атенюатор 4 до випромінюючого рупора 5. Енергія проходить через зразок 10, приймається

приймальною антеною 6 і через вимірювальний атенюатор потрапляє на детектор 7, після чого сигнал посилюється і подається.

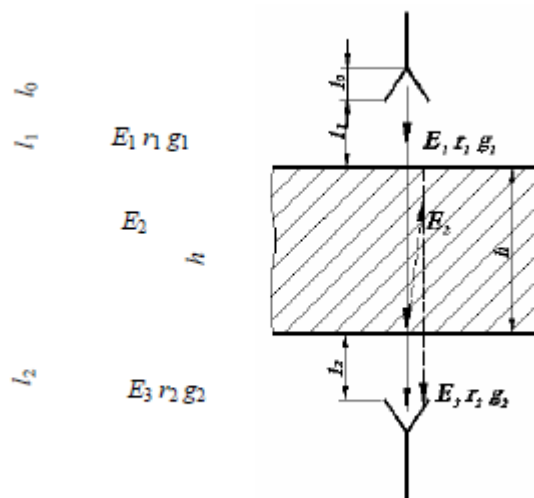
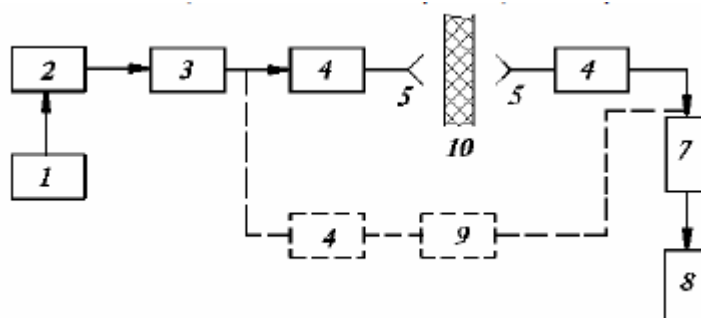


Рисунок 2.1 - Принципова схема утворення сигналу у схемі «на проходження»



1 – блок живлення; 2 – джерело енергії НВЧ; 3 – елемент, що розв'язує (феритовий вентиль); 4 – атенюатор; 5 – випромінююча антена; 6 – приймальна антена; 7 – детектор; 8 – блок обробки інформації; 9 - фазообертач; 10 – об'єкт контролю

Рисунок 2.2 - Блок-схема амплітудно-фазових приладів, що працюють за схемою «проходження»

Така схема дозволяє проводити контроль властивостей матеріалу за величиною загасання енергії НВЧ у зразку, що відраховується за шкалою атенюатора, за допомогою якого величина сигналу індикаторного пристрою підтримується на постійному рівні.

Прилади амплітудно-фазові «на відбиття». Внутрішній стан об'єкта контролю визначається впливом середовища на сигнал, відбитий від дефекту або поверхні зразка. Принципову схему методу наведено на рис. 2.3. Основою методу є одностороннє розташування приймальної та випромінюючої антен. Існують дві блок-схеми приладів, що працюють за методом «відбиття» (рис. 2.4). Принцип роботи таких схем ось у чому.

Енергія НВЧ клистронного генератора через 2 вентиль 3 подається на випромінювальну антену 5. Відбитий сигнал (зазвичай сума всіх відбитих сигналів) потрапляє або на ту ж антену (рис. 2.4, а) і за допомогою відповідних хвилеводних елементів подається на детектор 6, або в іншу приймальну антену 5 (рис. 2.4 б), детектується, обробляється і подається на індикаторний прилад 7.

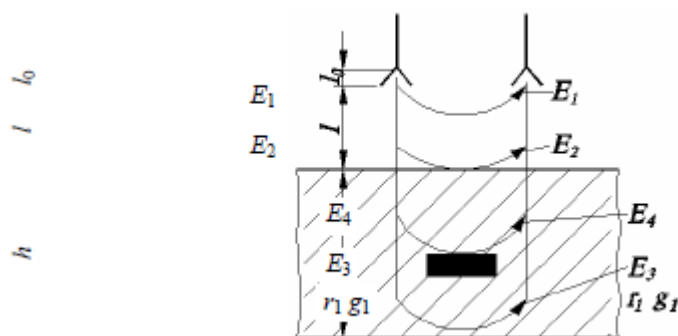
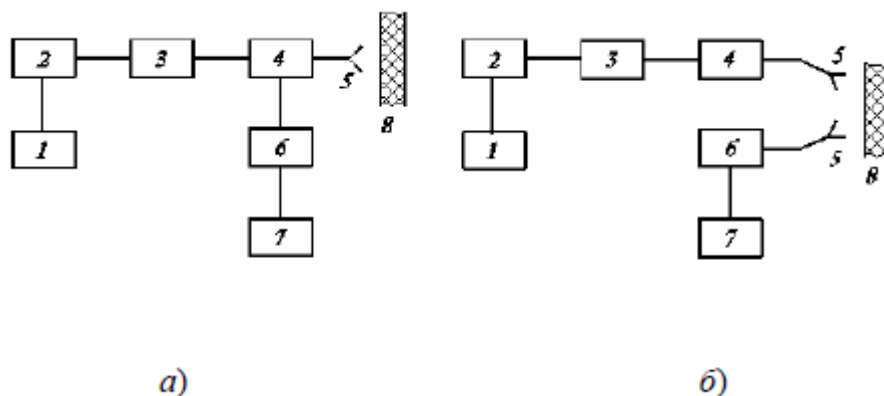


Рисунок 2.3 - Принципова схема утворення сигналу в амплітудно-фазових приладах, що працюють за схемою «відображення»

Головною технічною частиною цих методів, яка визначає їх чутливість є випромінювальні та приймальні антени, приклади реалізації яких наведені далі.

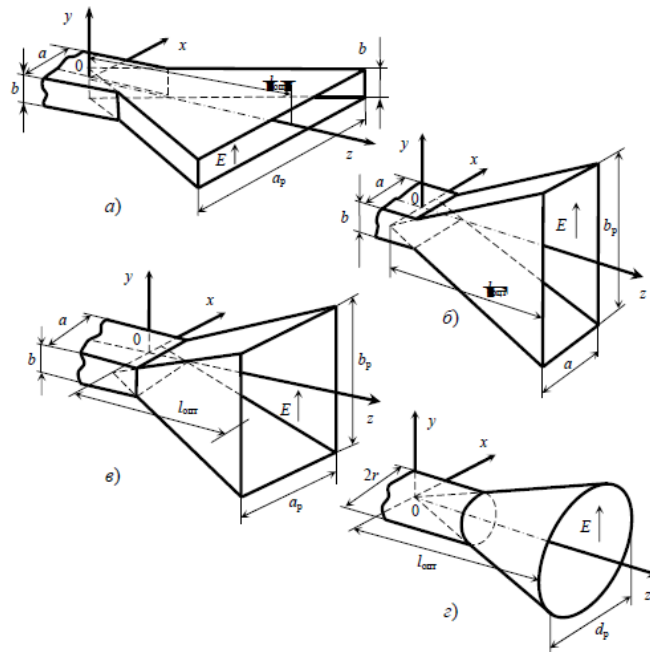
Для більшої спрямованості хвилеводний випромінювач перетворюють на рупорну антену. Найбільш поширені секторіальні (рис. 2.5, а, б), пірамідальні (рис. 2.5, в) та конічні (рис. 2.5, г) рупори з прямолінійними утворюючими.



а – однозондовий варіант; б – двоантений варіант: 1 – блок живлення; 2 – джерело енергії НВЧ; 3 – елемент, що розв'язує; 4 – вузол поділу випромінюваного та прийнятого сигналу (подвійний хвильовий трійник, спрямований відгалужувач, щілинний міст тощо); 5 – випромінююча (приймальна) антена; 6 – детектор; 7 – індикаторний прилад; 8 – об'єкт контролю

Рисунок 2.4 - Блок-схема амплітудно-фазових приладів, працюючих «на відбиття»

Форма головної пелюстки амплітудою діаграми спрямованості (ДН) рупорної антени залежить від кута розчину рупору. Дослідження показали, що при постійній довжині рупора найбільша спрямованість випромінювання для секторіальних рупорів виходить при кутах розчину рупора, які відповідають наступним фазовим помилкам (у радіанах) на краях розкриття: $\Phi = \frac{3\pi}{4}$ у площині Н, $\Phi = \frac{\pi}{2}$ у площині Е. Рупори з такими значеннями максимальних фазових помилок отримали назву оптимальних.



а, б - секторіальні; в – пірамідальний; г – конічний

Рисунок 2.5 - Рупорні опромінювачі

Поліпшеними характеристиками з точки зору діапазонності рівня бічних пелюсток амплітудної ДН мають рупорні антени зі ступінчастими, криволінійними (зокрема, експонентними) та гребінчастими утворюючими. Підбором сходів і форми кривої утворює діапазон робочих частот таких антен може бути розширений в 1,5...2 рази, а просторова амплітудна ДН наближена до осесиметричної.

Точне (у межах концепції основної хвилі) знаходження геометрії рупорних антен зі ступеневими утворюючими, оптимізованих поліномом Чебишева, можливе для випадків, коли $N \leq 4$, і потребує розв'язання на ЕОМ трансцендентних рівнянь. Наближена теорія дозволяє встановити геометрію для випадків, коли число сходів $N \leq 20$.

Далі розглянемо НВЧ опромінювач у вигляді відкритого кінця хвильоводу прямокутного поперечного перерізу

Відкритий кінець стандартного прямокутного хвильоводу є дуже ефективною антеною. Навіть без будь-яких підстроювальних пристроїв $K_{смв}$ у

хвилеводі дорівнює 1,6, тобто. від відкритого кінця хвилеводу відбивається менше 5,5 % потужності, що передається по хвилеводу.

Найменшу площу опромінення дає випромінювач у вигляді відкритого кінця H -подібного хвилеводу

Найкраще узгодження з вільним простором має рупорна антена з коригуючою діелектричною лінзою 1 у її розкриві (рис. 2.6). Вона застосовується або для створення плоского фронту НВЧ хвиль (рис. 2.6, а), або фокусування НВЧ випромінювання на невеликій площі подібно до звичайної двоопуклої лінзи в оптичному діапазоні. Мінімальний діаметр плями у фокусі виходить приблизно рівним робочій довжині хвилі λ (рис. 2.6, б).

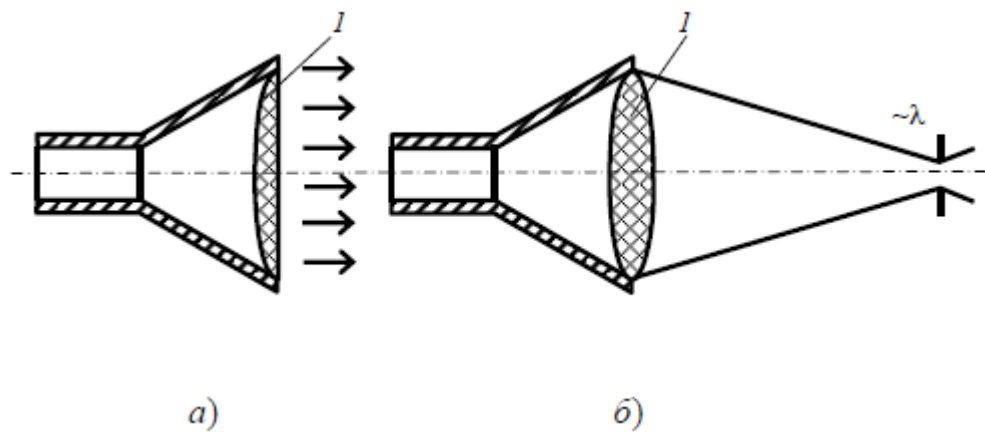


Рисунок 2.6 - НВЧ опромінювач у вигляді рупорно-лінзової антени для створення плоского фронту хвилі (а) та для фокусування випромінювання (б)

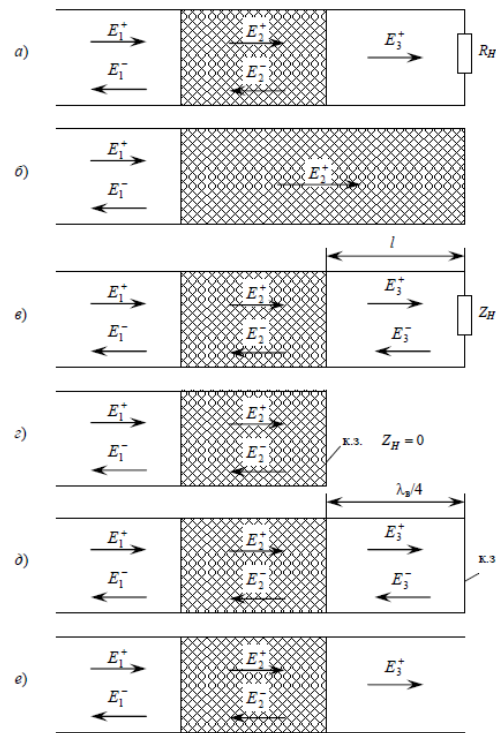
Рівномірне випромінювання прямокутному ділянці поля створює пірамідальний рупор, підключений до прямокутного хвилеводу з хвилею H_{10} . Однак сталість площини поляризації напруженості електричного поля E в цьому випадку допустимо не для всіх застосувань.

Застосування розглянутої квазіоптичної системи формування пучка електромагнітних хвиль дозволило передавати на опромінювану поверхню 80 % енергії, що випромінюється рупором при допустимій зміні інтенсивності напруженості електричного поля 3 дБ від максимального значення. Без застосування описаної системи формування на поверхню, що рівномірно опромінюється, припадає тільки 55 % випромінюваної рупором енергії поля хвилі

Н11. Застосування лінзи еквівалентно збільшенню площі поверхні, що опромінюється, приблизно в 1,5 рази.

2.2 Хвильоводні методи діагностики

Суть хвильоводних методів, як відомо, ось у чому. Діелектричний зразок певної форми міститься у хвилевід, повністю або частково заповнюючи його перетин. Від генератора НВЧ на зразок хвильоводом направляється електромагнітна хвиля E_1^+ (рис. 2.7). У цьому випадку утворюються дві хвилі: відбита E_1^- і та що пройшла через зразок E_3^+ . Сума енергій цих хвиль не дорівнює енергії падаючої хвилі через втрати в діелектрику. Інформація о параметрах матеріалу полягає у фазі і амплітуді відбитої і прохідної скрізь зразок хвилі, тобто, у комплексному коефіцієнті відбиття та проходження. Практично для вимірів використовуються різні варіанти реалізації хвильоводних методів. Наприклад, хвильоводний тракт навантажується на узгоджене навантаження, а відбита хвиля створюється лише самим зразком (рис. 2.7, а). Стрілками на малюнку показано наявність прямих і зворотних хвиль на різних ділянках хвильоводного тракту. Сумарна відбита хвиля E_1^- утворюється з допомогою хвиль, відбитих передньої і задньої гранями зразка. Можна виключити вплив задньої грані, зробивши зразок «нескінченно» протяжним (рис. 2.7 б), що практично можливо при великих втратах енергії в його матеріалі.



а – узгодженого навантаження; б - нескінченного шару; в – комплексного навантаження; г – короткого замикання; д – холостого ходу; е – вимірювання комплексного коефіцієнта проходження

Рисунок 2.7 - Хвильоводні методи вимірювання параметрів діелектриків

Широке застосування для дослідження діелектриків із середніми ($\text{tg } \delta = 0,1 - 0,01$) та малими ($\text{tg } \delta < 0,01$) втратами знайшли методи короткого замикання та холостого ходу. Хвильові методи дозволяють :

- вимірювати ϵ і $\text{tg } \delta$ діелектриків при температурах, що не перевищують приблизно 1800 К (подальше підвищення температури обмежено нагрівостійкістю матеріалів хвильоводів, що знаходяться в безпосередньому тепловому контакті з досліджуваним зразком);
- визначати $\text{tg } \delta$ діелектриків, величина якого не менше 0,001;
- вимірювати при нормальній температурі з похибкою до 0,2 - 0,5 %, $\text{tg } \delta$ з похибкою до 1 - 3 %, з підвищенням температури похибка збільшується і при температурах вище 1300 К становить $\pm 1 - 7\%$ для ϵ , $\pm 10 - 25\%$ для $\text{tg } \delta$.

2.3 Резонаторний метод

Резонаторні методи вимірювання застосовуються в дециметровому та сантиметровому діапазонах і іноді у довгохвильовій частині міліметрового діапазону. Як правило, у дециметровому діапазоні використовуються коаксіальні резонатори, що мають у цьому діапазоні прийнятні габарити та добротність, а на більш коротких хвилях – об'ємні резонатори (циліндричні або прямокутні). У резонаторах здійснюється сильніша взаємодія між електромагнітним полем та досліджуваною речовиною, ніж у хвилеводах, що дозволяє підвищити чутливість апаратури та вимірювати параметри речовин з малими втратами ($\text{tg } \delta = 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-5}$). З іншого боку, резонаторні методи дозволяють досліджувати речовини з великими втратами ($\text{tg } \delta = 0,1 - 1$), при цьому обсяг зразка повинен бути малим по відношенню до обсягу резонансної порожнини.

Як відомо, теорія резонаторних методів заснована на вирішенні рівнянь електромагнітного поля для типу резонатора, що застосовується з урахуванням впливу на це поле і параметри резонатора діелектричного зразка, що встановлюється в певному місці резонатора. При малих розмірах зразка визначається його вплив безпосередньо на параметри резонатора (резонансну частоту та добротність) у припущенні, що поле резонатора не деформується (метод малих збурень).

Істотний вплив на точність визначення параметрів матеріалу мають початкова похибка форми та похибка визначення геометричних розмірів резонатора. Якщо ця похибка не перевищує $\pm 0,01$ мм, то в сантиметровому діапазоні хвиль при вимірах у нормальних умовах похибка визначення ϵ становить $\pm 0,3 - 1$ % та $\pm 3 - 5$ % похибка $\text{tg } \delta$

2.4 Оптичні методи

Відкриті оптичні резонатори мають низку характерних особливостей, зокрема:

- геометричні розміри оптичних систем можуть бути значно більшими за довжину хвилі, що необхідно для проектування та виготовлення апаратури міліметрового та субміліметрового діапазонів;
- до поперечних розмірів оптичних систем та досліджуваних діелектричних зразків не пред'являється будь-яких вимог щодо точності виконання; вони повинні бути просто більшими за поперечні розміри хвильових пучків;
- завдяки одномірності відкритих резонаторів суттєво розріджується спектр їх власних частот та збільшується добротність, що дозволяє застосовувати їх у міліметровому та субміліметровому діапазонах;
- нарешті, оптичні системи – це відкриті системи, не обмежені з усіх боків будь-якими стінами. З погляду досліджень діелектриків при високотемпературному нагріванні це дуже істотно, так як полегшує суміщення зразка з високотемпературними середовищами, при розміщенні зразка у вільному просторі (поза механічним контактом з вимірювальною апаратурою) є можливість досліджувати діелектричні матеріали при дуже високих температурах.

3 СКАНУЮЧА МІКРОХВИЛЬОВА МІКРОСКОПІЯ

3.1 Близькопольова НВЧ-діагностика

Близькопольова НВЧ-діагностика – неруйнівний прямий метод дослідження, що дозволяє отримувати інформацію про поверхневі та приповерхневі властивості різних середовищ. Вона базується на реєстрації частини НВЧ-дії, локалізованої у ближньому полі зонда. Це дозволяє різко підняти просторову роздільну здатність і подолати дифракційну межу даних частот.

Локалізація НВЧ-сигналу в ближньому полі здійснюється за допомогою установок, конструкція та принцип роботи яких розглянуті нижче. Основними факторами, які визначають просторову роздільну здатність і точність вимірювань (відношення сигнал/шум), є: конструкція установки, властивості вивчаемого матеріалу, розмір вимірювального зонда, а також відстань від зонда до поверхні зразка. Аналіз отриманих даних проводиться за допомогою досить складного апарату математичної фізики, методів чисельного аналізу, а також використання експериментальних досліджень методів діагностики матеріалів у НВЧ діапазоні [4].

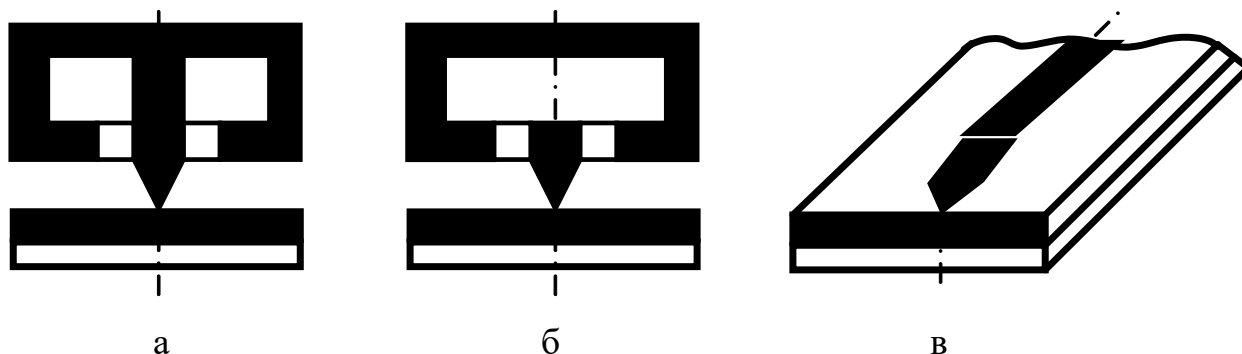
Близькопольова НВЧ-діагностика активно застосовується для вивчення поверхні діелектричних та напівпровідникових плівок та отримання карток розподілу діелектричної проникності, виявлення дрібних дефектів та неоднорідностей, аналізу нелінійних характеристик. Така діагностика широко застосовується у галузі біології та медицини. У додатку до завдань дослідження біологічних об'єктів НВЧ-хвилі вигідно відрізняються від хвиль оптичного та інфрачервоного діапазонів порівняно високою проникною здатністю (від кількох міліметрів до дециметрів). Тому стає можливим вивчення не лише поверхневих, а й глибинних шарів (з відповідною втратою просторового дозволу поверхнею). Ця

особливість застосовується для візуалізації структури біологічних об'єктів, аналізу та візуалізації пухлин.

Перспективними є НВЧ-дослідження в області напівпровідникової мікро-і наноелектроніки, тому що вони дозволяють отримувати багатопараметричну інформацію про поверхню та приповерхневі шари. Одним із застосувань НВЧ-діагностики є мікрохвильова мікроскопія в нанотехнологіях, яка на сьогоднішній день використовується, наприклад, для аналізу технології отримання високотемпературних надпровідників, візуалізації поверхневого розподілу провідності, локальних вимірювань нелінійного НВЧ-відгуку тощо.

Як приклад на рисунку 3.1 наведено типові схеми радіовимірювальних перетворювачів (РВП) мікрохвильових мікроскопів.

Основою таких мікросондів є коаксіальні лінії передач, які можуть бути виконані як в об'ємному, так і мікрополосковому варіанті, що визначається параметрами і властивостями досліджуваного об'єкта.



а – коаксіальний; б - з підвищеною добротністю; в – мікросмушковий

Рисунок 3.1 - Різновиди вимірювальних перетворювачів

Основними перевагами мікрохвильової мікроскопії ближнього поля, що розглядається, є: багатофункціональність, можливість додаткового впливу на зразок (постійним електричним полем, магнітним полем, додатковим НВЧ-полем, механічним і силовим полями та ін.) і, найголовніше, можливість детального дослідження властивостей поверхневих шарів у НВЧ -діапазоні.

Області застосування СММ:

- технологія високотемпературних надпровідників;
- контроль параметрів інтегральних мікроструктур;
- візуалізація поверхневого розподілу;
- біологія та медицина: візуалізація структури біологічних об'єктів, дослідження та візуалізація пухлин.

3.2 Типові схеми мікрохвильових мікроскопів

Фізичні основи СММ та підвищення просторового дозволу та частоти було представлено в концепції, а саме максимальній просторовій локалізації енергії зондуючого НВЧ-поля у нормальній до об'єкта електричної складової резонаторного коаксіального мікрозонда; у формуванні сигналів сканування з широким застосуванням модуляції та додаткової їх інформаційної обробки сучасними засобами програмного проектування РВП для СММ з поділом областей накопичення НВЧ-поля в резонаторі та випромінювання у мікрозонді. На рис. 3.2 наведено загальну схему мікрохвильового сканування мікроструктур, яка дозволила отримати просторовий дозвіл в 1 мкм.

При модернізації даної схеми шляхом зміни розмірів та форми кінця мікрозонду роздільна здатність може бути підвищена на порядок (тобто просторовий дозвіл мікрохвильових мікроскопів може дорівнювати 100 нм), а можливо і більше.

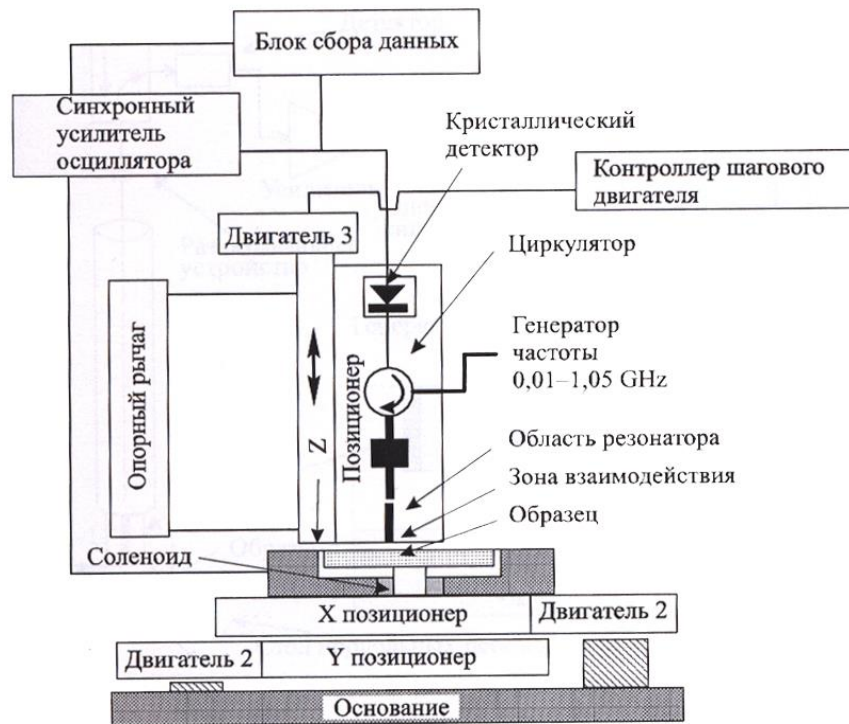


Рисунок 3.2 - Загальна схема мікрохвильового сканування мікроструктур

Мікрохвильові мікроскопи, що сканують, використовуються для дослідження різних матеріалів на мікрохвильових частотах і для вимірювання змін опору, наприклад, окремих мікроплощин провідників та напівпровідників. Найбільш типові схеми таких пристроїв наведено на рис. 3.3 та 3.4

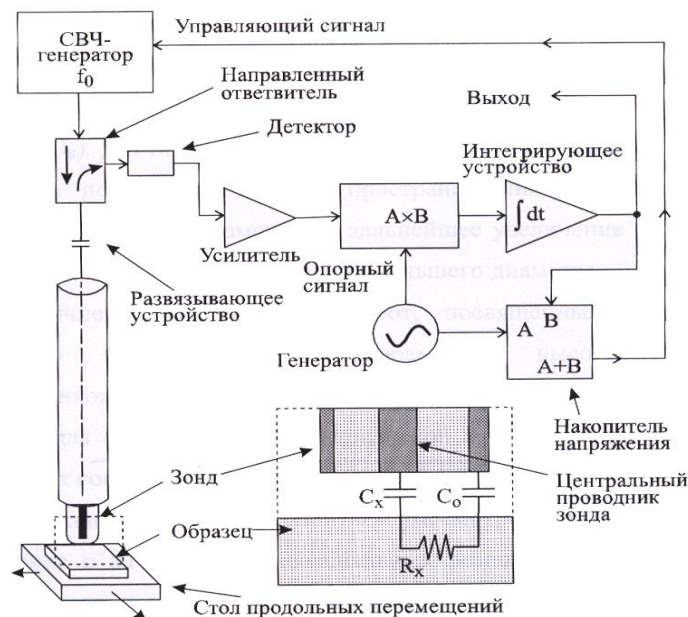


Рисунок 3.3 - Схема мікрохвильового мікроскопа з ВП на основі відрізка коаксіальної лінії

Мікрохвильовий сигнал від джерела входить у лінійний резонатор з коаксіальною лінією передачі, обмеженою з одного боку ємністю, що розв'язує, а з іншого – відкритим коаксіальним зондом. За рахунок багаторазового відбиття в коаксіальному резонаторі (з добротністю від 10^2 до 10^3) вдається значно зменшити шум і підвищити точність вимірювань, але при цьому виникає потреба в керуємої зміні частоти резонатора при вимірюванні на різних частотах.

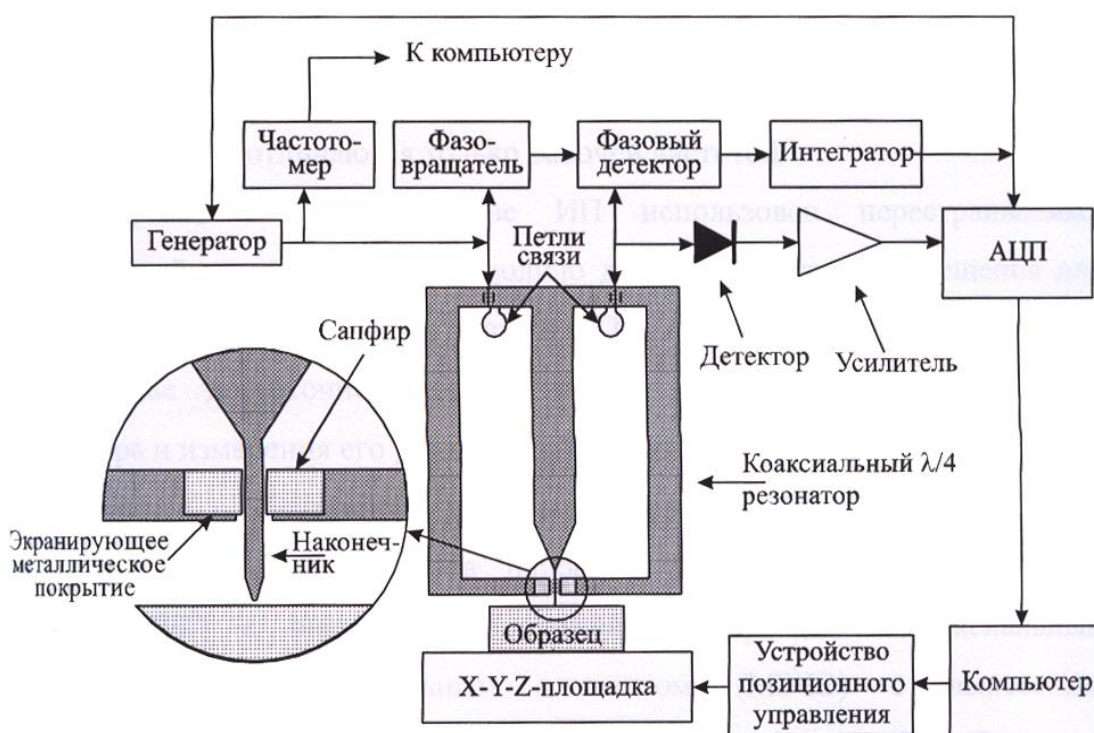


Рисунок 3.4 - Схема мікрохвильового мікроскопа з ВП на основі коаксіального резонатора

Щоб контролювати відстань між зразком і зондом, встановлюється залежність відбитого сигналу від відстані до зразка. Прив'язка системи до зразка переважно ємнісна. Якщо зразок металевий, він являє собою одну обкладку конденсатора, а інша формується центральним провідником коаксіального зонда. При зменшенні відстані між зондом та зразком ємність зростає, що призводить до падіння резонансної частоти коаксіального резонатора. В одному граничному випадку, коли зонд знаходиться далеко від зразка, лінія передачі з відкритим

кінцем має кінцевий імпеданс. У цьому випадку дана система є напівхвильовим резонатором з резонансною частотою. В іншому граничному випадку, коли зразок знаходиться в контакті із зондом, ланцюг замикається. Така схема має назву "контакт Корбіно". В даному випадку система є чвертьхвильовим резонатором і резонансна частота зменшується на

$$\Delta f_{\max} = \frac{1}{2} \frac{c}{\varepsilon_r^{1/2}} \frac{L}{L}, \quad (3.1)$$

де L - довжина коаксіального резонатора;

ε_r - відносна діелектрична постійна коаксіального кабелю.

Для типових відстаней між зондом і зразком зміщення частоти досягає значень між 0 та Δf .

Просторова роздільна здатність мікроскопа не залежить від частоти вимірювання, і система може працювати в широкому інтервалі частот. Це означає, що карту поверхневого розподілу властивостей матеріалу можна отримувати точно на тій частоті, на якій використовується матеріал. Наприклад, розглянемо мікроскоп із довжиною коаксіального резонатора $L = 2$ м. У цьому випадку частота основної (фундаментальної) моди становить приблизно 50 МГц, і можна отримати обертони, кратні 50 МГц, доступні для отримання зображення. Верхня межа частоти мікроскопа задається відповідно до робочої ширини смуги електроніки. Насправді мікрохвильовий джерело має верхню межу частоти 50 ГГц. Однак мікрохвильова спрямована котушка (сполучна муфта), детектор і коаксіальний кабель також можуть обмежувати ширину частотної смуги мікроскопа. Тим не менш, можна сконструювати мікроскоп, який має майже безперервне зображення за трьома десятками частот від 50 МГц до 50 ГГц.

Для аналізу надпровідних керамічних зразків необхідні кількісні безпосередні та неруйнівні методи дослідження характеристик тонких плівок. При цьому метод повинен забезпечувати високий просторовий дозвіл та бути високошвидкісним. Бажано також, щоб установка для аналізу мала просту конструкцію, складалася з комерційно доступних компонентів та забезпечувала

безпосередню інтерпретацію зображення. Всім вищезгаданим вимогам відповідає СММ.

Неруйнівний спосіб отримання зображень мікрохвильового поверхневого опору продемонстрували з використанням різних систем резонансних зондів. Найкращі результати зображення дисипації в зразку отримані при вимірюваннях добротності Q . Для визначення взаємозв'язку між Q мікроскопа і поверхневим опором зразка була використана алюмінієва плівка змінної товщини на скляній підкладці. Перетин тонкої плівки клиноподібний, тому можна порівняти зміну поверхневого опору з параметрами сканування. Використовуючи зонд з центральним провідником діаметром 500 мкм і вибираючи резонансну частоту 7,5 ГГц, можна отримати необхідні дані про зміщення частоти та зміну добротності Q , що дозволяє побудувати топографію розподілу поверхневого опору тонкої плівки на сапфіровій підкладці.

Було вирішено обрати чвертьхвильові коаксіальні резонаторні вимірювальні перетворювачі (РВП) через коаксіальну вимірювальну апертуру (КВА) які сполучаються з навколишнім простором. При цьому вони також забезпечують достатню точність вимірювань. Крім того можливе теоретичне градуювання сенсорів на основі РВП з КВА, оцінка їх параметрів. Вони мають можливість локальної концентрації поля в заданому обсязі зразка, широким частотним діапазоном. Це, зокрема, сприяє зменшенню стресового навантаження пацієнтів при заборі їх клінічних проб для досліджень. Такі дослідження застосовуються, наприклад, для оцінки роботи системи регуляції еритроцитів крові по функціональної активності їх мембранно-рецепторного комплексу.

3.3 Схеми РВП з КВА

Геометричні схеми деяких варіантів виконання КВА та розміщення кювети зі зразком (Δz_2 , ϵ_2) представлені на рис. 3.5, а-г. Показано зразок (шар Δz_2). Вплив зазорів і кювети для розміщення проби враховується, якщо це треба, при подальшому вдосконаленні моделі.

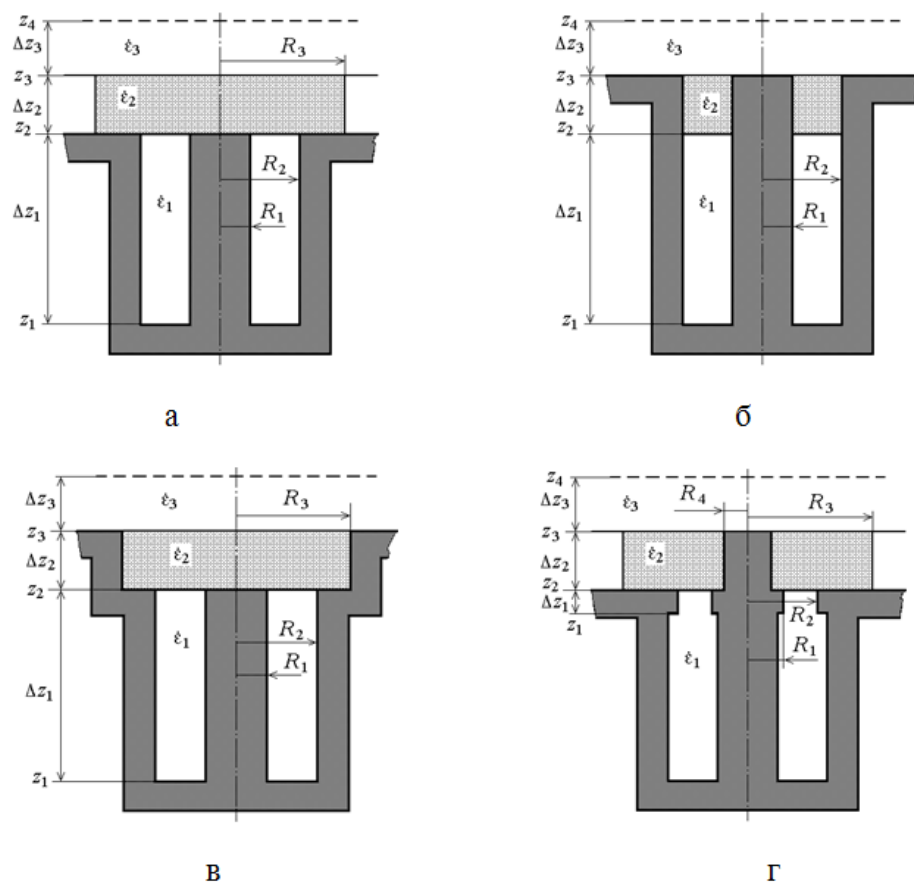


Рисунок 3.5 - Приклади геометричних схем РВП з КВА та варіанти розміщення кювети з біоматеріалом в робочу область

У всіх випадках матеріал, який досліджується, розташований в пучності електричного поля, тому вплив його діелектричних властивостей на вихідні сигнали РВП буде максимальним. З представлених схем можна бачити, що є достатня різноманітність варіантів, які будуть відрізнятися чутливістю, робочим діапазоном частот, діапазоном вимірювання резонансної частоти (f) і добротності (Q), точністю, різним внеском різних ділянок зразка в результат вимірювань та іншими параметрами [5].

Тут і далі розглядаються тільки КВА, що утворені круглими циліндрами [6 - 7]. Вони зручні як з точки зору технології виготовлення, так і створення математичної моделі.

Суттєвою перевагою НВЧ датчиків є принципова можливість проведення їх строгого математичного моделювання. При цьому можливо охопити широкий діапазон умов і задач. Принципова можливість аналітичного опису дуже складних конструкцій НВЧ забезпечується високим ступенем відповідності математичних виразів параметрам реальних конструкцій, якщо їх межі відповідають координатам геометричних систем. Це значно спрощує процес розробки, що особливо важливо при конструюванні пристроїв, що призначені для випуску порівняно дрібними серіями, при яких ціна проектування вносить суттєвий внесок в загальну вартість готових виробів. Однак створення строгої математичної моделі, особливо на основі аналітичних уявлень дуже складний процес, а результуючі вирази виходять вкрай громіздкими, що суттєво ускладнює їх використання для створення відповідних алгоритмів і програм. Тому актуальними задачами, що стоять перед дослідниками, є пошук шляхів вдосконалення програм і розробки алгоритмів, що забезпечують спрощення та уточнення розрахунків для конкретних груп НВЧ пристроїв.

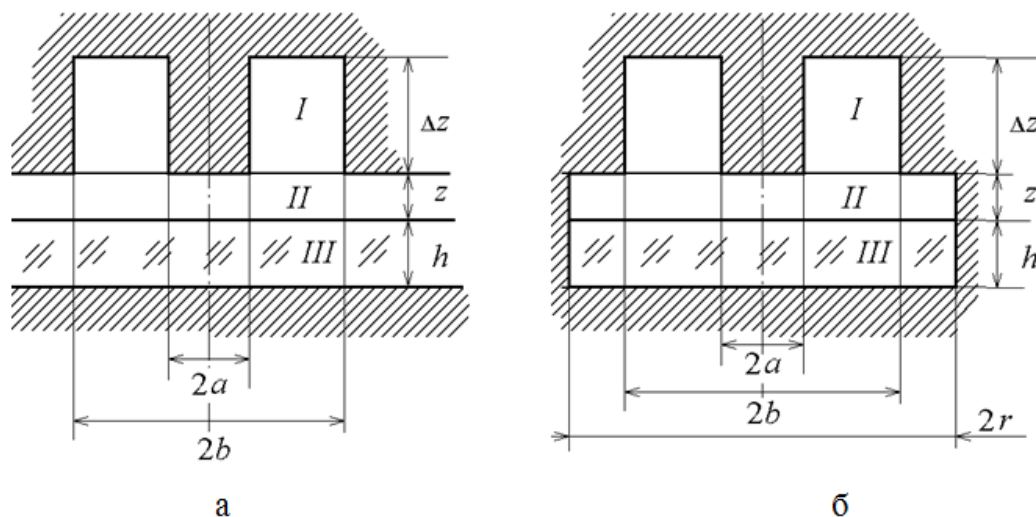
Хвильова теорія коаксіальних РВП основана на використанні тензорних функцій Гріна та рівнянь Максвелла для круглих циліндричних областей. На даний час вона достатньо добре розвинена [8 - 9]. При регулярних геометричних формах часткових областей, що складають конструкцію резонатора, для такого РВП можна побудувати достатньо точну математичну модель.

Альтернативне чисельне інтегрування за допомогою математичних пакетів, що засновані на методі кінцевих елементів, на сучасних комп'ютерах вимагає значних витрат машинного часу. Аналітичні моделі, в свою чергу, дозволяють вже на етапі отримання математичних співвідношень визначити взаємозв'язки і величину вкладу тих чи інших факторів. Але для РВП аналітична модель може бути громіздкою, що також вимагає значного часу для розрахунку. Тому отримання кінцевого результату навіть при спрощенні умов задачі стає складним. Це практично виключає проведення теоретичного градування. Тому визначення оптимальних шляхів створення методики теоретичного градування включає

детальний аналіз усіх етапів побудови аналітичної моделі з урахуванням відповідних даних, отриманих експериментально.

Рішення задачі теоретичного градування РВП з КВА вимагає обліку і ефективного пригнічення впливу факторів різної природи, що можуть заважати.

Незалежно від конструкції самого РВП (рис.3.6), зовнішні елементи, що забезпечують фіксацію біоматеріалу в області КВА, також беруть участь у формуванні розподілів ЕМП в робочій області. Принциповий інтерес представляють металеві конструкції, які можуть повністю або частково екранувати поле КВА. За цією ознакою структури РВП з КВА можна розділити на відкриті і закриті. Вони схематично представлені на рис.3.6 а, б.



а) відкритого типу, б) закритого типу

Рисунок 3.6 - Конструкції електродинамічної системи чвертьхвильовий резонатор-зразок

Тут I – область резонатора (може бути заповнена діелектриком з ϵ_a^I), II – повітряний зазор (не торкається до зразка, може бути відсутнім), III – досліджуваний зразок з комплексною діелектричною проникністю $\tilde{\epsilon}^{\text{III}} = \epsilon^{\text{III}} \epsilon_0 (1 - i \text{tg } \delta^{\text{III}})$, за зразком розташований екран. Для аналізу першого випадку (рис.3, а) можна скористатися наближенням заданого поля (в зарубіжних джерелах: Given Field Method – GFM). Зміни еквівалентної ємності КВА

перераховувалися в зміни добротності і резонансної частоти. Тут і далі використовується найпростіша методика GFM з розташуванням площині заданого поля в площині апертури. Цього достатньо для порівнянь на якісному рівні властивостей закритих і відкритих конструкцій датчиків, а її результати покажуть необхідність розвитку методики теоретичного градування.

Для аналізу другого випадку (рис.3.6, б) використовується чисельна модель і програмний пакет FEMLAB-6.0. Чисельне рішення отримано методом кінцевих елементів (Finite Elements Method – FEM) [10], заданого на власні значення для рівнянь Гельмгольца в вісесиметричній області, границі якої вважалися ідеально провідними. Граничний радіус в цій моделі вибирався з умови відсутності паразитних типів коливань в зоні де розміщується зразок. За отриманими власними значеннями відповідно визначаються резонансна частота і добротність системи, зміна яких, в свою чергу, є первинними інформаційними параметрами пов'язаними з характеристиками об'єктів і середовищ, що діагностуються.

4 ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАСОБІВ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ДІАГНОСТИКИ МАЛОРОЗМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ

4.1 Засоби контролю параметрів біоречовин

В основу дослідження покладено той факт, що вода в найбільшій мірі впливає на діелектричну проникливість середовищ, у яких вона перебуває. Дипольний момент молекул води значний – $1,86D$. Зі складними молекулами біологічної речовини вода може мати різноманітні за своєю природою зв'язки. А саме, диполь-дипольне тяжіння, дисперсійне тяжіння, індуковане тяжіння. Вода може утримуватися іонами у вигляді гідратної оболонки, гідрофільними колоїдами та білками тканин у вигляді води набухання. У склад біологічних макромолекул, білків входить внутрішньомолекулярна (конституційна) вода. Це впливає як на дійсну так і на уявлену частину діелектричної проникності біологічних об'єктів.

Тому існує значний комплекс фізичних факторів, які пов'язані з отриманням інформації про стан біооб'єктів на підставі визначення кількості та розподілу вільної і вбудованої води у макромолекули біоречовин з використанням НВЧ сенсорів відносно біооб'єктів *in vivo* та *in vitro*, а також у період зовнішнього впливу на них, та відповідних до цих сенсорів вторинних перетворювачів.

Основні ідеї ґрунтуються на фундаментальних принципах радіофізичних методів отримання значень дійсної та уявної частини діелектричної проникності у діапазоні частот релаксації макромолекул біосередовищ зі зв'язаною та вільною водою. Частота релаксації вільної води (при масі молекули 18 одиниць атомної ваги) лежить близько до 10 ГГц [11]. Маса макромолекул біоречовини у десятки, сотні і тисячі разів більша. Тому пов'язана з частотою релаксації частота зміни тангенса кута втрат лежить значно нижче. Зміна втрат, враховуючи малу частку зв'язаної води, також незначна. Це обумовлює потребу у створенні чутливих

широкодіапазонних сенсорів. Методики розв'язання електродинамічних задач визначення параметрів відкритих НВЧ сенсорів апертурного типу ґрунтуються на наступних методах математичної фізики: метод функцій Гріна, метод часткових областей, метод розкладу полів по повним базисам ортогональних функцій, метод розділення змінних, метод алгебраїзації інтегральних рівнянь. Також це обумовлює потребу створення відповідних вторинних перетворювачів інформаційних сигналів указаних НВЧ сенсорів [12].

Найбільш інформативні методи визначення співвідношення зв'язаної і вільної води передбачають проведення вимірювань в частотному діапазоні релаксації молекул води (10 ГГц). Однак для проведення НВЧ вимірювань необхідно строго витримати розміри зразка, його положення в вимірювальному пристрої.

Для вимірювань в цьому частотному діапазоні використовуються хвильові методи, резонаторні методи і методи вільного простору, які в певній мірі було розглянуто. Методи вільного простору застосовуються для вимірювання параметрів об'єктів великих розмірів (див. розділ 2). Хвилеводні методи також вимагають зразків, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі. Резонаторні методи найбільш чутливі до зміни параметрів зразків малих розмірів при збереженні необхідної точності вимірювань. Об'ємні резонатори забезпечують високу точність, але вимагають внутрішнього розміщення зразка, що незручно для поточних вимірювань. Було вирішено обрати чвертьхвильові коаксіальні резонаторні вимірювальні перетворювачі (РВП) через коаксіальну вимірювальну апертуру (КВА) які сполучаються з навколишнім простором. При цьому вони також забезпечують достатню точність вимірювань. Крім того можливе теоретичне градуювання сенсорів на основі РВП з КВА, оцінка їх параметрів. Вони мають можливість локальної концентрації поля в заданому обсязі зразка, широким частотним діапазоном. Це, зокрема, сприяє зменшенню стресового навантаження пацієнтів при заборі їх клінічних проб для досліджень. Такі дослідження застосовуються, наприклад, для оцінки роботи системи регуляції

еритроцитів крові по функціональній активності їх мембранно-рецепторного комплексу.

Розміри КВА можна зменшувати до мікронного рівня. Зовнішнє розміщення зразка найзручніше при проведенні поточних досліджень. Зміною індуктивної частини резонатора можна змінювати робочу частоту в широкому діапазоні.

Вологовміст в біооб'єктах характеризується діапазоном змін ϵ в межах від 3 до 10 і $\text{tg}\delta$ в межах від 0,01 до 0,4. Таким чином, чисельне моделювання роботи РВП доцільно проводити в даному діапазоні. Вихідні параметри РВП з КВА виберемо такі ж, як у попередньому розділі. Детальні розрахунки показали, що обрані співвідношення розмірів близькі до тих, які забезпечують максимальну чутливість даної конструкції РВП з КВА.

Подальше уточнення розмірів РВП стосується визначення оптимальних радіусів його частин, то ж відноситься і до КВА. Для цього також як і в попередньому розділі буде використано чисельне рішення рівнянь Максвелла з урахуванням втрат в стінках і на випромінювання, і рішення рівнянь Гельмгольца, що враховують тільки втрати в стінках.

Спочатку розглянемо вплив КВА на добротність системи. Можливу зміну радіуса апертури R_0/R_2 .

Вибір оптимального розміру вимірювальної апертури проводився відповідно наступних принципів. Відомо, що для проведення достовірних вимірювань добротність навантаженого резонатора повинна бути якомога більше. Однак, для зменшення необхідних розмірів досліджуваного зразка, і, відповідно, зменшення об'єму біологічних проб пацієнта, найбільш важливо домогтися високого значення відношення $\Delta Q/Q$ РВП при вимірюванні $\text{tg}\delta$. При цьому необхідно зберегти високе значення відношення $\Delta f/f$ при зміні ϵ . Вище показано, що ці суперечливі вимоги можна мірою задовольнити, якщо вибрати $R_1/R_2 = 0,28$, а величина h/H має бути мінімальною. Тому подальше моделювання буде проводитися для КВА з $R_0/R_2 = 0,3$, $h/H = 0,01$.

Залежності добротності і зміни добротності від електрофізичних параметрів зразка наведені на рис. 4.3 а, б.

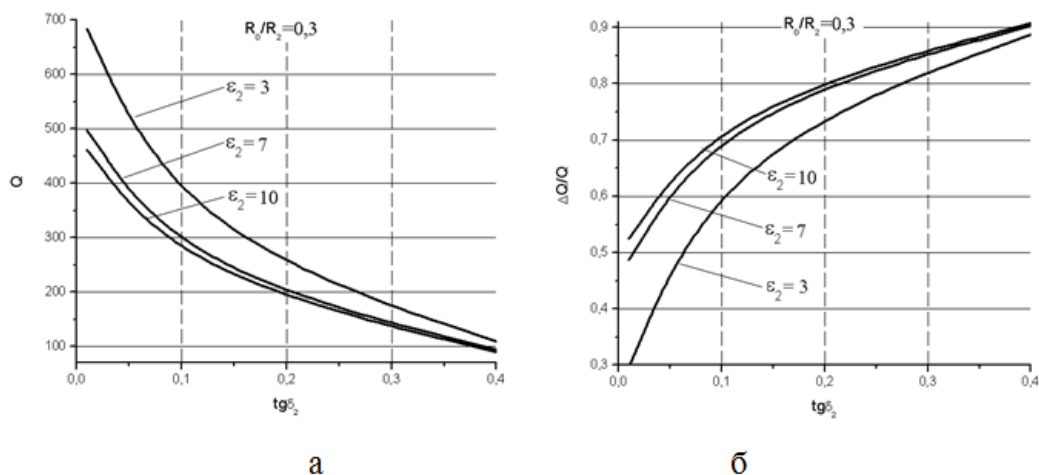


Рисунок 4.1 - Залежність Q (а) і $\Delta Q/Q$ (б) від параметрів зразка

Представлені на рис. 4.1 залежності показують, що при збільшенні значень відносної діелектричної проникності зразка збільшується добротність системи. Це є наслідком екранування відкритого кінця апертури діелектричним матеріалом. Проте, збільшення втрат, незважаючи на зменшення глибини проникнення поля в зразок, призводить до суттєвого зменшення добротності і відповідно чутливості датчика. Але співвідношення приросту параметрів до їх первісної величині як і раніше залишається високим, що відкриває можливість підтримки інформативних властивостей сенсора на високому рівні.

На рис. 4.2 представлені залежності резонансної частоти і зміни резонансної частоти РВП КВА від електрофізичних параметрів зразка.

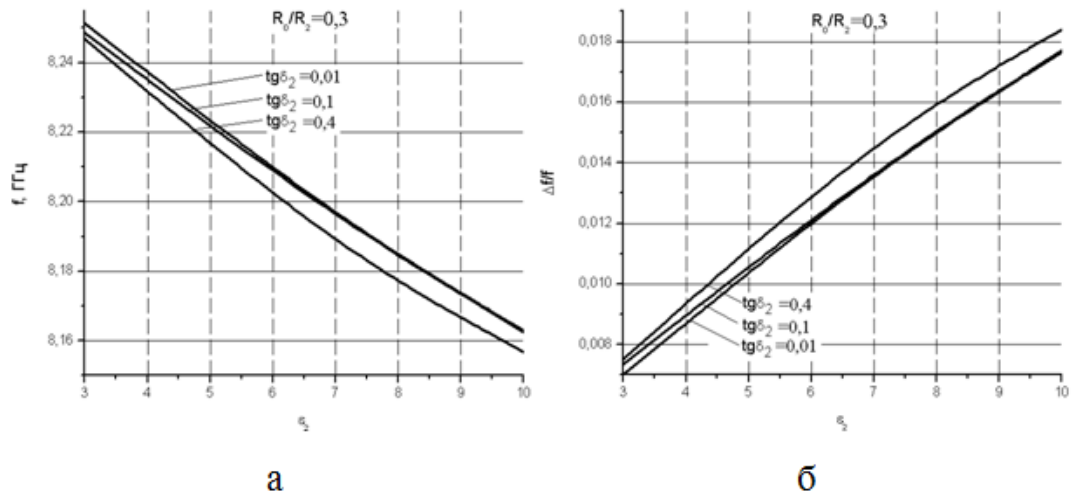


Рисунок 4.2 - Залежність f (а) й $\Delta f / f$ (б) від параметрів зразка

З цих графіків видно, що основний вплив на резонансну частоту РВП надають зміни ε_2 . Однак, збільшення $\text{tg}\delta_2$ призводить до зростання ємності, на яку навантажений РВП. Це викликає, в свою чергу, невелике зменшення резонансної частоти.

Повітряний зазор між апертурою і досліджуваним зразком змінює інформаційні параметри РВП КВА. На рис. 4.3 наведено залежності Q і $\Delta Q/Q$ РВП від величини зазору і параметрів зразка.

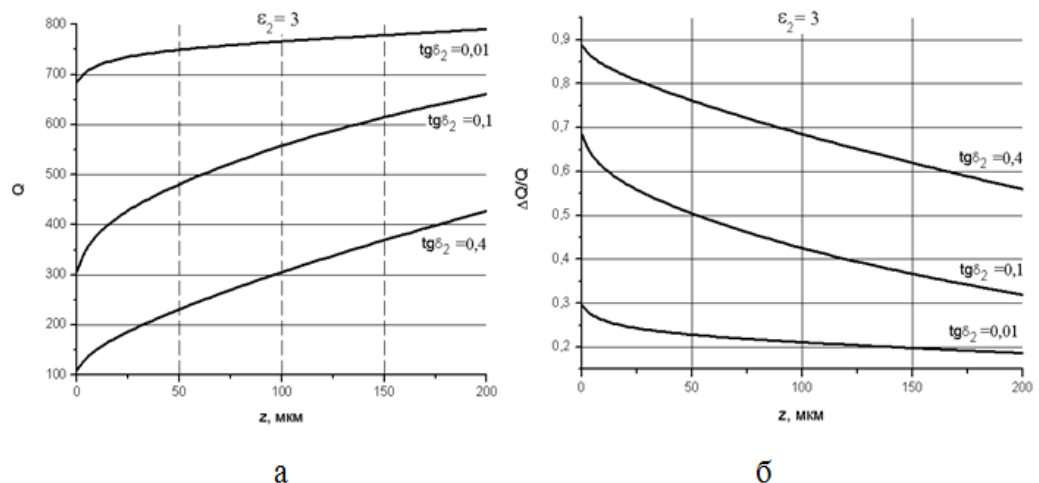


Рисунок 4.3 - Залежність Q (а) і $\Delta Q/Q$ (б) від величини зазору і параметрів зразка

Як видно з цих графіків, добротність в основному визначається тангенсом кута відносних діелектричних втрат, що свідчить про значне проникнення електромагнітного поля в зразок.

На рис. 4.4 наведені залежності f і $\Delta f / f$ від величини зазору і параметрів зразка.

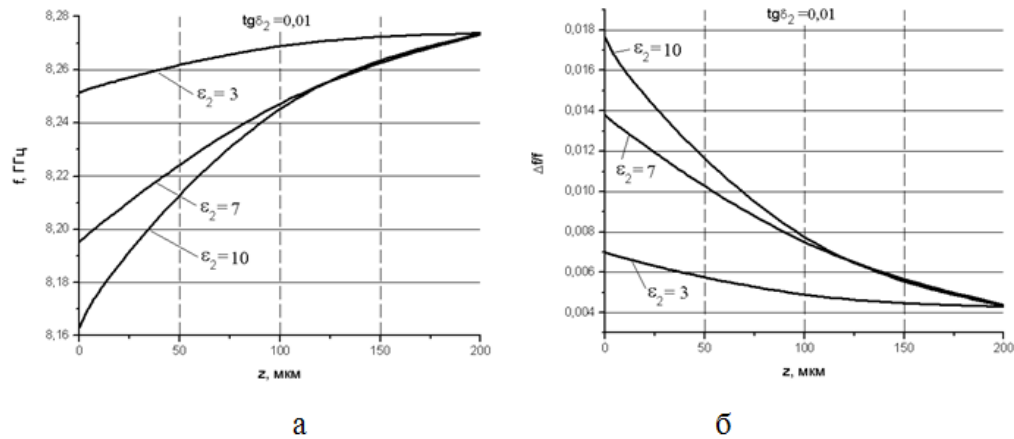


Рисунок 4.4 - Залежності f (а) і $\Delta f / f$ (б) від величини зазору і параметрів зразка

Ці графіки показують, що резонансна частота визначається, в основному, відносною діелектричною проникністю зразка. Причому вплив повітряного зазору практично однаковий на всьому діапазоні зміни ϵ_2 .

При порівнянні графіків на рис. 4.3 і 4.4 видно їх взаємну кореляцію. Це означає, що існує деяка функція, яка залежить від добротності і резонансної частоти, і в той же час, інваріантна щодо величини зазору z . Емпірично було знайдено такий вираз:

$$N(Q, f) = \frac{\Delta Q / Q}{\Delta f / f}. \quad (4.1)$$

Залежність даної функції від величини зазору і параметрів зразка наведена на рис. 4.5.

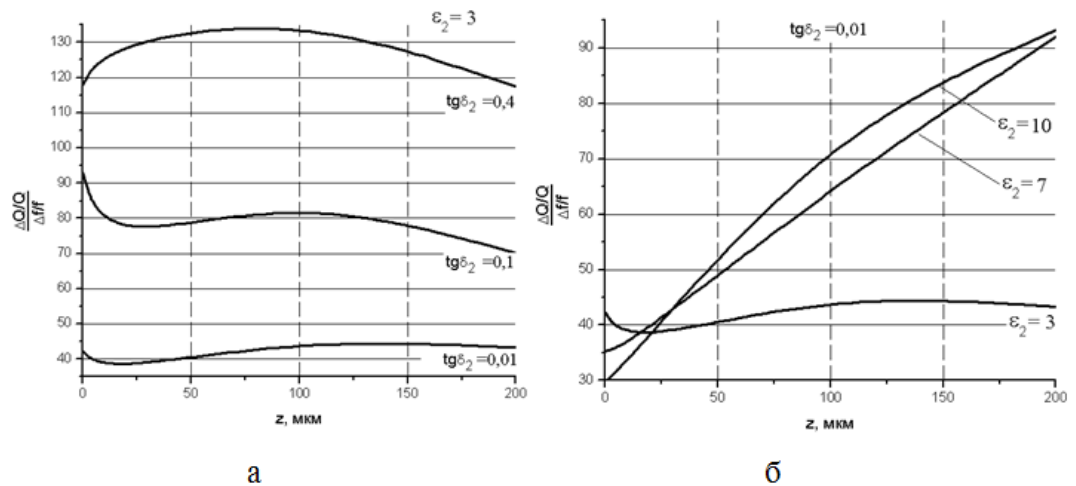


Рисунок 4.5 - Залежність функції $N(Q, f)$ від величини зазору і параметрів зразка

З порівняння графіків на рис. 4.3, рис. 4.4 і рис. 4.5 видно, що функція $N(Q, F)$ практично інваріантна для малих зазорів і ϵ , а відносно величини зазору зміни малі в порівнянні з залежністю від $\text{tg} \delta$. Значення функції визначається виключно параметрами зразка. Таким чином, градуювальні криві, що аналогічні кривим на рис. 4.5, дозволяють зіставляти отримані в ході дослідження зразка значення добротності і частоти РВП з електрофізичними параметрами біооб'єкту без урахування паразитного впливу зазору.

Отримані залежності дозволяють впевнено стверджувати, що інформаційні параметри РВП КВА можуть однозначно відображати електрофізичні параметри біооб'єктів і дозволять адекватно судити про їх вологовміст.

4.2 Вплив форми зонду

На рис. 4.6 схематично зображено конструктив конусного коаксіального РВП і його апертурний вузол зі схематичним поданням об'єкта. При цьому виділені наступні особливості:

- об'єкт, хоча й має істотно більші в порівнянні з перетином апертури розміри, обмежений, особливо по товщині;
- об'єкт може бути багат шаровим;
- фланець резонатора обмежений за розміром;
- між об'єктом і фланцем РВП можливий повітряний зазор;
- вістря зонда R_{1t} може мати різну форму (плоску, сферичну, еліптичну);
- вістря, яким в апертурі закінчується центральний конусний провідник коаксіалу, може виступати за межі фланця на деяку величину t ;
- діаметр вістря може бути порівняний й навіть менше товщини скін-шару в металі на робочій частоті.

У загальному виді аналітичне й навіть чисельно-аналітичне рішення електродинамічної задачі про власні значення комплексних частот такої системи зі НВЧ втратами вкрай складне [13].

При спрощенні геометрії об'єкта до плоскошарового виду, умові напівнескінченності фланця, плоскої геометрії апертури (без виступу вістря і його площинності) можливо чисельно-аналітичне рішення задачі про внесення об'єктом у резонатор ємності. Однак при цьому суттєво ускладнюється проблема завдання поля на отворі.

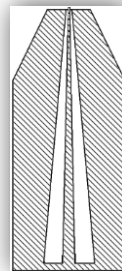


Рисунок 4.6 - Схематичне зображення конусного коаксіального РВП

Тому в роботі чисельне рішення цієї задачі й моделювання РВП здійснювалося з використанням методу кінцевих елементів. В основному цим прямим чисельним методом вирішується і задача на власні значення операторів.

На першому етапі для з'ясування основних особливостей впливу геометрії апертурного вузла на функціонування РВП та величину його сигналів

вимірювальної інформації об'єкт вважався напівнескінченим. Надалі в процесі уточнення можливостей ближньопольової мікрохвильової діагностики (БМД) на основі такого резонаторного зонда структура й геометрія об'єкта можуть бути уточнені [14].

У першу чергу розглядається залежність розподілу повного електричного поля і його компонент від геометрії вістря, до якої відноситься величина перетину вістря, представлена радіусом R_{1t} , і його форма. Умовно розділяються передбачувані різновиди вістря на плоску (рис. 4.7,а), еліпсоїдальну (рис. 4.7,б) та сферичну (рис. 4.7,в). Відповідні їм епюри повного поля наведені на рис.4.8, з яких видно різницю в розподілі поля в матеріалі об'єкта ($\text{tg}\delta = 0.1$, $\varepsilon = 12$) під вістрям зонда, радіус якого складає 10 мкм.

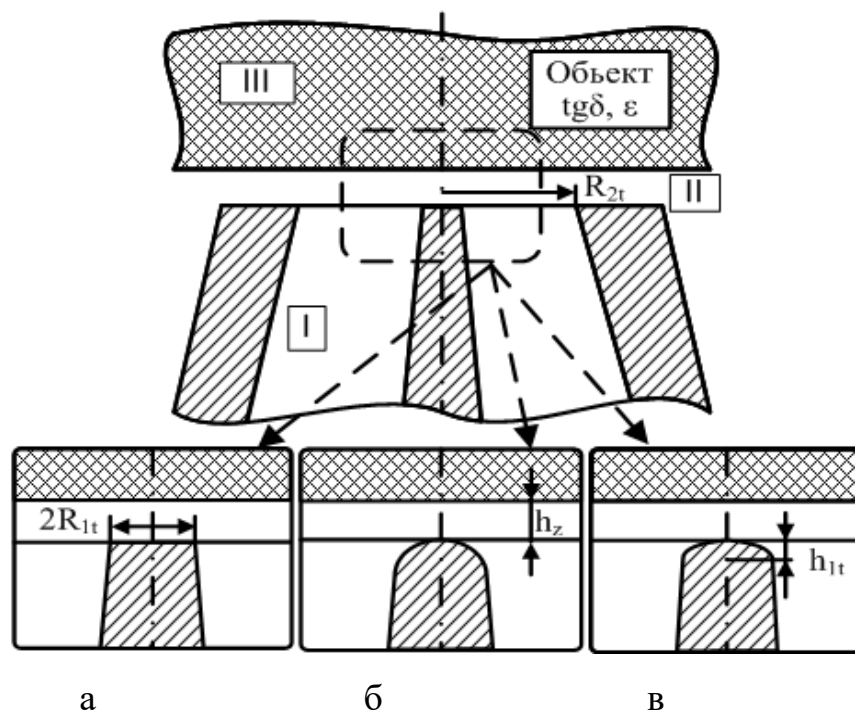
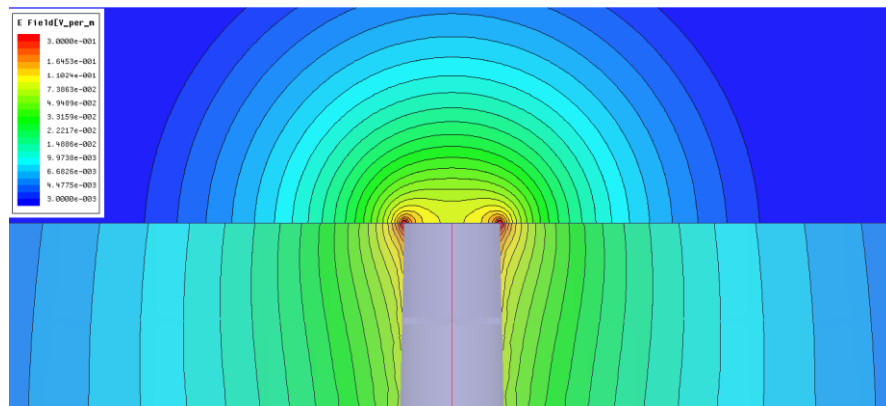


Рисунок 4.7 - Схематичне зображення геометрії вістря РВП КВА

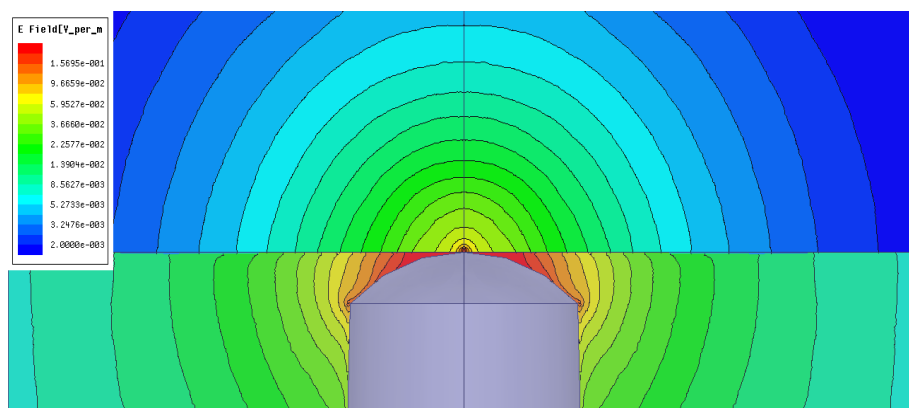
У попередніх численних розробках в області мікрохвильової діагностики високотемпературних надпровідників і інших матеріалів експериментально було встановлено суттєвий вплив форми вістря на просторову роздільну здатність (ПРЗ) і контрастність зображення [15]. У зв'язку з відсутністю чіткої фізичної з'ясовності встановленого при цьому часткового зняття проблеми одночасного

збільшення ПРЗ без істотних втрат чутливості залишається пошук теоретичного підтвердження й трактування цих результатів.

Із цією метою було чисельно досліджено в порівнянні розподіл повного поля зонда із плоскою й сферичною формами вістря для різних значень R_{1t} .



а



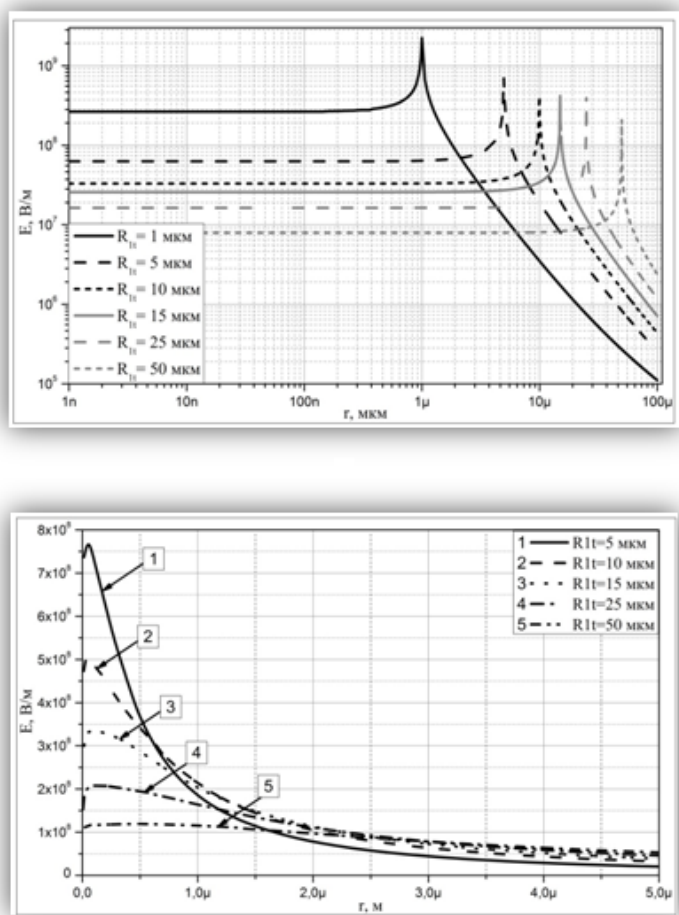
б

в

Рисунок 4.8 Епюри повного електричного поля в апертурі РВП в залежності від форми вістря ($R_{1t} = 10$ мкм)

Результати цих досліджень [16], наведені на рис. 4.8, і переконливо свідчать про суттєве «фокусування» поля при сферичній формі вістря під центральною

його частиною (рис. 4.8,б) на відміну від локалізації під периферією при плоскому вістрі (рис. 4.8,а). Відповідно до цих даних поле втрачає «трубчатість», а розподіл його набуває квазігауссовий характер.

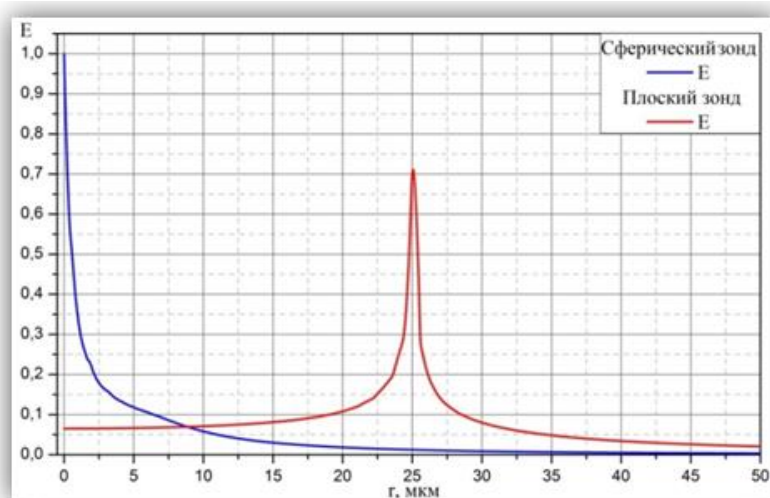


а,б

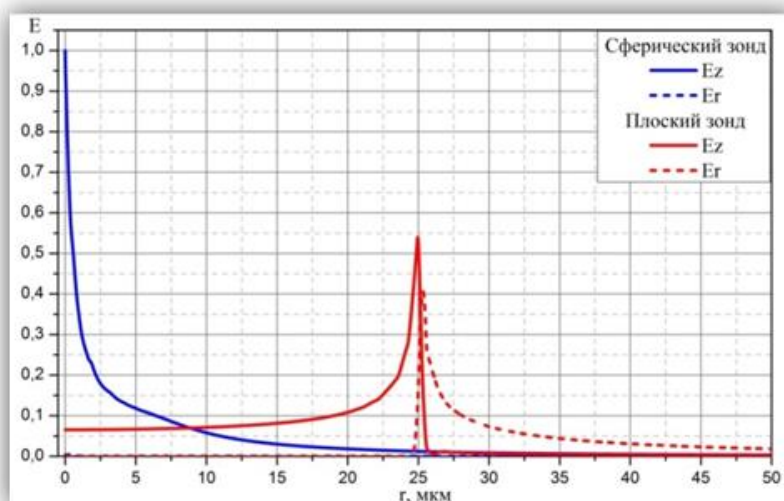
Рисунок 4.9 Залежності розподілу повного поля в об'єкті для різних значень радіуса плоского (а) та сферичного вістря (б) уздовж радіуса зонда (об'єкт: $\epsilon=12$; $\text{tg}\delta=1$)

Більш детально в кількісному відношенні залежність розподілу повного поля і його компонент представлена на рис. 4.10 та 4.11. Зокрема, розподіл по радіусу на поверхні об'єкта переконливо підтверджує «трубчастий» характер поля й обох його компонент (рис. 4.10) для плоского вістря, а також суттєву його

локалізацію в E_z компоненті під сферичним вістрям. Ці розрахунки проводились для об'єкту з параметрами $\text{tg}\delta = 0.1$, $\varepsilon = 12$.

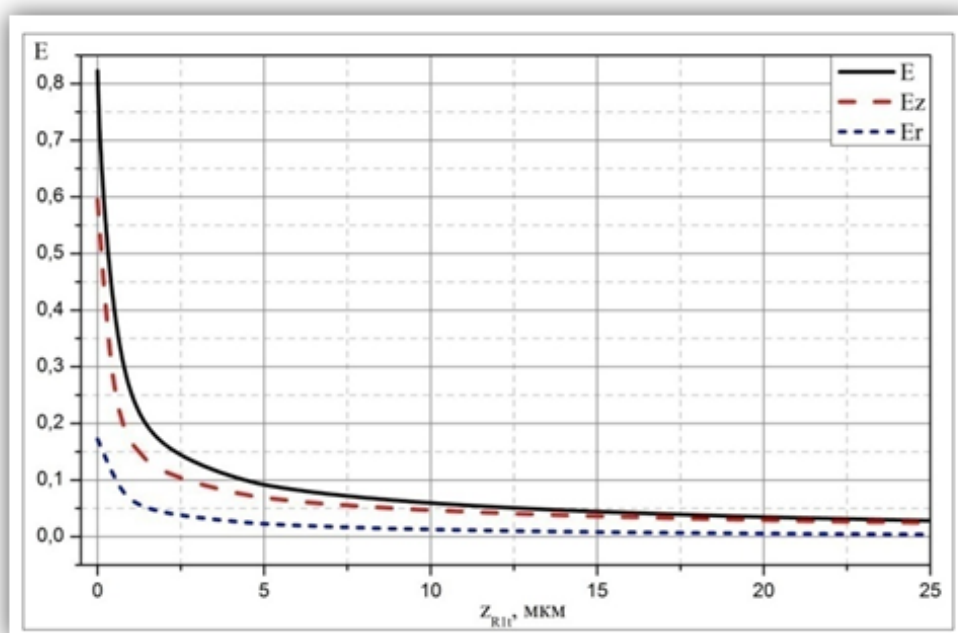


а

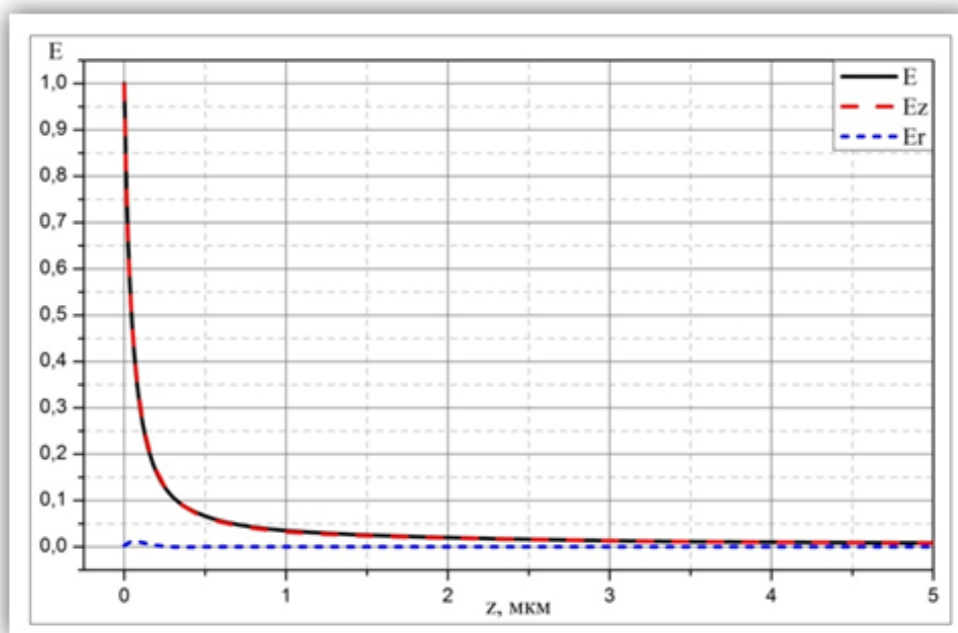


б

Рисунок 4.10 Розподіл повного поля E (а) та його компонент E_r і E_z (б) по радіусу об'єкта для плоского та сферичного вістря з $R_{1t} = 25\text{мкм}$



а



б

Рисунок 4.11 Розподіл повного поля E та його компонент E_r і E_z вздовж осі об'єкта для плоского (а) та сферичного вістря (б) з $R_{lt} = 25\text{мкм}$

ВИСНОВКИ

В основу досліджень, результати яких наведені у роботі, покладено той факт, що вода в найбільшій мірі впливає на діелектричну проникливість середовищ, у яких вона перебуває. Зі складними молекулами біологічної речовини вода може мати різноманітні за своєю природою зв'язки. А саме, диполь-дипольне тяжіння, дисперсійне тяжіння індуковане тяжіння. Вода може утримуватися іонами у вигляді гідратної оболонки, гідрофільними колоїдами і білками тканин у вигляді води набухання. У склад біологічних макромолекул, білків входить внутрішньомолекулярна (конституційна) вода. Це впливає як на дійсну так і на уявлену частину діелектричної проникності біологічних об'єктів.

Тому існує значний комплекс фізичних факторів, які пов'язані з отриманням інформації про стан біооб'єктів на підставі визначення кількості та розподілу вільної і вбудованої води у макромолекули біоречовин з використанням НВЧ сенсорів відносно біооб'єктів *in vivo* та *in vitro*, а також у період зовнішнього впливу на них, та відповідних до цих сенсорів вторинних перетворювачів.

Аналіз теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язаних з існуючими методами неруйнівного контролю, проведений у роботі, дає можливість стверджувати, що найбільш ефективним і зручним методом діагностики малорозмірних біологічних зразків буде мікрохвильова мікроскопія із застосуванням резонаторного сенсора з коаксіальним зондом. Розміри коаксіального зонда можуть бути адаптовані до розмірів об'єктів, які досліджуються. Типові розміри можуть бути від одиниць мм до одиниць мкм.

Однак, треба мати на увазі, що кожна конкретна конструкція зонду, форма і розміри об'єктів потребують попереднього чисельного моделювання із застосуванням відповідних методів для визначення зв'язків первинних інформаційних параметрів з електрофізичними характеристиками біологічних об'єктів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. І.М. Бондаренко, Ю.О. Гордієнко, О.Ю. Панченко, *Напрями та проблеми мікрохвильових досліджень воловмісних матеріалів та структур.* – Харків, Україна: ISBN, 2019. 322с.
2. В.Л. Миронов, *Основы сканирующей зондовой микроскопии.* – Российская академия наук, Институт физики микроструктур, Нижний Новгород, Россия, 2004. 114с.
3. С.В. Мищенко, Н.А. Малков, *Проектирование радарных СВЧ приборов неразрушающего материала.* – ТГТУ, Тамбов, Россия, 2003. 128с.
4. А. В. Левченко, Ю. Е. Гордиенко “Теоретическое описание свойств резонаторных зондов коаксиального типа для СММ” *7-я Міжнар. наук.-техн. конф. (СЕМСТ-7),* Одеса, Україна, Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 12–13.
5. И.Н. Бондаренко, Н.А. Мамедова, А.Ю. Панченко, И.Н. Светличная, “Оценка осевой разрешающей способности СВЧ сенсора для исследований биологических объектов” *Радиоэлектроника и информатика.* Харків, Україна, 2018. № 4. С. 4–11.
6. І. М. Бондаренко. *Мікрохвильові резонаторні апертурні сенсори* – Харків, Україна: Видавець О.А. Мірошніченко, 2018. 137с.
7. И. Н. Щербань, Ю. Е. Гордиенко “СВЧ резонаторный сенсор для диагностики малоразмерных объектов различной консистенции” на *7-я Міжнар. наук.-техн. конф. (СЕМСТ-7),* Одеса, Україна, Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 43–44.
8. А.Ю. Панченко, Зайченко О.Б., Слипченко Н.И., “Аналитическая модель открытого коаксиального сенсора для контроля быстрых изменений в биологических жидкостях”, *Тези доповідей 8-ої Міжнародної науково-технічної конференції “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” (СЕМСТ-8),* Одеса, Україна: 2018 р. 38с.

9 А.Ю. Панченко, Н.И. Слипченко, А.Н. Бородкина “ Анализ структуры математической модели коаксиальных резонаторных СВЧ измерительных преобразователей” на *VIII Международной научной конференции «Функциональная база нанoeлектроники»*. Харьков. Украина: ХНУРЭ. 2015. С.110-112.

10. А.Ю. Панченко, Н.И. Слипченко, А.Н. Бородкина “ Анализ структуры математической модели коаксиальных резонаторных СВЧ измерительных преобразователей” на *VIII Международной научной конференции «Функциональная база нанoeлектроники»*. Харьков. Украина: ХНУРЭ. 2015. С.110-112.

11. T. Mitch Wallis , Pavel Kabos *Measurement Techniques for Radio Frequency Nanoelectronics*, USA Cambridge University Press, 2017.

12. Yu.Ye. Gordienko, Shcherban I.M. “Hybrid signals in the local microwave diagnostics of small objects”, in *Telecommunication and Radio Engineering*, USA 2019. Vol. 78, № 19. – P. 1747–1757.

13. I.N. Bondarenko, E.A. Gorbenko “Formation of powerful microwave pulses using resonator storage”, *Telecommunications and Radio Engineering*. Begell House, Inc., NY, USA. – 2018. – Vol. 77, N 15 – P.1311-1319.

14 .А.А. Трубочев, В.И. Юрченко, “КМЧ-микроскоп для биомедицинских исследований“ на *V Всеукр. наук-практ. конф. Радиотехника. Телекоммуникации. Антенны. Микроволновые устройства*, Харьков, Украина: 2015, с 232 – 235.

15.А.Ю. Панченко, Лю Чан, Слипченко Н.И.”Анализ распределений компонент электромагнитного поля для оценки разрешающей способности открытой измерительной коаксиальной апертуры“ на *IX Международной научной конференции «Функциональная база нанoeлектроники »*, Харьков-Одесса, Украина: 2017. С.91-94.

16 . Ch.Lu, A.Yu.Panchenko, M.I. Slipchenko “An integral equation for the field distribution within the aperture plane of the coaxial sensor” in *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2016. – No.75(7). –P. 587–594.