

Власник документу:  
Бевза Олег Миколайович

ID перевірки:  
1000774298

Дата перевірки:  
13.12.2019 23:30:14 GMT+0

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
14.12.2019 17:36:59 GMT+0

ID користувача:  
90740

Назва документу: 2019\_ Огуревич Ярослав\_Дослідження опорного генератора\_fch

ID файлу: 1000785139 Кількість сторінок: 21 Кількість слів: 10692 Кількість символів: 82717 Розмір файлу: 119.68 KB

## 6.78% Схожість

Найбільша схожість: 2.01% з джерело <http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/conferences/2018/2018-118-121.pdf>

6.64% Схожість з Інтернет джерелами 33 ..... Page 23

1.14% Текстові збіги по Бібліотеці акаунту 13 ..... Page 23

## 0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

## 0% Вилучень

Вилучений текст відсутній

## Підміна символів

Заміна символів 47

**Дослідження опорного генератора мікрохвильового синтезатора для пристрою перетворення частоти**

Огуревич Ярослав Володимирович

**Короткий зміст роботи:** В магістерській дисертації представлено огляд науково-технічної літератури по перетворювачам синтезаторів (характеристики, принципи побудови, різновиди). Об'єктом дослідження є програмовані швидкодіючі та високоточні перетворювачі синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль.

Метою роботи є теоретичне дослідження та аналіз хвильових акустичних процесів в багатошарових п'єзо-кристалічних структурах на основі математичного моделювання та вирішення хвильових рівнянь п'єзо-акустики методом кінцевої елементів, а також числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів (ТАЕР) на основі багатошарових тонко плівкових структур, враховуючи п'єзо шар з нітрату алюмінію  $AlN$ , працюючих в ГГц діапазоні частот.

Предметом дослідження акустичні хвилі різного типу, що поширюються в багатошарових тонко плівкових п'єзо-кристалічних структурах. Складність дослідження властивостей таких хвиль пов'язана з тим, що анізотропія властивостей кристала, а також безліч шарів в структурі не дозволяє провести аналіз параметрів таких акустичних хвиль в загальному вигляді. Потрібне залучення чисельних методів розрахунку. Таким чином, в даний момент завдання аналізу і чисельного моделювання хвильових процесів, що відбуваються в багатошарових тонко плівкових структурах, безсумнівно залишається актуальною в акусто-електроніці. Існують методи вдосконалення структури і обґрунтування параметрів синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль за критерієм мінімуму власних шумів і побудови їх на новій елементній базі на об'ємно-акустичних хвилях.

Найважливішими вимогами, які пред'являються до сучасних опорних генераторів є: максимальна стабільність НВЧ параметрів (амплітуди і фази) вихідного сигналу, висока стабільність НВЧ параметрів до зовнішнього кліматичного і механічного впливу при його експлуатації, швидке встановлення робочого режиму перетворювача, зниження масо – габаритних показників.

Завдання, що були вирішені у процесі складання магістерської дисертації:

- досліджено існуючу область розробки керованих синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль та проаналізовано їх на предмет можливості вдосконалення як систем в цілому, так і їх окремих частин;
- обґрунтовано та вдосконалено структуру опорного генератора;
- проведений числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів на основі багатошарової тонко плівкової структури, яка включає в себе п'єзо шар з нітриду алюмінію.

**АНОТАЦІЯ**

Об'єктом дослідження є опорний генератор мікрохвильового синтезатор частоти дециметрових довжин хвиль. Дослідження полягає у математичному розрахункові потенціалу і зміщення в кожній точці багатошарової структури опорного генератора та моделювання його еквівалентної схеми для підвищення продуктивності та розрахунків основних параметрів системи.

Предметом дослідження є акустичні хвилі різного типу, що поширюються в багатошарових тонко плівкових п'єзо-кристалічних структурах. Складність дослідження полягає в властивостях таких хвиль пов'язана з тим, що анізотропія властивостей кристала, а також безліч шарів в структурі опорного генератора не дозволяє провести аналіз параметрів таких акустичних хвиль в загальному вигляді.

Задачі, що були вирішені для досягнення мети, наступні:

- досліджена існуюча область розробки керованих синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль та проаналізувати їх на предмет можливості вдосконалення окремих частин системи, конкретно – опорного генератора;
- обґрунтування та вдосконалення структуру опорного генератора;

- числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів на основі багат шарової тонко плівкової структури, яка включає в себе п'єзо шар з нітриду алюмінію.

Виконання завдань вказує на можливість створення на основі багат шарової тонко плівкової структури, яка включає в себе п'єзо шар з нітриду алюмінію, опорного генератора з поліпшеними характеристиками. Можливі напрямки для подальших досліджень може включати в себе: експериментальні тести моделі, експериментальне дослідження впливу геометричної побудови опорного генератора на його характеристики.

#### ВСТУП

Для генерації надвисоких частот на сьогоднішній день зазвичай використовують метод, який побудований на методі з'єднання структури синтезатора частоти з генератором, керований напругою на кварцовому задавальному генераторі. Для реалізації цього задуму винайдено (і продовжується пошук вирішення даного питання) безліч схем з'єднання цих структурних елементів, але для стабілізації НВЧ необхідно використовувати діелектричні високо добротні резонатори.

В свою чергу не стоїть на місці і розвиток приймально-перетворювальних систем, що призвів до пошуку вирішень вдосконалення НВЧ – пристроїв, а саме:

- забезпечення енергоефективності пристроїв;
- збільшення продуктивності;
- зменшення габаритних розмірів;

Використання традиційних засобів для реалізації схеми опорного генератора, наприклад, як кварцовий задавальний елемент або ПАХ, не забезпечує вимог стабільності, а також завдає проблеми при переналаштуванні частот, що призводять до обмеженого застосування радіопристроїв, таких як обмеження в багатоканальності.

Пристрої на основі об'ємно-акустичних хвиль використовуються для генерації та вибіркової сигналізації приймально-перетворювального обладнання та мають ряд наступних переваг над пристроями з використанням ПАХ, а саме:

- менший вплив зовнішніх полів;
- кращі властивості до «захоплення» акустичної енергії.
- більша добротність;

Для приладів, які працюють в діапазоні 2÷20 ГГц важко створити задовільні умови для роботи на основі ПАХ-хвиль та LC-компонентах.

Одним із шляхів вирішень проблеми є необхідність використання при розробці НВЧ – акусто-електронних пристроїв тонко плівкової п'єзо кристалічної структури, товщина якої порівняно з довжиною акустичних хвиль, повинна бути в рази меншою.

На сьогоднішній день, представлення наступна класифікація опорних за давальних генераторів, а саме:

1. Діелектричні резонатори – генератори, стабілізовані по частоті. Такий вид потребує використання високодобротних матеріалів, а також дільників та помножувачів частоти, які при зменшенні габаритів пристроя призводять до збільшення відносної нестабільності.
  2. Кварцова стабілізація гетеродинного типу. Застосовується в радіоелектронному обладнанні наземних та бортових систем зв'язку і вимагає додаткових мір для покращення якості сигналу (віброзахист тощо).
  3. ГКН – генератор, що керується напругою. Пристрій працює у діапазоні 1÷8 ГГц, що застосовує розв'язку на підсилювачі для польових транзисторах та діодах Ганна. Даний вид генератора застосовується з метою використання в умовах перевантажень та можливого впливу високих температур.
  4. Генератор на поверхнево-акустичних хвилях - забезпечує зменшення масо-габаритних показників, але прямопропорційно збільшуються шумові складові сигналу зі збільшенням його частоти, які в свою чергу, унеможлиблює їх застосування в НВЧ – приладах.[1 с. 1-5]
- Метою даної магістерської дисертації є теоретичне дослідження та аналіз хвильових акустичних процесів в багат шарових п'єзо-кристалічних структурах на основі математичного

моделювання та вирішення хвильових рівнянь п'єзо-акустики способом кінцевої елементів, а також оптимізація і числовий аналіз параметрів НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів (ТАЕР) на основі багат шарових тонко плівкових структур, враховуючи п'єзо шар з нітрату алюмінію  $AlN$ , що працюють в ГГц діапазоні частот.

Даний вид високо інтенсивного джерела коливань не створює взаємного електромагнітного перекриття, що в свою чергу дозволяє утворювати суцільні монолітні схеми малощумних опорних генераторів.

Сучасні синтезатори частот відносять до областей радіоелектроніки, що найбільш динамічно розвиваються. Однією із особливостей побудови синтезаторів частоти є їх швидке невпинне вдосконалення, що зумовлене безперервним розвитком матеріальної бази, практики і теорії реалізації.

Застосування міліметрового діапазону хвиль є принциповим моментом для досягнення високої точності визначення координат і високої дозволеної спроможності радіолокаційних систем, дальність дії яких не перевищує 5-10 км.

Задачі, необхідні вирішити для досягнення цієї мети, наступні:

– числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів на основі багат шарової тонко плівкової структури, яка включає в себе п'єзо шар з нітриду алюмінію;

– обґрунтувати та вдосконалити структуру опорного генератора;

– дослідити існуючу область розробки керованих синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль та проаналізувати їх на предмет можливості вдосконалення як систем в цілому, так і їх окремих частин.

Предметом дослідження акустичні хвилі різного типу, що поширюються в багат шарових тонких плівкових п'єзо-кристалічних структурах. Складність дослідження властивостей таких хвиль пов'язана з тим, що анізотропія властивостей кристала, а також безліч шарів в структурі не дозволяє провести аналіз параметрів таких акустичних хвиль в загальному вигляді. Потрібне залучення чисельних методів розрахунку. Таким чином, в даний момент задача чисельного моделювання і аналізу хвильових процесів, які відбуваються в багат шарових тонко плівкових структурах, безсумнівно залишається актуальною в акустоелектроніці. Є способи удосконалення структури та обґрунтування параметрів синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль за критерієм мінімуму власних шумів і побудови їх на новій елементній базі на об'ємно-акустичних хвилях.

## РОЗДІЛ I. ОГЛЯД НАУКОВО – ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Характеристики синтезаторів частот.

Кілька років назад прямі цифрові синтезатори частоти (ПЦС) були рідкістю та мали обмежену сферу застосування. Їх широке використання стримувалося складністю реалізації, а також недостатньо широким діапазоном робочих частот. Не дивлячись на те, що в даний момент найбільш популярні синтезатори на основі фазового автопідстроювання частоти, все частіше використовуються прямі цифрові синтезатори, що мають ряд оригінальних можливостей. Прямі цифрові синтезатори частоти уже не сприймаються виробниками як незрозумілі, дорогі і складні пристрої.

Термін «синтезатор частоти» означає електронний пристрій, що здатен формувати з опорної частоти на виході необхідну частоту або набір частот, згідно із керуючим сигналам. Найбільш поширеними є наступні методи синтезу частот:

- прямий аналоговий синтез (Прямий аналоговий синтез, ПАС) на основі структури фільтр/ змішувач дільник, при якому вихідна частота виходить безпосередньо з опорної частоти за допомогою операцій фільтрація, змішення, множення і ділення;
- непрямий (зовнішній) синтез на основі фазового автоматичного підстроювання частоти (АПЧ), при якому вихідна частота формується за допомогою додаткового генератора (найчастіше це генератор, що керується напругою - ГКН), що охоплений петлею ФАПЧ;
- прямий цифровий синтез (ПЦС) – синтез, при якому вихідний сигнал синтезується цифровими методами;
- гібридний синтез – представляє собою комбінацію декількох методів, описаних вище.

Кожен з цих методів синтезу частот має переваги і недоліки, отже, для кожного конкретного додатка потрібно робити вибір, заснований на найбільш прийнятному комбінації компромісів.

До основних параметрів, що характеризують якість синтезатора частоти, відносяться:

- чистота спектру вихідного сигналу;
- швидкість перебудови;
- діапазон перебудови (смуга частот вихідного сигналу);
- кількість частот, що генеруються;
- частотне розширення;
- якомога вища стабільність частоти сформованого сигналу;
- гранично низькі фазові й амплітудні шуми
- гнучкість (можливість здійснення різних видів модуляції);
- можливість швидкої зміни сформованих частот;
- когерентність усіх сформованих сигналів;
- максимально широка смуга робочих частот;
- нерозривність фази вихідного сигналу при перебудові;
- висока чистота спектрів.

Реалізація сукупності перерахованих характеристик здійснюється за допомогою синтезаторів частот різного призначення.

Синтезом частот являє собою процес, в результаті дії якого одна або безліч частот формуються із однієї або декількох опорних частот за допомогою комбінацій елементів, які входять в схему синтезатора частот (СЧ).

Найбільш поширеними з них є дільники і помножувачі частоти, фільтри, комутатори, змішувачі, фазові і частотні детектори, генератори, підсилювачі і так далі. [2 с.75-76]

Оскільки будь-який НЧ можна представити еквівалентним генератором, то і всі параметри що, визначаються звичайними генераторами, можна застосувати для характеристики НЧ, які підрозділяються на експлуатаційні й електричні.

До таких основних електричних характеристик синтезатора частот відносяться:

- діапазон робочих вихідних частот;
- стабільність частоти вихідного сигналу;
- час перемикання частот;
- ширина смуги робочих вихідних частот;
- крок сітки робочих частот;
- рівень амплітудних і фазових шумів;
- наявність або відсутність фазової когерентності.
- рівень дискретних побічних складових спектрів вихідних сигналів ;

До основних експлуатаційних характеристик СЧ відносять:

- споживання енергії джерел живлення;
- час готовності після ввімкнення;
- габаритно-масові показники.

Діапазон робочих вихідних частот характеризує область частот, в якій знаходиться центральна частота коливача, що синтезуються. Згідно міжнародної класифікації, радіочастотний спектр можна умовно розбити на діапазони і представлений в Табл.1.1.

Таблиця 1.1. – Радіочастотний діапазон

Приналежність СЧ до того або іншого діапазону частот у значній мірі обумовлює технологічні і конструктивні проблеми його створення, зв'язані у першу чергу з можливостями сучасної матеріальної бази.[3 с.140-142]

## 1.2. Загальні принципи побудови синтезаторів частот.

Практичні схеми синтезаторів частот дуже різні. Не дивлячись на цю різноманітність, можна відмітити загальні принципи, які лежать в основі побудови сучасних синтезаторів:

- синтез частот виконується широким використанням помножувачем, дільників та перетворювачами частоти, які забезпечують використання одного опорного колювання для формування сітки частот;
- забезпечення синтезаторами частот декадного встановлення частоти збудника;

- всі синтезатори засновані на використанні одного високо стабільного опорного коливання з деякою частотою  $f_0$ , джерелом якого є опорний кварцовий генератор. По методу формування вихідних коливань синтезатори поділяються на дві основні групи: виконані за методом непрямого (активного) синтезу і виконані за методом прямого (пасивного) синтезу.

До першої групи належать синтезатори, які формують вихідні коливання в діапазоні автогенератора гармонічних коливань з параметричною стабілізацією частоти, нестабільність якого усувається системою АПЧ за еталонними (високостабільними) частотами.

До другої групи належать синтезатори, в яких вихідні коливання формуються за допомогою множення та ділення частоти опорного генератора з подальшим складанням та відніманням частот, що отримані в результаті ділення та множення.

Синтезатори обох груп можуть бути виконані з використанням цифрової або аналогової елементної бази.[4 с. 37-39]

### 1.3. Синтезатори, виконані за методом прямого синтезу.

Високостабільний кварцовий опорний генератор формує коливання з частотою  $f_0$ , що надходять на помножувачі та дільники частоти ПЧ і ДЧ. Дільники частоти знижують частоту опорного генератора  $f_0$  в число разів (d), а помножувачі частоти збільшують її в число разів (k). Частоти, які отримані в результаті множення та ділення частоти ОГ ( $f_0$ ), використовуються для формування опорних частот у спеціальних пристроях, що називають датчиками опорних частот ДОЧ.

Рис. 1.1. Блок-схема синтезатора, виконаного за методом прямого синтезу

де, ОГ – опорний генератор; ДЧ, ПЧ – дільники та помножувачі частоти; БПФ – блок перетворення і фільтрації;

Загальна кількість датчиків опорних частот у синтезаторі частот СЧ залежить від діапазону формованих СЧ і інтервалу між сусідніми частотами: чим ширше діапазон частот синтезатора частот та менше інтервал, тим більша кількість датчиків опорних частот потрібно.

При декадній установці частоти кожен датчик опорної частоти формує 10 ОЧ з певним інтервалом між сусідніми частотами. Загальна кількість потрібних датчиків описується кількістю розрядів в записі максимальної частоти синтезатора.

Наприклад, максимальна частота синтезатора, яка формує сітку частот з інтервалом  $\Delta f = 1$  кГц, 5 МГц = 5000 кГц, тобто містить чотири розряду. Тому синтезатор повинен мати чотири датчика опорних частот:

ДОЧ I, формує десять частот з інтервалом  $\Delta f_1 = 1$  кГц,

ДОЧ II - 10 частот з інтервалом  $\Delta f_2 = 10\Delta f_1 = 10$  кГц,

ДОЧ III - 10 частот з інтервалом  $\Delta f_3 = 10\Delta f_2 = 100$  кГц,

ДОЧ IV формує частоти з інтервалом  $\Delta f_4 = 10\Delta f_3 = 1000$  кГц = 1 МГц.

Кількість опорних частот з інтервалом 1 МГц в даному прикладі тільки п'ять.

Опорні частоти, сформовані у датчиках, подаються на змішувачі. Смугові перемикаючі фільтри, ввімкнені на виході змішувачів, виділяють в даному прикладі сумарну частоту: на виході першого  $f_1 + f_2$ , на виході другого  $f_1 + f_2 + f_3$ , на вихід третього  $f_1 + f_2 + f_3 + f_4$ .

Частота на виході збудника при декадній установці визначається положеннями перемикачів кожної декади. [4 с. 55-58]

Відносна нестабільність частоти на виході синтезатора дорівнює нестабільності ОГ. Недоліком такого типу синтезаторів є наявність на його виході великого числа комбінаційних частот, що пояснюється широким використанням змішувачів.

### 1.4. Синтезатори частот, побудовані за методом непрямого синтезу.

У синтезаторах, які виконані за методом непрямого синтезу, у яких джерело вихідних коливань являють собою діапазонний автогенератор гармонічних коливань, автоматично підстроюється по високим стабільним частотам, які формується у БОЧ.

Суть автоматичного підстроювання частоти полягає в коливанні автогенератора за допомогою високо стабільних частот перетворюються до деякої постійної частоті  $f_{\text{АПЧ}}$ , що порівнюється зі зразковим частотним значенням. Якщо розбіжності порівнюваних частот формується керуюча напруга, яка подається на управляючий реактивний елемент та змінює значення його реактивності (індуктивності або ємності). Керовані реактивні елементи вмикаються у контур,

який визначає частоту опорного генератора. Частота опорного генератора змінюється до тих пір, доки **фАПЧ** не наблизиться до зразкової частоти з досить малим залишковим розладом.

В залежності від пристрою порівняння всі системи автоматичного підстроювання частоти можна поділити на 3 види:

- системи з фазовим автопідстроюванням частоти ФАПЧ, що використовують фазові детектори ФД; як порівнюючи пристрої.
- системи з імпульсно-фазовим автопідстроюванням частоти ІФАП, в якій порівнюють чим пристроєм є імпульсно-фазові детектори ІФД.
- системи з частотним автопідстроюванням частоти ЧАП, в яких у якості порівнювального пристрою застосовуються частотні детектори ЧД; [6 с. 1-4]

#### **1.5 Класифікація опорних генераторів синтезаторів частот.**

Прямі цифрові синтезатори DDS частоти відіграють велику роль у сучасних радіоелектронних пристроях та системах. Це забезпечується значними перевагами: висока роздільна здатність, широка синтезована смуга частот, швидкість перебудови синтезатора з частоти на частоту. Багаторівневі DDS в силу своєї надійності, можливості мікромініатюризації, технологічності та унікальності технічних характеристик (можливість формування сигналів складної форми, нерозривність фази під час перемикання з частоти на частоту, цифрове управління частотою, фазою і амплітудою вихідного коливання) на сьогодні застосовуються в системах зв'язку. Особливо перспективним є використання DDS у радіотехнічних системах передачі інформації з підвищеною захищеністю і шумостійкістю. Сьогодні ряд параметрів обчислювальних синтезаторів частотим менше, ніж у синтезаторів на основі фазових амплітудних перетворювачів частоти. Такими параметрами є низькі існування в спектра синтезованого сигналу гармонійних складових з високими значеннями амплітуд та показники короткочасної фазової стабільності. Один із напрямків поліпшення коротко-тимчасової фазової стабільності є використання опорних генераторів з покращеними кількісними характеристиками.

На сьогоднішній день застосовуються такі класифікації ОГ синтезаторів частот:

- Квантові стандарти частоти являють собою пристрої, в яких для генерування коливань з досить стабільною частотою або для точного вимірювання частоти коливань застосовують квантові переходи частинок (молекул, іонів та атомів) з одного енергетичного рівня на інший. Квантові стандарти прийнято поділяти на два класи.

В активних квантових стандартах частоти квантові переходи молекул і атомів безпосередньо призводять до випромінювання електромагнітних хвиль, в яких частота служить стандартом або ОЧ. Такі прилади називають квантовими генераторами. У пасивних квантових стандартах частоти, виміряна частота коливань зовнішнього генератора порівнюється з частотою коливань, яка відповідає певному квантовому переходу обраних атомів, тобто з частотою спектральної лінії.

- Стандартні по часу і частоті – високостабільні по частоті джерела електромагнітних сигналів (оптичних або радіодіапазонних). Стандарти частоти використовуються як вторинні або робочі зразки в метрологічних вимірюваннях, також при виготовленні високоточних засобів вимірювальної техніки часу і простоти, в радіоастрономії, радіонавігації та в інших сферах.

Стандарти класифікують за матеріалом робочого тіла квантових генераторів (цезію, водню, кварцу, рубідію). Стандарти часу й частоти займають велику нішу в системах синтезу сигналів і частот в основному через свої енергетичні і масо-габаритні характеристики. Як виняток можна навести приклад опорного цезієвого стандарту фірми Simmetricom (США) Quantum SA.45s CSAC, який представляє собою квантовий стандарт частоти на основі атомів цезію.[6 с.23-25]

Генератори надвисоких частот застосовуються в діапазонах частот від 300 МГц до 100 ГГц. Стабілізування їх частоти генерації кварцовими резонаторами неможливо, тому вимоги до стабільності частоти знижують, або використовуються засоби фазової синхронізації частоти НВЧ - коливань, або застосовують інші типи стабілізуючих резонаторів.

Якість опорних НВЧ генераторів оцінюються додатковими параметрами, що характеризують вплив фази варіацій напруги живлення на частоту і коефіцієнтом на відображення від навантаження.

### 1.6. Тонко плівковий опорний генератор на об'ємно акустичних хвилях.

Використання тривіальних підходів для реалізації схеми ОГ, наприклад як ПАХ або кварцовий задавальний елемент, не забезпечує вимог стабільності, а також завдає проблеми при переналаштуванні частот та призводить до обмеженого використання радіопристроїв, як наприклад, обмеження в багатоканальності.

Тим не менш системи, які застосовують сьогоденні технології бездротового зв'язку, працюють на частотах радіоканалу в діапазоні 0,43- 2,4 ГГц.

До таких мереж відносяться перш за все мережа GSM-1800 з частотою 1710 -1880 МГц , GSM-900 з частотою 890-960 МГц, Bluetooth з робочою частотою 2,4 ГГц, мережа Wi-Fi стандартом 802.11 b/g та інші. В найближчій перспективі плануються системи ширококутового зв'язку з діапазоном 5,155 - 6,425 ГГц (наприклад, стандарти 802.16 b/e, що передбачають безпроводні WiMax мережі з робочими частотами 1,5 13,6 ГГц), в майбутній перспективі діапазон понад 10 ГГц. Спеціальні системи, такі як засоби радіоелектронної боротьби та радіолокація вже зараз працюють на частотах понад 10 ГГц.[7 с.12-13]

Для стабілізації та селекції частот таких систем потрібно мати певні акустоелектронні компоненти, які забезпечують роботу в заданому НВЧ діапазоні частот і можливість їх інтеграції з напівпровідниковими структурами в одній мікросхемі.

Принципово нові можливості істотного підвищення робочої частоти акустоелектронних приладів відкриваються у зв'язку з можливостями вирощування тонких плівок зі структурою анізотропного кристала, яка володіє п'єзоелектричними властивостями. Зокрема, такими властивостями володіє плівка *AlN*. Швидкість об'ємно-акустичної хвилі ОАХ в нітриді алюмінію досягає величини близько 11 км/с, яка при товщині плівки в 0,5 мкм відповідає частоті 11 ГГц. Дивлячись на те, що товщина плівки може бути менше 0,5 мкм, робоча частота може бути ще вище. Необхідно відзначити, що свій внесок в зниження частоти дає кінцева товщина електродів, але навіть з урахуванням цієї обставини робоча частота тонко плівкового резонатора на ОАХ може досягати величини, що перевищує 20 ГГц, що абсолютно недосяжне для пристроїв на ПАХ.

Для розробки НВЧ акустоелектронних приладів необхідно використовувати багатошарові тонкоплівкові п'єзо-кристалічні структури, в яких товщина порівнянна з довжиною АХ.

За останній час були освоєні технології вирощування тонкоплівкових п'єзо-структур на основі окису, цинку, нітриду алюмінію та інших матеріалів, що мають товщини від 0,05 до 2 мкм.

На основі таких структур з'явилася можливість створювати НВЧ акустоелектронні компоненти, які мають змогу працювати в діапазоні робочих частот від 2 до 30 ГГц. До таких компонентів перш за все відносяться НВЧ акустоелектронні резонатори на основі орієнтованих тонкоплівкових п'єзо-структур з нітриду алюмінію, що вирощений на підкладках з кремнію. При цьому в якості робочої акустичної може бути використана ОАХ.

Найпростіша конструкція НВЧ тонкоплівкового акустоелектронного фільтра складається з двох електродів, між якими знаходиться тонкий п'єзо-кристалічний шар. Резонансна частота визначається швидкістю акустичної хвилі і товщиною п'єзо шару. У першому наближенні центральна робоча частота тонкоплівкового резонатора оцінюється з найпростішого співвідношення (1.1)

де,  $v$  - швидкість ОАХ вздовж напрямку, що перпендикулярний поверхні п'єзоактивного шару з  $h$  - товщина шару.

На Рис. 1.2 показані діапазони робочих частот НВЧ тонкоплівкових акустоелектронних фільтрів в залежності від товщини металевих електродів і п'єзоактивної плівки нітриду алюмінію.

Рис.1.2 Діапазони робочих частот НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів в залежності від товщини п'єзо-активної плівки *AlN* і металевих електродів

Виходячи з графіку видно, що для реалізації НВЧ діапазону робочих частот аж до 28 ГГц необхідно застосовувати дуже тонкі плівки як електродів резонатора, так і *AlN*. У одночастотних резонаторах для виділення центральної частоти необхідно акустично ізолювати тонкоплівкову структуру від підкладки. Така ізоляція може бути виконана двома методами. Перший – створення під структурою повітряного зазору. Такий резонатор називається тонко плівковий резонатор мембранного типу. Другий спосіб полягає у використанні структури, змонтованої на



підкладці, в якій між резонатором і підкладкою поміщається акустичний відбивач, який служить для ізоляції акустичних коливань поза робочої області резонатора.[8 с.5-9]

Не дивлячись на те, що головним типом акустичної хвилі в таких пристроях є ОАХ, в структурі резонатора збуджується цілий набір акустичних хвиль різного типу. До таких хвиль відносяться хвилі Релея-Лемба, зсувні об'ємні акустичні хвилі ЗОАХ та інші., збуджуються в багатошаровій тонко плівковій структурі, що являється основою резонатора. Такі хвилі часто негативно впливають на параметри НВЧ акусто-електронних пристроїв, тому важливим завданням є аналіз та дослідження хвильових процесів, які відбуваються в багатошарових тонкоплівкових (товщина кожного шару менше довжини акустичної хвилі) п'єзокристалічних структурах.

Існує декілька видів конструкцій плівкових фільтрів, проте найкращий серед них є резонатор з Бреґівським відбивачем (Рис. 1.3), що призначений для ізоляції тонкоплівкового відбивача від підкладки. Такі резонатори частіше за все виконані на основі плівок алюмінію та молібдену, а матеріалом п'єзо електричного шару застосовується оксид цинку.

Рис. 1.3 Резонатор з Бреґівським відбивачем.

Додатково електроди резонатору виготовляються з алюмінію. Зазвичай застосовується п'ять пар шарів алюмінію і молібдену. На добротність, в свою чергу, сильно впливає шорсткість поверхні плівок алюмінію, що є низько імпеданс ним шаром резонатору і її підвищення небажане.[9 с.11-13]

**Висновки.**

В даному розділі було проаналізовані параметри та характеристики синтезаторів частоти. Представлено теоретичне аналіз та дослідження хвильових акустичних процесів в багатошарових п'єзокристалічних структурах на основі теоретичного матеріалу, а також числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонко плівкових акустоелектронних резонаторів ТАЕР на основі багатошарових тонкоплівкових структур, враховуючи п'єзошар з нітрату алюмінію  $AlN$ , працюючих в ГГц діапазоні частот.

**РОЗДІЛ II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА**

**2.1. Типи акустичних хвиль, які розповсюджуються в багатошарових тонко плівкових структурах.**

Акустоелектронні пристрої являють собою принципово незамінні базові елементи для всіх перспективних систем засобів навігації, зв'язку, радіолокації, робототехніки і моніторингу. Вони дозволяють забезпечити обробку складних сигналів в реальному масштабі часу при широкому динамічному діапазоні, невисокою перешкодостійкістю та високої чутливості. Акустоелектронні пристрої нового покоління допомагають освоювати більш високочастотні діапазони, споживають менше енергії, невисокою вартістю і відрізняються унікально малими масо-габаритними характеристиками.

Принцип роботи тривіальних кварцових резонаторів заснований на використанні ОАХ, що розповсюджуються в об'ємі п'єзокристалу. При цьому їх робочий частотний діапазон обмежується сотнями МГц, для збільшення частоти необхідно зменшити товщину об'ємного кварцу до одиниць мкм, що технічно реалізувати дуже важко.

У дисертації представлено аналіз та теоретичне дослідження хвильових акустичних процесів в багатошарових п'єзо-кристалічних структурах на основі математичного моделювання та вирішення хвильових рівнянь п'єзоакустики методом кінцевих елементів, а також числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонкоплівкових акустоелектронних резонаторів ТАЕР на основі багатошарових тонко плівкових структур, враховуючи п'єзо шар з нітрату алюмінію, що працюють в ГГц діапазоні частот.

З появою тонко плівкових резонаторів мембранного типу в електронних технологіях різко зріс інтерес до акустичних процесів, які виникають в багатошарових тонко плівкових п'єзо-кристалічних структурах, проте повністю вивченим це питання вважати не можна. У розділі будуть розглянуті акустичні та електроакустичні хвилі, які збуджуються в багатошарових тонко плівкових структурах, що використовуються для конструювання на їх основі пристроїв по FRAV технології. Особливу увагу буде приділено об'ємним електроакустичним хвилям, що поширюються в тонких плівках, а також хвилях Релея - Лемба.[10 с.18-21]

Багатошарова тонкоплівкова п'єзо кристалічна структура являє собою набір тонких плівок, товщина яких менша, ніж довжина акустичної хвилі в матеріалі шару. Причому необхідною

умовою є наявність в структурі півки з діелектричного матеріалу, яка володіє п'єзо ефектом. Акустичні хвилі в такій структурі мають більш складну структуру, ніж акустичні хвилі, що розповсюджуються в скінченних середовищах.

Хвильові явища у середовищах з яскраво вираженою анізотропією ряду фізичних властивостей характеризуються більш складними закономірностями у порівнянні з хвильовими явищами в ізотропних середовищах. Наявність п'єзо ефекту призводить до того, що електричні і механічні значення перестають бути незалежними. Якщо тіло володіє п'єзо електричними властивостями, то деформації, що створюються пружною хвилею, призводять до появи локальних електричних полів. Якщо поля поширюються разом з механічною хвилею, також можуть виходити за межі п'єзо електричного середовища. При цьому електромагнітні поля, які збуджені під дією акустичної хвилі, взаємодіють з будь-якими металевими електродами, які розташовані на поверхні середовища, хвиля в яких розповсюджується.

Це дозволяє впливати на хвилю, впливаючи на електромагнітні поле які пов'язані з нею. Як приклад, в багатьох роботах описана конструкція акселерометра, яка працює за принципом закортки електричного поля металевою мембраною, в основі якого лежать лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях. Властивості акустичних хвиль, що розповсюджуються в п'єзокристалах (на відміну від ізотропних середовищ) мають ряд суттєвих особливостей. По-перше, параметри і структура хвилі залежать від напрямку симетрії і поширення п'єзокристалу. Електроакустичні хвилі мають не одну чи дві (як в ізотропному середовищі), а всі три компоненти вектору механічних зміщень  $U_1, U_2, U_3$  а коливання відбувається в одній площині, тобто

електронно-акустичні хвилі плоскою поляризовані. При цьому вектори фазової (2.1) та групової (2.2)

швидкостей не співпадають ( $\omega$  - частота,  $k$  - хвильовий вектор).

Це означає, що фаза та енергія хвилі в загальному випадку можуть поширюватися в різних напрямках.

Як відомо, акустoeлектронні пристрої нового покоління, які працюють в діапазоні частот від 2 до 30 ГГц, в якості робочого типу акустичних хвиль використовують ОАХ, які розповсюджуються в багатошарових тонкоплівкових структурах. До таких пристроїв насамперед належать НВЧ акустoeлектронні тонкоплівкові резонатори.[11]

Залежно від конструкції, до складу багатошарової структури тонкоплівкового акустoeлектронного фільтра на об'ємних акустичних хвилях можуть входити від 3 до 15 шарів. При цьому матеріальні властивості кожного шару кардинально відрізняються між собою. Крім цього, поперечні розміри кожного шару кінцеві, а форма може бути досить складною. Це призводить до того, що в залежності від конструкції, в багатошаровій структурі може збуджуватись цілий набір хвиль різного типу: зсувні і поздовжні хвилі, різні види ПАХ, хвилі Лемба, хвилі Сезава, хвилі Стоунлі, хвилі Лява.

## 2.2. Поверхнево акустичні хвилі.

Поверхневі акустичні хвилі – це пружні хвилі, які розповсюджуються уздовж границі між двома дружніми середовищами або уздовж вільної поверхні твердого тіла. Залежно від граничних умов, поверхневі акустичні хвилі бувають декількох типів. Розрізняють поверхневі хвилі вертикальної (хвилі Релея, Стоунлі, електроакустичні хвилі Гуляєва-Брюстейна) і горизонтальної поляризації (хвилі Ліва).[12 с. 649-650]

У випадку п'єзокристаличної підкладки поверхнево акустичних хвиль супроводжується квазістичним електричним п'єзополем. Внаслідок цього поверхнево акустичні хвилі можна збуджувати на поверхні п'єзокристала, створюючи електричне поле в тонкому при поверхневому шарі п'єзо кристала за допомогою системи металевих електродів (зустрічно-штиршового перетворювачі ЗШП), нанесених на його поверхню. На Рис. 2.1 показана декартова система координат, в якій в напрямку осі  $x_1$  поширюється акустична хвиля. На осі  $X_3$  нормаль до поверхні п'єзо кристалу.

Рис 2.1. Робоча система координат.

ПАХ - це хвилі, вектор групової і фазової швидкості яких паралельна поверхні, але, в загальному випадку, ці вектори можуть не співпадати по напрямку. Залежно від класу симетрії

п'єзо кристалу і напрямку поширення хвилі, можуть існувати кілька типів п'єзо акустичних хвиль.

Спеціальним типом хвиль являються електроакустичні хвилі Лемба, які розповсюджуються в тонких п'єзо кристалічних пластинках. За характером вони схожі з ПАХ, але, за рахунок невеликої товщини пластинок, коливання розповсюджуються по всій поверхні пластини цілком, тому термін «поверхневі хвилі» до них не застосовується. Часто, в роботах використовують загальне позначення хвилі Релея-Лемба, оскільки ці хвилі мають схожу природу.[13 с.14-19]

### 2.3. Хвилі Лемба.

Хвилі Лемба — особливий тип хвиль, що поширюються в пружних хвилеводах. Хвилі названі ім'ям першого вченого Горація Лемба, що знайшов дисперсійне співвідношення для цих хвиль і опублікував його в 1917 році.

Хвилі Лемба діляться на два основних типи – симетричні і антисиметричні. Якщо умовно провести повздовж поверхні пластини, в якій розповсюджуються хвилі, площина, яка розділяє пластину навпіл, то в симетричних хвилях Лемба зміщення будуть симетричними відносно площини, тобто зміщення  $U_x$  будуть мати однаковий знак, а  $U_z$  – інший, а антисиметричне зміщення  $U_x$  будуть мати протилежний знак, а  $U_z$  – однаковий. В залежності від товщини пластини, в ній можуть розповсюджуватись різна кількість хвиль Лемба з різними фазовими і груповими швидкостями, тим паче чим більше відносна товщина пластини, тим більша кількість хвиль може бути розповсюджена в ній. Іншими словами, швидкість хвилі Лемба залежить від  $h/\lambda$ . При прагненні величини  $h/\lambda$  до одиниці, швидкість поширення хвиль прагне до швидкості ПАХ.[14 с. 63-64]

В тонких п'єзоелектричних середовищах хвилі Лемба можуть бути збуджені і підсилені за допомогою електричного струму. Хвилі такого типу можуть поширюватися в пластині п'єзо кристалу кінцевої товщини  $h$ , порівняно з довжиною хвилі  $\lambda$ . На відміну від хвилі Лемба, що розповсюджується в ізотропній пластині, дана хвиля супроводжується електричним потенціалом  $\phi$ . Енергії цієї хвилі, на відміну від ПАХ, зосереджена у всій товщині  $h$  пластини. У загальному випадку електроакустична хвиля Лемба має всі три компоненти механічних зсувів  $U_1, U_2, U_3$ . Однак, в деяких одиничних випадках симетрії кристала, також, як і в ізотропній пластині, дана хвиля може бути вертикальної або горизонтальної поляризації. Фазові швидкості мод Лемба можуть бути як більше, так і менше швидкості ПАХ в даному середовищі.

Числове та фізичне моделювання акустичних хвиль, які поширюються в багатошарових тонкоплівкових (товщина шару менше довжини акустичної хвилі)

п'єзо кристалічні структури на основі нітрату алюмінію, нітрату галію і розрахунок їх основних характеристик призведе до створення нових класів приладів акусто-електроніки і п'єзо електроніки, працюючих на частотах в діапазоні від 2 ГГц до 30 ГГц.[15 с.123]

### 2.4. Тип робочих хвиль в тонкоплівковому резонаторі мембранного типу.

Основним типом робочих акустичних хвиль в тонкоплівкових резонаторах мембранного типу є об'ємно акустична хвиля. Через кінцеві поперечні розрізи електродів резонатора зсувних об'ємно акустичних хвиль збуджується одночасно з поздовжньою хвилею. У плівкових резонаторах мембранного типу резонатори можуть збуджуватися також модами Лемба. У плівкових резонаторах мембранного типу на кордонах між шарами існують умови для збудження хвилі Лява, Сезава, Стоунлі а також, за певних умов, пов'язаних перш за все з проблемами технологічного процесу, можуть виникнути відмінності різного роду, що впливають з щільних хвиль. Всі перераховані вище акустичні хвилі можуть вплинути на якісні характеристики пристрою.

Чисельне моделювання і аналіз хвильових процесів, прохідних в багатошаровій тонкоплівковій структурі, що є основою НВЧ акустоелектронного тонкоплівкового фільтра необхідні для оптимізації цієї конструкції та досягнення поліпшених параметрів пристрою. В ході роботи були проведені пошуки аналіз методів розрахунку параметрів, а також виявлено їх плюси та мінуси.

### 2.5. Аналіз фізичних та конструктивних фактори, які впливають на основні характеристики акусто-електронних резонаторів.

Всі фактори, які мають вплив на добротність акустоелектронних резонаторів, можна умовно розподілити на 2 групи. До першої належать фактори, які властиві всім конструкціям акустоелектронних резонаторів на ОАХ. До них відносяться:

- витік акустичної енергії на кордонах елементів конструкції резонаторів;
- різні ефекти термопружного розсіювання;
- омичні втрати електродів.

Крім цих механізмів втрат для резонаторів можна виділити ще, як мінімум, 3 специфічних механізми:

- неповне придушення втрат енергії в стоці брегівського відбивача, як наслідок, дисипації частини енергії в підкладці резонатора;
- резистивні втрати в підвідних з'єднаннях, обумовлені особливостями конструкцію і призводять до паразитарних ємностей зв'язках із стоком акустичного відбивача;
- наявність втрат в матеріалах, використовуваних в стоці брегівського відбивача.

Починаючи з найпростіших пристроїв додатковим механізмом втрат пояснюється той факт, що добротність резонатора мембранного типу в загальному випадку вище, ніж добротність резонатора з акустичним відбивачем, якщо інші їх параметри, такі як якість матеріалів, товщини шарів, та інші.

Як було описано вище в попередньому розділі, під дією НВЧ сигналу виникають не тільки поздовжні об'ємні хвилі, які є робочими для даного типу резонаторів, але також інші типи хвиль. Перш ніж приступати до оцінки добротності, необхідно зробити відступ з метою описання джерела і, як наслідок наявності модів Релея-Лемба (R-L) в акустичних пластинках. Це важливо тому, що є сильна присутність R-L в високо добротних тонко плівкових резонаторах.

Ці моди поширюються уздовж поперечних напрямків та утворюють сильний резонанс в присутності 2 паралельних країв в конструкції резонатора. Крім впливу резонансних процесів на амплітудо-частотні параметри пристрою, на порушення будь-яких акустичних хвиль витрачається енергія, яка веде до зниження добротності пристрою, якщо цю енергію не зберегти.

Окрім перерахованих факторів впливу, існують деякі специфічні фактори для тонкоплівкових резонаторів. Для локалізації акустичної енергії всередині п'єзоелектричної плівки в пристроях такої конструкції застосовується брегівськими відбивач з шарами товщиною  $\lambda/4$  з матеріалів, з істотно відмінними акустичними імпедансами. Це тягне за собою декілька проблем.

Перш за все, в шарах брегівського відбивача відбувається загасання акустичної хвилі. З іншого боку, для повного відображення поздовжньої акустичної хвилі потрібне точне дотримання товщини брегівського відбивача. Однак на практиці неможливо забезпечити абсолютний контроль товщини і якості

матеріалів. Завжди має місце деяка технологічна похибка, тому частина енергії об'ємних акустичних хвиль просочується крізь брегівськими відбивач в підкладку

і загасає в ній.[15 с.118-121]

Якщо в шарах, крім діелектричних шарів присутні металеві, то можлива поява ще додаткових механізмів втрат, що виникають за рахунок часткового замикання електродів акустоелектронного резонатора через ємність на металеві шари брегівського відбивача.

Всі перераховані проблеми можна умовно розділити на 2 види. Одні вимагають поліпшення і модернізації технології виробництва, інші ж можна в деякій мірі вирішити за рахунок попереднього аналізу в оптимізації конструкції.

#### **2.6. Вплив матеріалів електродів на добротність.**

В разі, якщо товщина електродів нескінченно мала, добротність резонатора прямує до механічної добротності  $Q_m$  матеріалу п'єзоелектричної плівки. Однак на практиці товщина реальних електродів має скінченну величину нерівну 0.

Рис. 2.2. Залежність добротності резонатора (вісь Q) від відносини товщини одного Mo електрода (обидва електроди однакові по товщині) до товщини шару AlN, залежність резонансної частоти резонатора (вісь h) від товщини електрода для фіксованої товщини шару AlN, що дорівнює 1 мкм

Оскільки акустична хвиля поширюється як в електродах так і в п'єзоплівці, то механічна добротність матеріалу електродів дає свій вклад в повну добротність резонатора. Видно, що  $Q_m$  металів менше, ніж  $Q_m$  п'єзокристалів. Тому добротність резонатора повинна бути менше, ніж механічна добротність однієї лише п'єзоплівки. Наприклад якщо, матеріал електродів взяти молібден (один з найбільш часто використовуваних матеріалів) і задати для нього величину механічної добротності  $Q_m = 500$ , яка укладається в діапазон наведених вище значень – розрахункова залежність добротності резонатора від відносної товщини одного з двох однакових електродів буде виглядати так, як показано на Рис. 2.2.

Зі збільшенням ширини електродів добротність резонатора швидко зменшується від 2000, яка відповідає механічній добротній нітриду алюмінія, до 500, що відповідає механічній добротності молібдену. Тут же наведена крива, яка показує те, що збільшення товщини електродів супроводжується також і суттєвим зменшенням центральної частоти пристрою. Таким чином, хороші акустичні властивості (малі акустичні втрати) нітриду алюмінію не можуть бути реалізовані в повній мірі через значно гірших акустичних властивостей матеріалів електродів. [16 с.34-36]

Вплив електродів тим більше, чим вище робоча частота пристрою. На графіку видно, що (Рис. 2.3) наведені розраховані резонансні частоти пристроїв в залежності від товщини нітриду алюмінію для різної товщини електродів. При розрахунку параметрів акустоелектронних резонаторів за допомогою чисельного вирішення основних рівнянь п'єзоакустики використовуються матеріальні константи матеріалів, з яких формується пристрій розроблений таким чином. Однак значення матеріальних констант в різних джерелах можуть дещо різнитися. Ця закономірність дозволяє розраховувати параметри пристрою. Наприклад, в різних джерелах можна знайти значення щільності  $\rho$  для Мо від 9,01 до 10,2 г/м<sup>3</sup>. На рисунку 3.3 наведені графіки залежності провідності резонатора  $[Y]$  від частоти, розраховані для мембранного резонатора з електродом з молібдену, де для розрахунку кривої (1) використана щільність молібдену становила  $\rho = 9,01$  г/м<sup>3</sup>, а для іншої  $\rho = 10,01$  г/м<sup>3</sup>.

Рис 2.3 Розраховані залежності частоти резонатора від товщини AlN для різної товщини електродів: (1) -  $h_e = 0$  мкм; (2) -  $h_e = 0,05$  мкм; (3) -  $h_e = 0,1$  мкм; (4) -  $h_e = 0,15$  мкм; (5) -  $h_e = 0,2$  мкм, (6) -  $h_e = 0,25$  мкм, (7) -  $h_e = 0,3$  мкм.

Як видно з графіків, центральна частота через різницю щільності в 1 г/м<sup>3</sup> для десяти ГГц резонатора може досягти 0,5 ГГц. Також помітна різниця в значення модуля імпедансу пристрою на резонансній частоті. Така відмінність закономірна, оскільки від щільності залежить швидкість акустичної хвилі в матеріалі.

Не тільки акустичні властивості матеріалів шарів (їх механічна добротність), що утворюють резонатор, визначають його добротність. На величину добротності сильно впливають також і електричні резистивні втрати, обумовлені омичним опором електродів і підвідних доріжок. При товщині порядку сотень нанометрів такі контактні майданчики будуть мати деякий, відмінне від нуля, омичні опори. Опори підходящих опорів сигнального електроду вносить свій внесок в імпеданс резонатора в якості активного опору. В еквівалентній схемі тонко плівкового резонатору омичні втрати в контактній площадці сигнального електроліту можна врахувати за допомогою елемента  $R_s$ , (Рис. 2.3). Як видно, чим вище резонансна частота, тим сильніше падає добротність при збільшенні омичного опору контактного майданчик в сигнального електрода.[17 с.15-18]

При конструюванні реального резонатора доводиться шукати компроміси, так як, з однієї сторони, чим ширше імпеданс, тим більше падає добротність резонатора за рахунок акустичних втрат, а з іншого боку при зменшенні товщини електроду збільшується його омичний опір. Один із виходів з даної ситуації є перехід на матеріали з хорошою акустичною добротністю і малим питомим опором.

### 2.7. Вплив технологічних похибок на основні параметри акусто-електронних резонаторів.

Ширина електрода значно впливає на центральну частоту резонатора, нарівні з товщиною плівки п'єзоелектрика. Чим вище частота резонатора, тим точніше необхідно контролювати товщину металевої плівки при напilenі. При рівномірному збільшенні ширини електроду, робоча частота резонатору зменшується, проте пристрій продовжує працювати в одновимірному

режимі. Основні способи підгонки частоти резонатора, що працює на об'ємних акустичних хвилях, засновані саме на зміні товщини електрода.

Часто при виробництві резонатора, а саме при формуванні плівок п'єзоелектрика або електродів, напилення проходить нерівномірно, і площина зовнішньої поверхні електрода перстає бути паралельна поверхні акустичної плівки. В цьому випадку відбувається формування стоячих хвиль з частотами, які відрізняються на невелику величину, а резонатор починає працювати в багатомодовому режимі. Для ілюстрації даного ефекту була розрахована модель за допомогою МСЕ.

За основу була взята модель, що описана раніше (рис. 2.12), однак товщина нижнього електрода в одному з кутів вища товщини інших на 10нм. Це становить близько 10% від товщини нижнього електрода. Таким чином, нижня межа нижнього електрода знаходиться під кутом  $\approx 0,5^\circ$  до площини верхньої межі електрода і площині п'єзо плівки.

Рис.2.4 Графік залежності провідності від частоти

На рис. 2.4 показаний графік провідності в залежності від частоти. Як видно з рис. 2.4, така нерівномірність приводить до зниження величини провідності і отримання паразитних резонансів в порівнянні з випадком рівного електрода (Рис. 2.5).

Рис. 2.5 Графіки залежності провідності  $|Y|$  (1) – електрод під кутом, (2) – рівний електрод. При невеликому розходженні розрахунок ідеальної товщини шарів дзеркала з реальним сформованим стеком, відбивання об'ємних акустичних хвиль відбувається неповністю.

#### ВИСНОВКИ

Елементи конструкції та тип хвиль які застосовуються в тонкоплівковому акустоелектронному резонаторі значно впливають на головні параметри пристрою. Робоча частота такого резонатора в загальному випадку визначається товщиною електродів, п'єзоплівки та швидкістю поширення ОАХ. Вплив конструкції на інші характеристики та параметри резонатора значно складніше і вимагає додаткових дослідження.

В дисертації представлений один з найреальніших способів покращення конструкції тонкоплівкових акустоелектронних резонаторів на об'ємно акустичних хвилях з точки зору поліпшення основних параметрів пристрою.

### РОЗДІЛ III. КОНСТРУКТОРСЬКО – ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 3.1. Основні параметри акусто-електронних резонаторів.

На робочі характеристики тонкоплівкового надвисокочастотного акустелектронного резонатора, такі як добротність і робоча частота, впливають багато факторів, які залежать від конструктивних параметрів пристрою та якості матеріалів які використовуються при виготовленні. Такі фактори можна розподілити на дві групи по їх природі: електричні та акустичні. Для аналізу кожної групи із цих факторів потрібно застосувати окремі методи. Для покращення дослідження хвильових процесів в тонкоплівкових акустичних резонаторах необхідно використовувати методи теоретичного аналізу хвильових рівнянь п'єзо-акустики, які дозволяють вирахувати технічні характеристики резонаторів.

Електромагнітний вплив елементів конструкції може бути досліджений за допомогою еквівалентних схем.

Ключовою характеристикою резонатора є резонансна частота. У будь-якого резонатора розрізняють дві резонансні частоти: частоту паралельного резонансу  $f_p$  і частоту послідовного резонансу  $f_s$ . Для високо добротних резонансів ці частоти практично не розрізняються. Частоті  $f_s$ . Відповідає максимум модуля провідності  $|F|$  або мінімум модуля імпедансу  $|Z|$ ,  $f_p$  - навпаки. З математичної точки зору частоті  $f_s$  відповідає власна частота резонатора за умови коротко замкнутих електродів, з іншого боку  $f_p$  - власна частота резонатора за умови розімкнених електродів. [19]

Будь-який реальний коливальний процес завжди супроводжується втратами енергії. Поруч з омичними втратами, що пов'язані з кінцівкою товщини металевих електродів, основний механізм втрат пов'язаний з тим, що разом з робочим типом коливань (як правило, це ОАХ), в резонаторах може відбуватися цілий ряд коливань, що призводять до зменшення добротності резонатора. До таких коливань, для резонатора на ОАХ, відносяться перш за все зсувні об'ємні АХ,

хвилі Релея-Лемба та ін.

Втрати енергії кількісно характеризуються коефіцієнтом загасання або добротністю. Ці дві величини пов'язані однозначним співвідношенням. Чим більше коефіцієнт загасання, тим менше добротність (і навпаки).

В загальному вигляді добротність – це відношення повної енергії, що зберігається в резонаторі  $W_t$ , до енергії, розсіяною  $W_a$  в резонаторі за період коливання:

З іншого боку добротність – це властивість коливальної системи, яка визначає частотну смугу резонансу. Ця властивість широко застосовується для визначення добротності за експериментальними параметрами. Для електричного ланцюга набагато простіше виміряти амплітуду (напруги або струму), ніж потужність або енергію. Так як енергія і потужність пропорційна квадрату амплітуди осциляції, смуга на амплітудно-частотній характеристиці становитиме від піку, (приблизно на рівні -3 Дб). Однак існують й інші способи визначення добротності, про які буде розказано нижче.

В резонаторах на АХ втрати в першу чергу обумовлені загасанням акустичної хвилі, яка розповсюджується в матеріалах шарів, що утворюють резонатор. Математично загасання хвилі обумовлюється наявністю уявної частини в швидкості поширення хвилі. Швидкість хвилі в твердому середовищі визначається матеріальними константами даного середовища (коефіцієнтом щільністю і пружності головним чином). Якщо при вирішенні хвильових рівнянь додати хоча б в одну з цих констант невелику уявну частину – уявна частина швидкості хвилі з'явиться автоматично. Так зазвичай відбувається при теоретичному описі хвильових процесів в тонкоплівкових резонаторах. Уявна частина звичайно становить невелику частку від реальної частини, цю частку в літературі зазвичай прийнято вводити, що дорівнює приблизно "+", де значення  $Q_m$ , – механічна добротність матеріалу. Величини механічної добротності деяких матеріалів, що зазвичай застосовуються при конструюванні тонкоплівкових резонаторів на ОАХ.

Таким чином, теоретична гранична величина добротності одно-частотного тонкоплівкового акусто-електронного резонатору, в якому в якості активного п'єзоелектричного шару використовується нітрид алюмінію, визначається механічною добротністю цього матеріалу і в різних джерелах становить від 1500 до 2500 в залежності від особливостей технологічного процесу нанесення тонкої плівки А1N і від товщини цієї плівки (тобто від частоти, для якої призначений резонатор). Але численні фактори, присутні в будь-якій реальній конструкції резонатора, що не поз-воля досягти граничного теоретичного значення. На частотах 1 - 2 ГГц величина добротності досягає 1000 - 1500. З підвищенням частоти до 10 ГГц і вище добротність, що отримується експериментально, знижується до двохсот в кращих випадках.[20] Недивлячись на це, є можливість виробити тонкоплівковий акустоелектронний резонатор з високою добротністю порядку  $10^4$  -  $10^5$ . Для цього необхідно помістити резонатор на підкладку з матеріалу відповідною величиною механічної добротності (наприклад, лейко-сапфір  $Al_2O_3$ ) із забезпеченням (а не запобіганням) акустичного контакту резонатора з підкладкою (така конструкція називається НВАР). В даному випадку висока механічна добротність підкладки сприятиме збільшенню добротності всього резонатора. Але наявність акустичного контакту з товстою підкладкою неминуче супроводжується багатомодовістю, тобто в частотному спектрі резонатора є багато резонансів, близько розташованих один до одного по частоті. Для звичайних радіотехнічних додатків багатомодовість неприпустима, тому в FВАР резонаторах активна область акустично ізолювана від підкладки або акустичним відбивачем, або повітряною підкладкою.

Одним з найбільш об'єктивних якісних характеристик акустоелектронних резонаторів є показник якості FOM (3.2).

де, - ефективний коефіцієнт електромеханічного зв'язку,  $Q$  – добротність резонатора, що залежить від конкретної конструкції резонатора та застосовуючи в резонаторі матеріалів.

Чим вище величина FOM, тим якіснішим за своїми параметрами вважається резонатор. Величина визначається якістю (кристалічністю) активного п'єзо шару в резонаторі, а також співвідношенням товщини п'єзо шару і товщини електродів резонатора. Для визначення одного з найважливіших параметрів резонатору – ефективного коефіцієнта електромеханічного зв'язку – використовуються частоти паралельного  $f_p$  і послідовного  $f_s$  резонансу:

Можна відзначити, в деяких публікаціях множник в правій частині (3.3) відсутній, який дає менш точне та кілька завищене значення в порівнянні з точним варіантом формули (3.3).

При будь-якій зміні температури резонатора в загальному випадку незмінно змінюється його центральна частота. Зміна частоти кількісно характеризується температурним коефіцієнтом частоти:

де,  $T$  - температура,  $\nu$  - резонансна частота.

Застосовувана методика дозволяє при обчисленні температурного коефіцієнта частоти користуватись виразів (3.4) безпосередньо. Для цього центральна частота визначається викладеним вище способом для трьох значень температури – для  $T$ ,  $T - \Delta T$  і  $T + \Delta T$ , де  $\Delta T$  – невелика зміна температури, наприклад 0,5 °С. Потім за цим значенням за допомогою числового диференціювання визначається температурний коефіцієнт частоти:

Вплив температури на резонансну частоту обумовлено трьома основними причинами:

1. Зміна щільності матеріалу.
2. Зміна товщини шару.
3. Зміна матеріальних констант середовища (компонентів тензорів пружних, п'єзоелектричних і діелектричних постійних).

Формально можна записати в такому вигляді:

де, – складові температурного коефіцієнта частоти, що обумовлені тільки першою, другою і третьою причинами відповідально.

Описані методики розрахунку дозволяють легко враховувати впливав температури на резонансну частоту через перераховані три фактори, як окремо, так і через все в сукупності (і навіть через кожну комбінацію з двох факторів).

Температурні зміни матеріальних констант описуються відповідними температурними коефіцієнтами цих констант. Зміна щільності виражається через набір лінійних коефіцієнтів теплового розширення за всіма трьома просторовими координатами (або через один коефіцієнт об'ємного теплового розширення). Зміна товщини описується коефіцієнтом лінійного теплового розширення вздовж напрямку товщини.[21 с. 14-22]

В ідеальному випадку необхідно досягти кращих значень всіх перерахованих числових параметрів резонатора, але на практиці часто при поліпшенні одних характеристик погіршуються інші. При цьому які саме параметри важливі для конкретного пристрою визначається сферою його застосування. Використовуючи методи розрахунку основних параметрів резонатора, описані далі, можна оптимізувати конструкцію таким чином, щоб досягти прийнятних для конкретного пристрою характеристик.

### 3.2. Методика та алгоритми розрахунку основних параметрів акусто-електронних резонаторів.

Для виявлення методу моделювання акустоелектронних тонкоплівкових резонаторів, який би дозволяв найбільш точно розраховувати основні параметри пристрою по заданій конструкції, був проведений порівняльний аналіз основних теорій і способів розрахунку.

На даний момент існують три основні методи теоретичного уявлення багат шарового тонкоплівкового акустоелектронні резонатора на ОАХ – це представлення за допомогою еквівалентної схеми, за допомогою відрізків передавальних ліній і розрахунок шляхом вирішення системи рівнянь п'єзоакустики, які описують хвильові процеси у всіх шарах конструкції.

Чисельний розрахунок шляхом вирішення системи рівнянь п'єзоакустики, що описують хвильові процеси у всіх шарах конструкції, може бути виконаний як в одновимірному поданні (модифікована теорія Бенеша і Навотного) так і в 3-D поданні, використовуючи при цьому метод скінченних елементів (МСЕ).

### 3.3 Еквівалентна схема генератора на ОАХ.

Еквівалентна схема базової моделі Батерворта-ван Дайка містить тільки чотири елементи (Рис. 3.1).

На Рис.3.1  $C_0$  - статична ємність резонатора, як є реальною фізичною величиною. Її можна як виміряти, так і розрахувати діелектричним властивостями шару (шарів) між електродами і по геометрії активної зони пристрою ( відстань між електродами, площею). Величини  $R_m$ ,  $C_m$ ,  $L_m$  – еквівалентні динамічний опір, ємність і індуктивність резонатора відповідно, які моделюють



його резонансні властивості. Це саме еквівалентні величини, неіснуючі реально, тому їх неможливо визначити в рамках самої моделі. Витягти ці значення можна тільки шляхом порівняння графіка провідності даної схеми з графіком провідності резонатора, що отримано експериментально, або за допомогою більш точної теоретичної моделі.

Рис 3.1: Еквівалентна схема базової моделі Батерворта - ван Дайка  
Провідність еквівалентної схеми, зображеної на Рис. 3.1, на частоті  $w = 2\pi f$  можна вирахувати за допомогою співвідношення:

Уявна і дійсна частини провідності розраховуються наступним чином:

Типовий вид залежностей від частоти дійсної і уявної частини провідності, отриманих за формулами (3.8), показаний на рис. 3.2.

Рис 3.2: Залежності дійсної і уявної частин провідності еквівалентної схеми (Рис. 2.1) від частоти для наступних значень параметрів схеми:  $R_m = 0,5$  Ом,  $C_m = 0,12$  пФ,  $L_m = 0,05$  мкГн, дійсна частина провідності має максимум:

Уявна частина динамічної провідності (без  $\omega C_0$ ) на цій частоті дорівнює нулю.

Цю частоту називають частотою після-попереднього резонансу або резонансною частотою. Частоту, при якій сумарна уявна частина провідності (включаючи  $\omega C_0$ ) проходить через нуль від низу до верху називають анти резонансною частотою або частотою паралельного резонансу. Для малих значень опору  $R_m$  частота паралельного резонансу розраховується за формулою: Абсолютна величина провідності на частоті паралельного резонансу - мінімум, а на частоті послідовного резонансу має максимум. Абсолютна величина

імпедансу  $Z_{BVD} = 1 / Y_{BVD}$  - навпаки, проходить через мінімум на частоті послідовного резонансу  $\omega_s$ , і через максимум на частоті паралельного резонансу  $\omega_p$ . [21 с.13-29]

Знаючи частоти послідовного і паралельного резонансів за формулою (3.3), можна визначити ефективний коефіцієнт електромеханічного зв'язку. Для залежностей, показані на Рис. 3.2,  $f_s = 2,0547$  ГГц,  $f_p = 2,1034$  ГГц і  $k_{eff}^2 = 0,0558$  (часто дана величина вказується у відсотках, яка в даному випадку відповідає 5,58%).

У досить вузькій смузі частот, поблизу резонансу, залежність уявної і дійсної частин провідності реального резонатора на ОАХ дуже схожі на залежності, показані на рис. 2.2. Це дає можливість визначити параметри еквівалентної схеми  $R_m$ ,  $C_m$ ,  $L_m$  і  $C_0$ , по кривих залежностей уявної та дійсної частини від частоти, отриманими будь-яким способом. Це дозволяє використовувати дану еквівалентну схему в якості доповнення до других теорій, яка дозволяє отримати ці криві, а також будувати еквівалентну схему макета резонатора виходячи з експериментальних даних.

Визначивши з графіка максимальне значення активної провідності, можемо отримати еквівалентний динамічний опір  $R_m$  за допомогою виразу (3.10).

Для добротності коливального контуру, утвореного елементами  $R_m$ ,  $C_m$ ,  $L_m$  справедливе також і в наступному співвідношенні:

Визначивши з графіка величину  $R_m$  (за допомогою (2.10)), (безпосередньо),  $Q$  (за допомогою (3.1)), можна за допомогою першого виразу резонансу (3.12) отримати величину динамічної індуктивності:

В результаті, використовуючи (3.9), можна визначити величину динамічної ємності:

Статична ємність  $C_0$  може бути визначена за допомогою (3.12). Як зазначалося раніше, статичну ємність реального резонатора можна розглядати також за його геометрією і діелектричними властивостями:

де,  $l_i$  - товщина кожного з  $m$  шарів між електродами;  $\epsilon_i$  - відносна діелектрична проникність цих шарів,  $= 8.854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м діелектрична проникність вільного простору,  $A$  - площа електрода.

Якщо статична ємність розраховується за допомогою (3.16), то (3.12) можна використовувати для визначення анти резонансної частоти. [22]

Модель Батерворта-ван Дайка досить добре описує реальний резонатор, якщо точно визначені параметри еквівалентної схеми. Як вже зазначалося, визначити ці параметри в рамках самої моделі неможливо. У цьому полягає основний недолік моделі. Другий недолік полягає в тому, що у еквівалентній схемі, зображеної на Рис. 3.1, є тільки одна резонансна (і антирезонансна) частота, в той час як у реального резонатора в широкому діапазоні частот є багато резонансів,

що даються гармоніками вищих порядків (при певних умовах можуть мати також і паразитні резонанси). Ці гармоніки можуть бути отримані з схеми, зображена на рис. 2.1, якщо в неї додати кілька гілок  $R_m$ ,  $C_m$ ,  $L_m$  підключених паралельно одна до одної (значення  $C_0$  повинно бути одне для всіх цих гілок). Величини  $R_m$ ,  $C_m$ ,  $L_m$  для кожної гілки необхідно визначати описаним вище способом для кожного резонансу.

Еквівалентну схему на рис. 3.1 можна також доповнити різними елементами, які моделюють паразитні елементи монтажу конструкції резонатора, такі як ємності, індуктивності, опору, які неодмінно присутні в реальному конструкції. Можна знайти різні варіанти такої моделі, що називають модифікацією моделлю Батерворта-ван Дайка (ВуД). На рис. 3.3 представлений один з варіантів еквівалентної схеми модифікованої моделі Батерворта-ван Дайка.

Рис 3.3: Один з варіантів еквівалентної схеми модифікованої моделі Батерворта - ван Дайка  
В схемі  $R_3$  – це паразитний опір електродів, підведучих доріжок, контактних майданчиків і зондів, за допомогою яких резонатор підключається до виміральної апаратури;  $C_4$  - послідовна ємність, через яку підключаються нижні електроди в планарній конструкції резонатора ( коли підводячи доріжки верхніх і нижніх електродів розташовуються в верхній одній площині);  $L_4$  – паразитна індуктивність підходящих доріжок;  $R_6$  - паразитний опір статичному ємності  $C_0$ ;  $R_p$  – еквівалентний опір, що моделює як можливі омичні шунтуючі втрати, так і акустичні втрати, зумовлені, наприклад, хвилями Лемба, які розповсюджуються уздовж поверхонь шарів;  $C_p$  – паразитна шунтуюча ємність елементів монтажу.

Будь-який з додаткових елементів може бути легко видалений з схеми шляхом завдання його величини, яка дорівнює нулю (окрім  $R_p$  і  $C_4$ ).

Елементи  $R_p$  і  $C_4$  вимикаються зі схеми шляхом установки, навпаки, дуже великий їх величини, наприклад  $10^9$  (пФ або Ом відповідно).

Провідність еквівалентної схеми, зображена на рис. 3.3, розраховується за наступною формулою:

У разі необхідності в еквівалентну схему домодифікації моделі Батерворта - ван Дайка можуть бути додані і інші додаткові елементи. [23]

**Висновки.**

Таким чином, модель Батерворта-ван Дайка дає точний опис резонатора будь-якої конструкції, в тому числі на ОАХ, але за умови, вибору оптимальних компонентів. Підібрати номінали елементів можна тільки шляхом порівняння АЧХ, розрахованої для еквівалентної схеми, з аналогічною характеристикою, отриманої іншим незалежним способом. Таким чином, ця модель непридатна для попередніх розрахунків, необхідних при конструюванні резонатора, оскільки модель дозволяє успішно отримати точне рішення задачі тільки в тому випадку, якщо відповідь відома заздалегідь в деякому наближенні.

Для розрахунків, на які можна орієнтуватися при конструюванні, необхідні більш складні теоретичні моделі.

#### РОЗДІЛ IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

##### **4.1 Числовий розрахунок параметрів ОАХ, які розповсюджуються в багат шарових тонкоплівкових п'єзо еклетичних структурах.**

Для поширення об'ємних акустичних хвиль необхідна наявність п'єзоелектричного середовища з товщиною більше, ніж половина довжини хвилі. Гарно зарекомендувала теорію для пошуку параметрів об'ємно акустичних хвиль в багат шарових тонкоплівкових структурах є модифікована теорія Навотного-Бенеша. Дана теорія заснована на точному розв'язанні рівнянь, яке описує хвильові процеси в матеріалах шарів, із яких складається резонатор, з використанням коректних граничних умов на всіх межах шарів. Одне обмеження цієї теорії – це те, що вона дозволяє отримувати рішення хвильових рівнянь лише в одновимірному просторі. Товщини шарів в таких конструкціях можуть варіюватися від одиниць до десятків і сотих часток мікрометра, а поперечні розміри – десятки і сотні мікрометрів. В зв'язку з цим, поперечні розміри можна вважати нескінченно великими, а крайовими ефектами знехтувати, – умови одновимірного наближення практично завжди виконуються для таких конструкцій. Багат шарова структура з N шарів схематично представлена на рис. 4.1. Вектор поширення об'ємно акустичної хвилі співнаправлена з віссю x.

Рис. 4.1 Робоча система координат

В одновимірному електростатичному приближенні рівняння записується саме в такому вигляді: Рівнянні (4.1) і (4.2) є результируючою версією основних рівнянь п'єзо акустики. В яких  $u_k$  – механічне зміщення вздовж осі  $x_1$ ,  $\varphi$  – електричний потенціал, тензор четвертого рангу пружних складових, тензор третього рангу п'єзо електричних складових, -тензор другого рангу діелектричної проникності середовища,  $\rho$  – щільність середовища, - час. Незважаючи на те, що в рівнянні входить лише координата  $x_1$ , вираз містить всі три просторові координати зсуву  $u_k$ , це дозволяє розглянути як ОАХ, так деякому наближенні інші хвилі.[24]

Ці диференціальні рівняння п'єзоакустики описують рух частинок в п'єзоелектричному середовищі та пов'язане з рухом електростатичне поле у вільному від зарядів кристалічному п'єзоматеріалі. Ця система включає в себе рівняння напруженості, матеріальне рівняння Максвела для п'єзоелектричного кристала, динамічні рівняння середовища, рівняння електростатичного приближення.

Для моделювання втрат поширення хвилі деякі із матеріальних констант середовища повинні мати коефіцієнти, що відповідають за затухання акустичної хвилі в матеріалі (від 0,1% до 1% від самої величини). В цій теорії найбільш зручно включити уявну частину в щільність середовища. Уявна частина щільності буде забезпечувати наявність уявної частини амплітуди швидкості хвилі, тобто згасання, незалежно від орієнтації кристала та класу його симетрії. Оскільки акустичні властивості матеріалів можуть сильно відрізнятися, коефіцієнт загасання для кожного матеріалу підбирається окремо.

Рішення для потенціалу знаходиться в вигляді:

де,  $\varphi_1$  і  $\varphi_0$  – невідомі константи.

Після підстановки значення (4.3) в систему рівнянь (4.1), та проведення спрощення отримаємо наступу систему алгебраїчний рівнянь:

Вирішення знаходиться у вигляді синусоїдальної хвилі, що розповсюджується вздовж  $x_1$ :

Після підстановки (4.6) в (4.4), певних спрощень і скорочень отримаємо систему лінійних рівнянь:

Систему рівнянь можна записати у більш раціональному вигляді, саме в такому вигляді:

Система рівнянь записана по відношенню до амплітуд  $I$  відповідно система рівнянь має рішення, відмінне від нуля, якщо значення матриці дорівнює нулю.

Отже, отримуємо рівняння третього ступеня щодо  $\hat{c}$ , тобто для  $\rho \theta^2$ . Три корені даного рівняння дають три власних значення ( $n=1..3$ ), кожному з яких відповідає значення швидкості  $\hat{c}^{(n)}$  (або прискорення)

Кожному значенню швидкості відповідає 3 значення амплітуди, ( $k=1..3$ ). Вони знаходяться при підстановці значень швидкості в систему (1.9). Так як система рівнянь (1.9) однорідна, то рішенням будуть власні вектори із точністю

до множника. Це дозволяє нормувати всі вектори та оперувати вже безрозмірними нормалізованими величинами. Три власних вектора є повним базисом і ортогональні один до одного. Тобто:

де, - символ Кронекера

Загальне вирішення системи рівнянь (4.4) знаходимо у вигляді:

де,  $u_k$  - це лінійна комбінація трьох об'ємних хвиль, отриманих раніше з рівняння (4.9):

У цій системі рівнянь шість невідомих коефіцієнтів лінійної комбінації  $A^{(n)}$  і  $B^{(n)}$ . Оскільки розглядається поширення хвиль в п'єзоелектричному середовищі, до шести невідомих додається ще два коефіцієнтів  $\varphi_0$  і  $\varphi_1$  з рівнянні поширення потенціалу.

Для знаходження невідомих параметрів необхідно підставити в систему вісім виразів для граничних умов: три компоненти механічного зміщення  $u_i$ , три нормальні компоненти тензора напруги  $T_i$ , електричного потенціалу  $\varphi$  для координати  $x_1$  на границі пластин і нормаль компонента електричного зміщення.

Після підстановки  $x_1 = 0$  в (4.3), (4.15) - (4.16) отримуємо вісім рівнянь для визначення:  $A^{(n)}$ ,

Після вирішення даної системи, враховуючи вирази нормування та ортогональності, можна знайти необхідні коефіцієнти, використовуючи такі вирази:

Ці коефіцієнти можуть бути отримані для будь-якої координати  $x_1$ , якщо вони відомі для початкової координати  $x_0=0$ .

Розглянемо нескінченний в поперечному напрямку шар товщиною  $l$ . Всі значення  $u_j$ ,  $T_{1j}$ ,  $D_1$  і  $\Phi$  на кордоні шарів для координати  $x = l$  можуть бути представлені як лінійна комбінація даних змінних для координати  $x_i = 0$  в матричному вигляді (4.24):

Матриця  $M$  розмірністю  $8 \times 8$  - ця матриця переходу для одного шару. Дана матриця дозволяє розрахувати параметри, ( $j = 1..3$ ), і  $\Phi$  для однієї поверхневого шару, знаючи ці параметри для іншого.

Елементи матриці  $M$  визначаються рішенням хвильових рівнянь:

В рівняннях (4.25) – (4.31), (номера координатних осей),  $Z$  (номера власних рішень хвильових рівнянь). Змінна – коефіцієнт електромеханічного зв'язку п'єзоелектричного середовища ( $k^{(n)} = 0$  для неп'єзоелектричних матеріалів). Якщо товщина шару прямує до нуля, матриця прагне до одиничної.

Послідовно обчисливши параметри отримаємо значення цих величин для багат шарової структури (рис 1.2), а матрицю переходу можна знайти перемноживши послідовно матриці переходу для кожного шару:

Шари багат шарової структури, які розраховуються можуть бути будь-якими, але якщо шар використовувати як електрод, то його матриця переходу відрізнятиметься описаної вище, оскільки вона повинна включати умови для опису еквівалентної поверхні. На рис. 4.2 приведена схема підключення пристрою до джерела струму.

Рис. 4.2 Схема підключення пристрою до джерела струму.

Ці теорії дозволяють розрахувати потенціал і зміщення в кожній точці  $x_i$  багат шарової структури, що складається з будь-якої кількості шарів, що можуть бути виконані з будь-якого матеріалу для ОАХ. Ці теорії зручні для математичного моделювання тонкоплівкових акустоелектронних резонаторів на об'ємно акустичних хвилях. Недоліком теорії є її одновимірності, проте вона використовується для розрахунку об'ємно акустичних хвиль в багат шарових розрахунках параметрів і структурах пристроїв на об'ємно акустичних хвилях в першому наближенні, без урахування поперечних розмірів шарів.

#### 4.2 Метод скінченних елементів для вирішення рівнянь п'єзо-акустики.

Методи аналізу хвильових процесів для кожного типу хвиль приймаються в залежності від природи хвиль. Окрім того, при більшій складності конструкції пристрою, методи можуть стати просто незастосовні, або будуть потребувати істотного доопрацювання.

При розробці акустоелектронних пристроїв, наприклад резонаторів, необхідно мати уявлення про комплексні акустичні процеси, які відбуваються в структурі, враховуючи при цьому розміри і особливості конструкції. Широке поширення для цих цілей отримав метод кінцевих елементів. В основі методу скінченних елементів МСЕ лежить розділення об'єму на симплекси – обчислення взаємодії між ними в залежності від граничних умов і кінцеві елементи KE.

Приводиться така умовна послідовність етапів для застосування МСЕ:

- суцільне середовище розбивається уявними площинами на деяку кількість елементарних обсягів (KE);
- передбачається, що елементи пов'язані між собою у вузлових точках, розташованих на їх кординах. Основними невідомими є переміщення цих точок;
- вибирається система функцій, що однозначно визначає переміщення всередині кожного кінцевого елемента через переміщення вузлових точок;
- функції переміщень однозначно визначають деформацію всередині елемента через вузлові переміщення. Ці деформації при відомих пружних властивостях та початкових деформаціях елемента дозволяють визначити напруги як на його кордонах так і в середині елемента;
- визначається система сил, зосереджених у вузлах, і зрівноважуючої напруги на кордоні і деякі розподілені навантаження, а потім записуються відповідні співвідношення.[25 с.13-20]

Варто відзначити те, що найпершим кроком є в введення осей координат. В методі скінченних елементів, як правило, розрізняють локальні та глобальні системи координат, а також системи координат з напруженням в вузлових точках. Глобальні осі координат задаються для всієї конструкції в цілому, яка складається з безлічі кінцевих елементів. Локальні (або елементні) осі координат пов'язані з окремими елементами. Оскільки елементи в загальному випадку можуть

бути по різному орієнтовані одна відносно іншої, то локальні осі в загальному випадку будуть мати різну орієнтацію.

За останній час МСЕ набув широкого розповсюдження, але найчастіше його застосовують для вирішення завдань механіки. Застосування метода скінченних елементів для опису п'єзоакустичних процесів вперше описано в роботі, автором були знайдені аналогії між електричними і механічними властивостями середовища, що дозволило об'єднати їх в єдине співвідношення.

Для переходу до кінцево-елементного формулювання від диференціальних хвильових рівнянь п'єзо-акустики необхідно записати ці вирази в альтернативному варіаційному формулюванні. Як відомо, такий запис можливий для більшості завдань, що записані у вигляді диференціальних рівнянь.

Найчастіше для переходу до варіаційного формулювання використовується метод переміщень. Даний метод еквівалентної мінімізації повної потенційної енергії системи, виражений через поле переміщень. Таким чином основні рівняння п'єзо-акустики можна записати в альтернативно варіаційному формулюванні наступним чином:

де,  $F$  - вектор об'ємної сили,  $T$  - вектор сили, що діє на поверхню,  $P$  - вектор точкової сили,  $\sigma$  - об'ємний заряд,  $\sigma_s$  - поверхневий заряд,  $Q$  - точковий заряд,  $V$  - об'єм середовища,  $S$  - площа поверхні,  $\{u\}$  - вектор зсувів,  $\phi$  - потенціал. Верхній індекс  $T$  означає транспонування.

У кінцево-елементному формулюванні механічне зміщення  $\{u\}$  і електричного потенціал  $\phi$  для кожного елемента записуються через відповідні вузлові ступеня свободи за допомогою функції форми:

де,  $i$  - вузлові невідомі. Використовуючи рівняння (4.34) і (4.35) вектор пружних деформацій і вектор електричного поля  $\{E\}$  запишуться як:

де,  $B_u$  і  $B_\phi$  матриці, які складені з градієнтів функцій форми для; Тоді тензор механічної напруги  $T$  і електричне зміщення  $D$  можна записати як:

Тоді зовнішні впливи можна описати як:

Підставивши вирази (4.36) - (4.41) в варіаційне рівняння (4.35), отримаємо два рівняння рівноваги в матричному вигляді:

де,  $M$  - матриця маси,  $K$  - матриця жорсткості елемента,  $K_p$  і  $K_e$  - п'єзоелектричні матриці "жорсткості",  $\epsilon$  - діелектрична матриця "жорсткості",  $\{F\}$  - еквівалентні вузлові сили,  $\{Q\}$  - еквівалентні вузлові заряди, які виражаються безпосередньо з рівняння (4.43).

Для обмеження рішення на резонансних частотах, в рівняння руху зазвичай вводять демпфірування, що може мати різну природу. В цьому випадку воно вводиться за допомогою матриці коефіцієнтів  $\{\alpha\}$

Використовуючи матриці жорсткості (4.38) - (4.41) та систему рівнянь (4.42) можна записати єдине матричне співвідношення:

Ця система дозволяє зробити оцінку внеску кожного КЕ в глобальну матрицю маси в механічну, діелектричну і в п'єзоелектричну матрицю жорсткості. Вирішуючи дану систему рівнянь, отримаємо розподіл значень ступенів свободи, трьох компонент зсуву  $u_i$  і потенціалу  $\phi$  в залежності від граничних умов.[26]

**Висновки.**

Після проведеної практично-теоретичної роботи порівняльного аналізу методів, які дозволяють зробити розрахунок основних параметрів акусто-електричних хвиль в плівкових середовищах, було продемонстровано, що при наявності досить складних граничних умов на них накладаються значні обмеження, а деякі й зовсім не можуть бути застосовні. Окрім того, ні одна із методик не дозволяє оцінити одночасно всі хвилі, що можуть бути збуджені в багат шарових структурах складної конфігурації, які є базою тонкоплівкових резонаторів, та оцінити вплив тих чи інших хвиль на характеристики і параметри пристрою.

Метод КЕ дозволяє побудувати модель багат шарової п'єзоелектричної структури та отримати параметри комплексного акустичного процесу, який відбувається в багат шаровій тонкоплівковій структурі з врахуванням поперечних розмірів кожного шару. Дані властивість мають дуже важливе практичне застосування для розрахунку основних параметрів НВЧ тонкоплівкових акусто-електронних резонаторів.

Доведено, що:

- використання верхнього електрода, який повністю покриває п'єзо плівку, дозволяє в значному степені запобігати виникненню зсувних хвиль хвиль Релея - Лемба в конструкції резонатора. При використанні планарної конструкції і резонатора такого ж ефекту можна домогтися при витравлюванні п'єзоелектрика в зоні між заземлюючим і сигнальним електродом;
- формування «сходинок» по краю верхнього електрода дозволяє локалізувати акустичну енергію всередині активної області резонатора;
- використання асиметричного акустичного відбивача дозволяє підвищити добротність резонатора на 5% - 50% в залежності від частоти і форми електрода;
- в якості матеріалу електродів необхідно вибирати матеріали з хорошою акустичною добротністю і малим питомим опором.

#### ВИСНОВКИ

Проведені в роботі експериментальні і теоретичні дослідження дозволяють сформулювати ряд висновків і пропозицій з математичного моделювання хвильових процесів в багатошарових тонко-плівкових п'єзоструктурах і поліпшенні конструкції НВЧ тонко-плівкових акусто-електронних резонаторів для оптимізації параметрів пристрою.

В області теоретичного розрахунку параметрів тонко-плівкових акусто-електронних резонаторів показано:

1. Для вирішення хвильових рівнянь п'єзо-акустики, які описують утворювальні процеси в тонко-плівкових багатошарових п'єзо-структурах, МСЕ допустимо використовувати для аналізу параметрів НВЧ і математичного моделювання тонко-плівкових акусто-електронних резонаторів.

2. Теоретично підтверджено, що на відміну від одновимірної теорії в тонко-плівковому акусто-електронному резонаторі збуджуються не тільки ОАХ, що є робочими в розглянутих пристроях, а й інші типи АХ, включаючи хвилі Релея-Лемба і повздовжні ОАХ. Це дозволяє модифікувати конструкцію тонко-плівкового резонатора та досягти кращих показників кінцевого пристрою.

3. Теоретично підтверджено, що в розрахунках тонко плівкових акусто-електронних резонаторів необхідно врахувати не тільки процеси, які мають акустичну природу, а й омичні втрати контактних майданчиків, індуктивності підвідних доріжок, шунтуючі і поверхневі ємності конструкції. При застосуванні цього методу розрахунків основних параметрів тонко плівкових резонаторів можемо отримати за допомогою теоретичного аналізу характеристик, практично і характеристиками пристрою, що з великою долею ймовірності будуть співпадати.

В області створення і розробки багатошарових тонко-плівкових резонаторів при використанні математичного моделювання було отримано ряд технічних рішень для покращення характеристик пристроїв:

1. Математичне та теоретичне моделювання показали, що підбір акустичного відбивачі в тонко-плівкових резонаторах дозволяє знизити втрати енергії за рахунок збереження енергії зсувних акустичних коливань в активній області резонатора, тим самим, підвищується добротність  $Q$  пристрою. Але при цьому зростають й вимоги до точності технології виготовлення пристрою. При значному відхиленні матеріальних констант матеріалів шарів або товщини шарів створеного пристрою від розрахованих теоретично, добротність пристрою різко впаде.

2. Застосування комбінованого аналізу з використанням методу скінченних елементів моделі і модифікованої еквівалентної схеми Батерворта-ван Дайка дозволяє теоретично розцінити вплив омичних втрат в контактних майданчиках на характеристику резонатора. Теоретичний аналіз показав, що збільшення омичного опору доріжок всього на 1 Ом призводить до зниження величини добротності на величину від 60% до 75% для різних частот, причому, чим вище частота, тим сильніше падає добротність;

3. Використання методу скінченних елементів моделювання дозволило проаналізувати і оцінити вплив технологічних похибок на основні параметри резонаторів різних конструкцій. Це дозволяє оцінити пристрої при експериментальних дослідженнях.

## Схожість

Схожість із джерелами з Інтернету

33

1	<a href="http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/conferences/2018/2018-118-121.pdf">http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/conferences/2018/2018-118-121.pdf</a>	2.01%
2	<a href="https://www.inter-nauka.com/uploads/public/1542358992520.pdf">https://www.inter-nauka.com/uploads/public/1542358992520.pdf</a>	1.65%
3	<a href="http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/conferences/2017/2017-247-251.pdf">http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/conferences/2017/2017-247-251.pdf</a>	2 Джерело 1.51%
4	<a href="http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/Plagiat/2018/Uni_Rep_Horlachov_O_14Dec2018.pdf">http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/Plagiat/2018/Uni_Rep_Horlachov_O_14Dec2018.pdf</a>	1.26%
5	<a href="https://ukrbukva.net/115824-Elektronika-i-mikroprocessornaya-tehnika.html">https://ukrbukva.net/115824-Elektronika-i-mikroprocessornaya-tehnika.html</a>	0.88%
6	<a href="https://все-знания.рф/work/424287/Cifrovij-sintez-chastoti">https://все-знания.рф/work/424287/Cifrovij-sintez-chastoti</a>	19 Джерело 0.84%
7	<a href="http://ni.biz.ua/3/3_11/3_1152_sintezatori-chastoti.html">http://ni.biz.ua/3/3_11/3_1152_sintezatori-chastoti.html</a>	0.71%
11	<a href="http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&amp;I21DBN=UJRN&amp;P21DBN=UJRN&amp;IMAGE_FILE_D">http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&amp;I21DBN=UJRN&amp;P21DBN=UJRN&amp;IMAGE_FILE_D</a>	3 Джерело 0.38%
13	<a href="https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%96_%D0%9B%D0%B5%D0%BC%D0%B1%D0%B0">https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%96_%D0%9B%D0%B5%D0%BC%D0%B1%D0%B0</a>	0.12%
15	<a href="http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/Mastertheses/2018/Bitov_M.pdf">http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/Mastertheses/2018/Bitov_M.pdf</a>	0.11%
16	<a href="http://ed.kpi.ua/index.php/science/masters_thesis">http://ed.kpi.ua/index.php/science/masters_thesis</a>	0.08%
17	<a href="http://intranet.tdmu.edu.ua/data/kafedra/internal/onkologia/classes_stud/uk/med/lik/ptn/%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B...">http://intranet.tdmu.edu.ua/data/kafedra/internal/onkologia/classes_stud/uk/med/lik/ptn/%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B...</a>	0.07%

Схожість по Бібліотеці акаунту

13

8	Студентська робота ID файлу: 8573269 Institution: Lviv Polytechnic National University	3 Джерело 0.66%
9	Купчик ПЗ РТ-51-2 ID файлу: 1000084267 Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polyte	3 Джерело 0.59%
10	Студентська робота ID файлу: 106392 Institution: National University of Life and Environmental Science	3 Джерело 0.45%
12	Ляшко_РК-51 ID файлу: 1000089194 Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.27%
14	2019_Закрева Олександр_ Система електрозабезпечення приватн ID файлу: 1000783889 Institutio	2 Джерело 0.11%
18	ДИПМАГ_ФЕДЯ (2) ID файлу: 5657995 Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Instit...	0.07%