

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра електронних приладів та пристроїв

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 681.327

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Л. Д. Писаренко

“ ___ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності:

171 –Електроніка

спеціалізації:

«Електронні прилади та пристрої»

на тему: **«Дослідження та моделювання функціональних
пристроїв на поверхневих акустичних хвилях»**

Виконав:

студент 6 курсу, гр. ДЕ-61м **Бітов Мирослав Валерійович** _____

Науковий керівник:

Доцент, канд. техн. наук., с.н.с.

Жовнір М.Ф. _____

Нормоконтроль:

Доцент, канд. техн. наук., с.н.с.

Жовнір М.Ф. _____

Рецензент:

Доцент кафедри мікроелектроніки ФЕЛ,

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»,

канд. техн. наук., с.н.с.

Іващук А. В. _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2018

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет _____ Електроніки _____

Кафедра _____ Електронні прилади та пристрої _____

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 171 – Електроніка (Електронні прилади та пристрої)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

_____ Л.Д. Писаренко

«__» _____ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Бітову Мирославу Валерійовичу

1. **Тема дисертації** : «Дослідження та моделювання функціональних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях»

і науковий керівник дисертації Жовнір Микола Федорович, к.т.н., с.н.с.
затверджені наказом по університету від «29» січня 2018 р. №310-с.

2. **Строк подання студентом дисертації**: _____

3. **Об'єкт дослідження**: Функціональні пристроїв на поверхневих акустичних хвилях. Пасивна радіомітка на ПАХ.

4. **Предмет дослідження**: На основі дослідження науково-технічної літератури по функціональним пристроям на поверхневих акустичних хвилях провести розрахунок параметрів основних елементів, на прикладі пасивної радіомітки на ПАХ, з наступними вихідними даними: нижня та верхня границі смуги пропускання: $f_H = 430 \text{ МГц}$ та $f_B = 440 \text{ МГц}$; кількість частот

кодування – 5; фазова швидкість ПАХ $v = 3488 \text{ м/с}$ (для звукопроводу з ніобіту літію YZ-зрізу); тривалість сигналу радіозапиту $\tau = 1 \text{ мкс}$.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Анотація; вступ; огляд науково-технічної літератури по функціональним пристроям на ПАХ; теоретичні відомості по конструкції і принципу дії пасивної радіомітки на поверхневих акустичних хвилях, системам ідентифікації з пасивною радіоміткою та методиці розрахунку ліній затримки ПАХ; моделювання та розрахунок основних елементів радіомітки на ПАХ; технологія виготовлення функціональних пристроїв на ПАХ; висновки; перелік використаної науково-технічної літератури; складальне креслення моделі радіомітки на ПАХ; креслення блок-схеми технології виготовлення функціональних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Складальне креслення радіомітки на поверхневих акустичних хвилях; креслення технологічного процесу виготовлення функціональних пристроїв на ПАХ; плакати з рисунками, графіками та формулами.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

1. Бітов М.В., Жовнір М.Ф., Писаренко Л.Д., «Ідентифікатор об'єкта на поверхневих акустичних хвилях» »/ 10-та конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки», 6-7 квітня 2016 року.
2. Бітов М.В., Жовнір М.Ф., «Підсилювально-вибірковий блок для вимірювальних перетворювачів на ПАХ» »/ 11-та конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки», 6-7 квітня 2017 року.
3. M. F. Zhovnir, M. V. Bitov. «SAW-SENSORS FOR PHYSICAL PARAMETERS MEASUREMENT» / XVII INTERNATIONAL YOUNG SCIENTISTS' CONFERENCE ON APPLIED PHYSICS, May, 23-27, 2017, Kyiv, Ukraine.

4. M.V. Bitov, M.F. Zhovnir, «PASSIVE RFID-MARK AT SURFACE ACOUSTIC WAVES» /XII INTERNATIONAL CONFERENCE “ELECTRONICS AND APPLIED PHYSICS” October 19-22, 2016, Kyiv, Ukraine.
5. M.F. Zhovnir, L.D.Pysarenko, M.V. Bitov, «ACOUSTOELECTRONIC TRANSDUCERS OF DISPLACEMENTS WITH CONTACTLESS SENSITIVE ELEMENTS» » / XIII INTERNATIONAL CONFERENCE “ELECTRONICS AND APPLIED PHYSICS” October 24-27, 2017, Kyiv, Ukraine.
6. Бітов М.В., Жовнір М.Ф., Писаренко Л.Д., Плешка Т.Є., «Акустoeлектронні перетворювачі з безконтактними чутливими елементами», ISSN 1811-4512. ElectronCommun, 2017, vol. 22, №3.
7. М.Ф. Жовнір, М.В. Бітов, Л.Д. Писаренко, «Вимірювальні перетворювачі мікропереміщень та тиску на поверхневих акустичних хвиль», ISSN 1811-4512. ElectronComm 2016, Vol. 21, №4(93).
8. Бітов М.В., Жовнір М.Ф., Сітор С.В., «Вимірювання амплітудно-частотних характеристик гучномовців за допомогою програмного пакету ARTA» »/ 12-та конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки», 19-20 квітня 2018 року .
9. Юров О.В., Бітов М.В., Жовнір М.Ф. Радіомітка на поверхневих акустичних хвилях. / XIII Всеукраїнська наукова конференція студентів і молодих вчених «Молодь: освіта, наука, духовність». – 2016. 12-14 квітня 2016, 2с.
10. Ружицький Д.В., Бітов М.В. Фільтр на поверхневих акустичних хвилях. /XII Всеукраїнська наукова конференція студентів і молодих вчених «Молодь: освіта, наука, духовність». – 2015. 22 квітня 2015, 2с.
11. Патент UA № u2016 06028, 10.05.2017. Датчик для вимірювання кутової швидкості об’єктів, Бюл. № 9, Жовнір М.Ф., Писаренко Л.Д., Іващук А.В., Олійник О.О., Бітов М.В., Плешка Т.Є., Законов Є.С.

8. Дата видачі завдання: 08.02.2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання по магістерській дисертації	08.02.2018	
2	Огляд та аналіз науково-технічної літератури по пристроям на поверхневих акустичних хвилях	10.03.2018	
3	Теоретичні відомості по конструкції і принципу дії пасивної радіомітки на поверхневих акустичних хвилях, системам ідентифікації з пасивною радіоміткою та методиці розрахунку ліній затримки ПАХ	01.04.2018	
4	Моделювання та розрахунок основних елементів радіомітки на ПАХ	10.04.2018	
5	Технологія виготовлення функціональних пристроїв на ПАХ	20.04.2018	
6	Оформлення пояснювальної записки, креслення, плакатів з формулами та графіками.	10.05.2018	
7	Підготовка доповіді	18.05.2018	

Студент _____

М. В. Бітов

Науковий керівник дисертації _____

М. Ф. Жовнір

РЕФЕРАТ

Дослідження та моделювання функціональних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях / Магістерська дисертація зі спеціальності **171– Електроніка** спеціалізації «Електронні прилади та пристрої». **Бітов Мирослав Валерійович**. НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра «Електронні прилади та пристрої». Група ДЕ-61м. – К.: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2018. – 90 с., іл. 18, табл. 3.

Ключові слова: АЧХ - Амплітудно-частотна характеристика; ПАХ – поверхнева акустична хвиля; ЗШП – зустрічно-штирвовий перетворювач; ОЧК – ортогонально-частотне кодування; ЛЗ – лінія затримки; ФЧХ – фазо-частотна характеристика; ПООІ - пристрій опитування та обробки інформації;

Короткий зміст роботи: В магістерській дисертації представлено огляд науково-технічної літератури по функціональним пристроям на ПАХ, які в теперішній час представлені широкою номенклатурою пристроїв: фільтрами, лініями затримки, комутуючими пристроями, резонаторами на ПАХ, генераторами на ПАХ, радіомітками на ПАХ тощо.

Викладені теоретичні відомості по конструкції і принципу дії пасивної радіомітки на поверхневих акустичних хвилях, системам ідентифікації з пасивною радіоміткою, опису ортогонально-частотного кодування та методиці розрахунку ліній затримки ПАХ.

У дисертації представлено методику розрахунку основних елементів радіомітки на поверхневих акустичних хвилях з 5-ма частотами кодування ($f_1=431$ МГц, $f_2=433$ МГц, $f_3=435$ МГц, $f_4=437$ МГц, $f_5=439$ МГц).

Проведено опис технологічного процесу виготовлення функціональних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях.

А Н О Т А Ц І Я до магістерської дисертації

магістранта Бітова Мирослава Валерійовича гр. ДЕ-61м

за темою: «**Дослідження та моделювання функціональних пристроїв на
поверхневих акустичних хвилях**»

В магістерській дисертації представлено огляд науково-технічної літератури з функціональних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях. Описані конструктивні особливості, принцип дії і перспективні напрямки застосування фільтрів та ліній затримки на ПАХ.

Викладені теоретичні відомості по конструкції і принципу дії пасивної радіомітки на поверхневих акустичних хвилях, системам ідентифікації з пасивною радіоміткою, опису ортогонально-частотного кодування та методиці розрахунку ліній затримки ПАХ.

У дисертації представлено модель та методику розрахунку радіомітки на поверхневих акустичних хвилях з 5-ма частотами кодування ($f_1=431$ МГц, $f_2=433$ МГц, $f_3=435$ МГц, $f_4=437$ МГц, $f_5=439$ МГц), що реалізовано вхідним\вихідним перетворювачем, який складається з 5 масивів електродів, та масивом відбивних електродів з використанням принципів псевдоортогонального кодування. Дана конструкція дозволяє реалізувати 32 різних коди в залежності від конфігурації масиву відбивних електродів.

Проведено опис технологічного процесу виготовлення функціональних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях: процес виготовлення звукопроводу, процес формування електродних структур на поверхні звукопроводу та основні вимоги до конструкції пристроїв на ПАХ.

S U M M A R Y

to the master's thesis

by master's degree student Bitov Miroslav Valeriyovich gr. DE-61m
on « **Research and modeling of functional devices on surface acoustic waves**»

In the master's dissertation will be presented the review of scientific and technical literature on functional devices on surface acoustic waves. The design features, principle of action and perspective directions of application of filters and lines of delay on SAW are described.

The theoretical information on the construction and principle of the action of passive radio-mark on surface acoustic waves, identification systems with passive radio tag, the description of orthogonal-frequency coding and the method of calculating the delay lines of SAW are given.

The dissertation presents model and method of calculation of a radio-mark on the surface acoustic waves with 5 coding frequencies ($f_1 = 431$ MHz, $f_2 = 433$ MHz, $f_3 = 435$ MHz, $f_4 = 437$ MHz, $f_5 = 439$ MHz) implemented by the input / output converter, which consists of 5 arrays of electrodes, and an array of reflecting electrodes using the principles of pseudo-orthogonal encoding. This design allows you to implement 32 different codes, depending on the configuration of the array of reflecting electrodes.

A description of the technological process of manufacturing functional devices on surface acoustic waves is made: the process of making a sound conductor, the process of forming electrode structures on the sound-conductor surface and the basic requirements for the design of devices on SAW.

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	9
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	10
ВСТУП.....	11
1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПО ФУНКЦІОНАЛЬНИМ ПРИСТРОЯМ НА ПАХ.....	17
Висновки.....	40
2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.....	41
2.1. Конструкція та принцип дії пасивної радіомітки на поверхневих акустичних хвилях.....	42
2.2. Система ідентифікації з пасивною радіоміткою на поверхневих акустичних хвилях.....	47
2.3. Ортогонально-частотне кодування.....	53
2.4. Порядок розрахунку ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях.....	59
Висновки.....	61
3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОМІТКИ НА ПАХ.....	62
Висновки.....	65
4. ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ НА ПАХ.....	66
4.1. Виготовлення звукопроводу.....	67
4.2. Формування електродних структур.....	70
4.3. Конструктивні особливості пристроїв на ПАХ.....	81
Висновки.....	84
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	87
Додаток. МД8.171.061м.001	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ПАХ	- поверхнева акустична хвиля;
ЗШП	- зустрічно-штирбовий перетворювач;
АЧХ	- амплітудно-частотна характеристика;
ФЧХ	- фазо-частотна характеристика;
ОЧК	- ортогонально-частотне кодування;
ПОЧК	- псевдоортогонально-частотне кодування;
RFID	- Radio Frequency Identification (Радіочастотна ідентифікація);
LiNbO₃	- ніобат літія;
LiTaO₃	- танталат літія;
ZnO	- оксид цинка;
SiO₂	- кварц;
ПООІ	- пристрій опитування та обробки інформації;
FDMA	- frequency division multiple access (множинний доступ з частотним розділенням каналів);
TDMA	- time division multiple access (множинний доступ з часовим розділенням каналів);
CDMA	- code division multiple access (множинний доступ з кодовим розділенням каналів);
SDMA	- space division multiple access (множинний доступ з просторовим розділенням каналів);
OFC	- orthogonal frequency coding (ортогонально-частотне кодування);
OFDM	- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (ортогональное частотне розділення каналів);
GI	- Guard Interval (охоронний інтервал);
ЛЗ	- лінія затримки;
ФП-383	- фоторезист марки ФП-383;

ВСТУП

Елементи та функціональні пристрої на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ), реалізують багато різних операцій обробки радіосигналів, знаходять широке використання в різних областях сучасної техніки: радіоелектроніці, автоматиці, телебаченні та зв'язку.

Початок розвитку техніки поверхневих акустичних хвиль відноситься до 60-х років, коли були проведені основні теоретичні дослідження питань збудження, прийому і розповсюдження ПАХ, розроблені та досліджені конструкції перших елементів і пристроїв на ПАХ для обробки радіосигналів. Результати цих дослідів знайшли широке відображення у ряді фундаментальних теоретичних монографій і робіт, посвячених практичній реалізації окремих елементів та приладів [1].

Поверхневі акустичні хвилі представляють інтерес для застосування їх у системах обробки інформації завдяки їхнім унікальним властивостям, що забезпечують створення функціональних пристроїв малих розмірів, високих електричних параметрів і надійності з використанням традиційної технології мікроелектроніки.

Насамперед ПАХ мають низьку швидкість поширення порівняно з електромагнітними хвилями. Завдяки цьому довжина ПАХ приблизно в 10^5 менша від електромагнітних хвиль тієї самої частоти, тому функціональні пристрої на ПАХ мають значно менші розміри й масу, ніж електромагнітні пристрої.

Оскільки поверхнева хвиля поширюється вздовж поверхні твердого тіла і локалізована поблизу її поверхні, то нею можна керувати в будь-якій точці шляху. Це дає широкі можливості для створення різноманітних функціональних пристроїв.

Перспективність пристроїв на ПАХ визначається також високою добротністю і стабільністю п'єзокристалів, технологічністю виготовлення, наявністю ефективних методів збудження та приймання ПАХ, простотою

узгодження елементів на ПАХ із електронними пристроями. При їх виготовленні використовуються сучасні технологічні методи, що і при виробництві планарних інтегральних мікросхем: термовакuumне напилення тонких металевих, діелектричних та напівпровідникових плівок, методи прецизійної фотолітографії. Схемна, конструктивна і технологічна сумісність пристроїв на ПАХ з планарними мікросхемами визначають перспективи їх впровадження в мікроелектронну апаратуру.

Функціональні пристрої на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) знаходять широке застосування в різних областях науки і техніки. З областей застосування функціональних пристроїв на ПАХ виділяють наступні: лінії затримки, фільтри, ПАХ-генератори, конвольвери, датчики швидкості, прискорення, обертового моменту, лінійних та кутових переміщень, мікропереміщень, сили, тиску, деформації, температури, вологості, освітленості, радіомітки та інші.

В основу систематизованого викладу технічних характеристик елементів і пристроїв на ПАХ доцільно покласти функціональну класифікацію.

Класифікація елементів і пристроїв на ПАХ за функціональною ознакою дозволяє найбільш повно охарактеризувати сучасний стан і можливі шляхи їхнього розвитку. Приблизно їх доцільно розділити на однофункціональні елементи і багатфункціональні пристрої обробки сигналів [2].

1. До однофункціональних елементів можна віднести лінії затримки електричних сигналів, фільтри і резонатори на ПАХ, що можуть бути виділені в самостійні класи. До них відносяться також узгоджувальні елементи (акустичні трансформатори опорів), розгалужувачі і суматори сигналів, акустичні фазообертачі й атенюатори. У свою чергу, ряд класів за функціональною ознакою можуть бути розділені на підкласи. Клас "Лінії затримки" включає підкласи: лінії з однократною затримкою сигналу;

багатовідвідні лінії затримки; дисперсійні лінії затримки. Клас "Фільтри і резонатори" включає підкласи: смугові фільтри і резонатори. Для позначення цих елементів надалі по тексту представляється можливим використовувати термін акустоелектроні чи акустичні радіокомпоненти (АРК).

2. До багатофункціональних пристроїв обробки сигналів відносяться фільтри фазо модульованих (ФМ) і (частото модульованих (ЧМ) сигналів, генератори та підсилювачі сигналів на ПАХ. Багатофункціональні пристрої на ПАХ компонується з однофункціональних (акустичних, електричних, електронних) елементів, причому конструктивна сукупність складових елементів визначається загальними вимогами до багатофункціонального пристрою. Зокрема, погоджені фільтри являють собою сукупність багатовідвідних ліній затримки (фільтри ФМ-сигналу), дисперсійних ліній затримки (фільтри ЧМ сигналу), суматорів, фазообертачів, смугових фільтрів. У керованих (програмувальних чи адаптивних) фільтрах ФМ сигналу використовуються й електронні комутаційні елементи. Генератори сигналів на ПАХ використовують смугові фільтри, лінії затримки або резонатори як частотно-стабілізуючі елементи, електронні підсилювачі.

Лінії затримки (ЛЗ) на ПАХ є більш технологічними, ніж об'ємно-хвильові ЛЗ. На основі багатовідвідних ліній затримки можна побудувати фільтри стискання фазо модульованих сигналів з коефіцієнтом стискання більше 1000.

Генератори на ПАХ на основі ЛЗ працюють в діапазоні частот від одиниць до тисяч мегагерц без помноження частоти. Характерним прикладом застосування пристроїв на ПАХ є телевізійна техніка: селектори телевізійних каналів, фільтри проміжної частоти. Застосування ПАХ фільтрів дозволяє виключити велику кількість настроювальних операцій, значно підвищити продуктивність праці на багатьох операціях складання та налагодження телевізорів.

На основі ЛЗ можна спроектувати фазообертач, причому на будь-який необхідний зсув фаз. Реалізація його не потребує якоїсь складної технології і відрізняється від звичайної лінії затримки лише фотошаблоном. Фазообертачі є необхідними пристроями в каскадах обробки, модуляції і демодуляції сигналів. Вони використовуються в радіолокаційній, лазерній, телевізійній, комп'ютерній, військовій та іншій техніці. При цьому їх частотні показники набагато кращі за електронні аналоги. Вони мають малі габарити, стійкі до температурних та механічних навантажень, можуть розміщуватися на одному кристалі з інтегральною мікросхемою.

Елементи та пристрої на ПАХ, які реалізують різноманітні операції обробки радіосигналів, знаходять широке використання в різноманітних областях сучасної техніки: радіоелектроніці, автоматиці, телебаченні, радіолокації, вимірювальній техніці тощо. Лінії затримки на ПАХ більш технологічні у порівнянні з об'ємно-хвильовими лініями затримки. Генератори на ПАХ працюють від одиниць до тисяч мегагерц без помноження частоти. Фільтри на ПАХ мають високу стабільність параметрів і малі розміри. На основі ліній затримки з багатьма відводами виготовляють фільтри стиснення фазо модульованих сигналів.

Одним із перспективніших напрямків розвитку серед функціональних приладів на поверхневих акустичних хвилях є радіочастотна ідентифікація – ідентифікатори об'єктів. В даній магістерській дисертації в якості ідентифікатора об'єкта представлено пасивну радіомітку на ПАХ.

Радіочастотна ідентифікація - це сучасна технологія ідентифікації, що надає значно більше можливостей у порівнянні з традиційними системами маркування. Найбільш поширені RFID-мітки, як і багато штрих-коди, є самоклеючі етикетки. Але якщо на штрих-коді інформація зберігається в графічному вигляді, то на мітку дані заносяться і зчитуються за допомогою радіохвиль [3].

Сфера застосування RFID постійно розширюється. Особливо технологія затребувана в тих галузях, де потрібний контроль переміщення об'єктів в реальному часі, інтелектуальні рішення автоматизації, здатність працювати в жорстких умовах експлуатації, безпомилковість, швидкість і надійність. Щодня з'являються повідомлення про нові способи застосування технології.

У бібліотеці RFID допомагає швидко знайти в сховищі і видати на руки читачеві книги, запобігти їх розкрадання. Зникають черзі на видачу. Скорочується час підбору і пошуку потрібного видання, спрощується інвентаризація.

На складі за допомогою RFID в реальному часі відстежується переміщення товарів, прискорюються основні процеси прийому і відвантаження, підвищується надійність і прозорість операцій і знижується вплив людського фактору.

На виробництві за допомогою RFID проводиться облік сировини в реальному часі, контролюються технологічні операції і якість продукту. Продукція отримує своєрідний «електронний паспорт», що значно полегшує гарантійне обслуговування.

В індустрії споживчих товарів і роздрібних продажів RFID-системи відстежують товар на всіх етапах ланцюга постачання, від виробника до прилавка. Товар вчасно виставляється на полицю, не залежується на складі і відправляється в ті магазини, де на нього існує більш високий попит.

Також, RFID-мітки активно застосовуються в маркуванні шуб та інших хутряних виробів. Кожен виріб маркується Контрольним (ідентифікаційним) знаком з вбудованою в нього RFID-міткою.

Крім вже існуючих способів застосування RFID, які будуть вдосконалюватися і далі, є безліч областей, готових прийняти технологію. Потенціал застосування RFID величезний [4].

Завданням магістерської дисертації є дослідження структури, принципів роботи та основних структурних елементів функціональних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях. Дослідження методів розрахунку основних структурних елементів пристроїв на ПАХ. На прикладі пасивної радіомітки на ПАХ для апаратури спеціального призначення промодельовати та розрахувати параметри основних структурних елементів, з наступними вхідними параметрами:

- нижня та верхня границі смуги пропускання: $f_H = 430 \text{ МГц}$; $f_B = 440 \text{ МГц}$;
- кількість частот кодування – 5;
- фазова швидкість ПАХ $v = 3488 \text{ м/с}$ (для звукопроводу з ніобіту літію YZ-зрізу);
- тривалість сигналу радіозапиту $\tau = 1 \text{ мкс}$.

1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПО ФУНКЦІОНАЛЬНИМ ПРИСТРОЯМ НА ПАХ

Функціональні пристрої на акустичних хвилях поділяються на дві основні групи відповідно до фізичних принципів їхньої дії: пристрої на об'ємних акустичних хвилях (ОАХ) та на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) [5, 6].

До пристроїв на ОАХ належать вузькосмугові (резонаторні) та широкосмугові твердотільні лінії затримки на об'ємних акустичних хвилях, пристрої запам'ятовування частоти, генератори на об'ємних акустичних хвилях. Верхня межа діапазону частот розроблених промислових зразків ліній затримки на ОАХ досягає 16 ГГц. Максимальні значення часу затримки досягають десятків і сотень мікросекунд у режимі рециркуляції, мінімальні – 0,1...0,5 мкс. Сумарні перешкоди складають 3...10 дБ/мкс у дециметровому та 10...20 дБ/мкс у сантиметровому діапазонах. Основна тенденція розвитку ТЛЗ полягає в зниженні втрат, які вносяться, підвищенні діапазону робочих частот і збільшенні придушення “паразитних” сигналів [7, 8, 9].

Втрати ЛЗ на ОАХ складаються з подвоєних втрат перетворення, дифракційних втрат в результаті розширення акустичного променя й втрат на поглинання акустичної хвилі при розповсюдженні по звукопроводу. Дифракційними втратами в діапазоні надвисоких частот (НВЧ) можна знехтувати, оскільки вони складають величину порядку кількох децибелів. Втрати перетворення в серійних приладах дорівнюють 16...25 дБ, а питома затухання акустичних хвиль у монокристалічних матеріалах – 0,1...0,2 дБ/мкс на частоті 1 ГГц і 7...8 дБ/мкс для зсувних хвиль або 16...20 дБ/мкс для поздовжніх хвиль на частоті 10 ГГц для магній-алюмінієвої шпинелі і ітрій-алюмінієвого граната.

Один із найважливіших параметрів ЛЗ на ОАХ – рівень придушення “паразитних” сигналів. Наприклад, при малому часі затримки найсуттєвішим є пряме проходження електромагнітного випромінювання з входу на вихід

ЛЗ, а також поява багатопролітних сигналів, пов'язаних з попаданням на вихід лінії затримки акустичного сигналу, послідовно відбитого від торців кристалу. Просочування випромінювання придушується зменшенням прохідної ємності, що досягається ретельним екрануванням вхідного та вихідного перетворювачів або їхнім просторовим рознесенням за рахунок вибору матеріалу звукопровода з більшою швидкістю акустичних хвиль.

Придушення багатопролітних сигналів досягається вибором конструкції ЛЗ та матеріалу звукопровода, які забезпечують зменшення втрат на розповсюдження і задовільне акустичне узгодження перетворювачів з звукопроводом.

З метою дослідження перспективних способів придушення багатопролітних сигналів розроблені ефективні прийоми придушення багатопролітних сигналів за рахунок зниження відбивання акустичного променя від шорсткої поверхні торця звукопровода. Розроблений метод дозволив збільшити придушення багатопролітних сигналів дециметрового діапазону з 1...4 дБ до 10...12 дБ [1, 10].

Акустичні ЛЗ стали основою для розробки генераторів на ОАХ та пристроїв запам'ятовування частоти, що являють собою активні електронні пристрої з зовнішнім зворотнім зв'язком. Основним високочастотним елементом такого генератора є ЛЗ на ОАХ.

Функціональні пристрої на ОАХ знайшли широке застосування в системах бортового й наземного контролю, радіодатчиків висоти і дальності, у приладах визначення, запам'ятовування й відтворення частоти, систем формування й обробки сигналів радіолокаційних станцій (РЛС), а також у вимірювальній апаратурі.

Поверхневі пружні хвилі в діапазоні $10^{-5} \dots 10^{-1}$ см називаються поверхневими акустичними хвилями (ПАХ), хоча їхні частоти відповідають області ультразвуку [1, 2, 11]. Поверхневі акустичні хвилі мають ряд специфічних властивостей. Насамперед, це можливість керувати ними у всіх

областях поверхні, де вони розповсюджуються. Їхня амплітуда експоненційно спадає із глибиною, так що 90 % енергії, яка переноситься, зосереджено в шарі глибиною не більш однієї довжини хвилі. Згасання таких хвиль, звичайно, мале, хоча воно залежить від вибору матеріалу, особливо на високих частотах. ПАХ поширюються зі швидкістю 1...5 км/с, тобто приблизно на п'ять порядків нижче, ніж швидкість електромагнітних хвиль, що дозволяє створити на їхній основі інтегральні лінії затримки. Якщо тверде тіло має п'єзоелектричні властивості, ПАХ, яка поширюється уздовж його поверхні, супроводжується електричним полем. У свою чергу змінні електричні поля, що пронизують п'єзоелектрик, призводять до появи пружних деформацій, що поширюються в його об'ємі. За допомогою різних неоднорідностей на поверхні твердого тіла можна ефективно керувати швидкістю і напрямком поширення хвилі.

Використання поверхневих акустичних хвиль дозволило значно розширити функціональні можливості акустоелектронних пристроїв. Значний інтерес до приладів на ПАХ і прискорений розвиток цієї області досліджень зумовлені відомими особливостями перетворення й розповсюдження ПАХ, а також успіхами фото- та електронно-променевої літографії. В теперішній час ці пристрої представлені широкою номенклатурою функціональних пристроїв: вузькосмужними та широкосмужними фільтрами, ЛЗ на ПАХ, комутуючими пристроями; резонаторами на ПАХ, дисперсійними фільтрами стиснення ЛЧМ-сигналу, пристроями запам'ятовування й визначення частоти, генераторами на ПАХ, синтезаторами частот тощо [6, 9].

Найпростіша лінія затримки або фільтр на ПАХ складаються з передавального та приймального перетворювачів, які розміщені у більшості випадків на полірованому п'єзоелектричному звукопроводі, що трансформують електричний сигнал в акустичну хвилю на вході і навпаки на виході. У залежності від поставлених вимог у структуру пристрою на ПАХ можуть бути включені додаткові перетворювачі або елементи керування.

Оскільки більшість типів перетворювачів ПАХ мають двоспрямованість випромінювання, то для того, щоб уникнути паразитного відбиття на торці звукопроводу наносять поглинаючі покриття. З метою зменшення внесених затухань на вході і виході пристрою на ПАХ застосовуються пасивні й активні узгоджуючі кола. При необхідності звукопровод з перетворювачами і узгоджуючими колами, можуть бути виконані в одному корпусі (Рис.1.1).

Основний внесок у формування активних властивостей пристрою на ПАХ вносять частотно-вибіркові процеси перетворення хвиль на вході і виході. Форма амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) перетворювача визначається законом зміни перекриття електродів або аподизацією. Змінюючи геометрію планарної структури, можна формувати задану АЧХ. Згасання ПАХ при поширенні також є частото залежним, але ця залежність для більшості п'єзоелектриків відносно слабка у всьому основному діапазоні частот і її, як правило, не враховують. У результаті функція передачі пристрою на ПАХ визначається в основному поєднанням функцій передачі передавальних і приймального перетворювачів, а також узгоджуючих кіл.

Середня частота пристроїв на ПАХ залежить від періоду електродів перетворювачів. Швидкість ПАХ складає 1...5 км/с, тому нижня границя робочого діапазону залежить від розмірів наявних кристалів, що для частот нижче 5...10 МГц повинні бути надмірно великими. Верхня границя обмежена можливостями технології виготовлення перетворювачів і при використанні звичайної літографії складає 300...500 МГц; застосування електронної літографії розширює ці границі до 1500...2000 МГц [5, 8, 11]. Смуга пропускання обернено пропорційна числу електродів у перетворювачі і може бути реалізована в межах від 0,1 % до 100 %. Смуга пропускання фільтрів на ПАХ резонаторах може бути зменшена до 0.01 % [11].

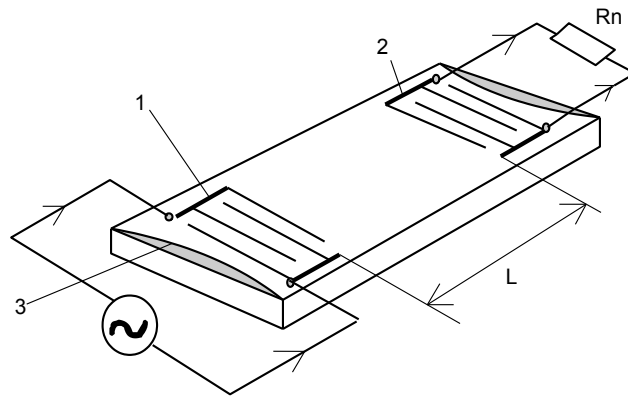


Рис. 1.1. Загальний вигляд функціонального пристрою на ПАХ.

Фільтри на ПАХ відносяться до класу фільтрів, що відомі під назвою трансверсальних. Процес фільтрації можна розглядати як процес селекції частоти, котрий найбільш наочно можна відобразити в частотній області. Дійсно, одна смуга частот пропускається фільтром (смуга пропускання), а інші частоти пригнічуються (смуги затримки).

У звичайних лініях затримки або фільтрах, які складаються з індуктивності та ємності, смуги пропускання та затримки формуються за рахунок резонансних ефектів у послідовних та паралельних колах схеми [1].

Резонанси спостерігаються на конкретних частотах, що визначаються ємністю та індуктивністю реактивних елементів. Частотну характеристику необхідного вигляду отримують цілеспрямованою зміною резонансних частот комбінацій цих дискретних елементів. Селекція частоти може також здійснюватися за рахунок процесів, котрі простіше та зручніше реалізуються в частотній області. Сигнал, котрий надходить на вхід пристрою розглядається як хвиля, що поширюється. Фільтрація здійснюється в міру проходження сигналу крізь ряд ліній затримки та додавання відповідних затриманих сигналів. При визначених умовах всі затримані сигнали додаються синфазно (смуга пропускання) або (протифазно).

Трансверсальні фільтри знаходять все більше застосування з розвитком радіолокаційної техніки і техніки зв'язку. Якщо необхідно знайти сигнал, рівень якого нижче рівня шуму, то в цьому допомагає попереднє знання

структури необхідного нам сигналу. Наприклад, вузькосмужний фільтр виділяє визначений вузькосмужний сигнал і збільшує його амплітуду в порівнянні із шумом, крім сигналів, що заважають, за рахунок чого підвищується відношення сигнал/шум. Це — добре відомий приклад фільтра, що працює в частотній області. Якщо ж сигнал є цифровим кодом, то відношення сигнал/шум можна збільшити за допомогою узгодженого з цим кодом фільтра, що працює в часовій області і називається кореляційним фільтром. У загальному випадку такі фільтри дозволяють вводити в узгоджений трансверсальний фільтр довгий код і одержувати стиснутий вихідний імпульс. Оскільки енергія вхідного і вихідного сигналу однакова, амплітуда стиснутого імпульсу буде значно вище, ніж у вхідного сигналу. Шум же передається інакше, оскільки фільтр не узгоджений з ним; за рахунок цього збільшується відношення сигнал/шум.

Інший тип трансверсального фільтра усуває спотворення. Якщо, наприклад, телевізійні сигнал містить у собі паразитні відбиття від будівель, те можна створити зворотній фільтр для обернення процесу перекручування й усунення небажаного відбиття. У лінійній системі фільтр, що усуває небажані відбиття з відомого сигналу, такого, як синхроімпульс телевізійного сигналу, буде також усувати небажані відображення з невідомого телевізійного сигналу, що був підданий аналогічному спотворенню.

Широко використовуються сигнали з внутрішньо імпульсною лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ-сигнали), тобто імпульси приблизно постійної амплітуди, частота заповнення яких змінюються лінійно в часі у визначній частотній смузі [5, 10]. Для таких сигналів можна створити узгоджений фільтр зі стисненням вихідного сигналу аналогічно тому, як було описаний вище для цифрових кодів. Такий фільтр може бути використаний для посилення необхідних ЛЧМ-сигналів над рівнем шуму, збільшуючи, таким чином, відношення сигнал/шум.

Пристрої стиснення ЛЧМ-імпульсів (фільтри ЛЧМ-імпульсів) мають і більш загальні застосування. Наприклад, при введенні в такий фільтр модульованого ЛЧМ-імпульсу на його виході утворюється миттєвий Фур'є-образ функції модуляції. У зв'язку з цим такі фільтри є дуже ефективним інструментом для виконання перетворення Фур'є в реальному часі. Це у свою чергу призводить до створення широкого класу пристроїв, що можуть виконувати перетворення Фур'є для різних типів операцій фільтрації, таких, як виключення небажаних частотних складових при збереженні потрібних компонентів.

Однією з причин широкого використання ЛЧМ-імпульсів у системах локації є можливість одержання сигналів великої тривалості і тієї ж енергії, що й у коротких потужних імпульсів. Інша причина полягає в тому, що доплерівський зсув змінює саме частоту сигналу. Ці частотні зміни, що можуть бути миттєво виміряні фільтром ЛЧМ-імпульсів, вказують швидкість цілі [1, 5, 10].

Безумовно, практично неможливо проектувати такі складні фільтри лише на основі схем із зосередженими елементами, оскільки для реалізації багатоелементних складних кодів доведеться використовувати величезну кількість елементів. Для таких фільтрів необхідний більш простий метод виготовлення, переважно з використанням фотолітографічної методики, що застосовується при виготовленні інтегральних схем. Такі фільтри, придатні для обробки як аналогових, так і цифрових сигналів, з'явилися в останні роки. Спочатку трансверсальні фільтри цього типу були реалізовані у формі пристроїв на поверхневих акустичних хвилях, що працюють звичайно в діапазоні частот від 10 МГц до 1 ГГц [1, 2, 8].

Поверхневі акустичні хвилі дозволяють здійснити запам'ятовування, затримку і складну паралельну обробку широкосмугових сигналів великої тривалості. Вони працюють на частотах до 500 МГц, а після вживання спеціальних заходів — аж до 2 ГГц, забезпечуючи ширину смуги від 30 до

40% центральної частоти. Відповідна швидкість передачі інформації — порядку сотень мегабіт на секунду. Деякі типи цих пристроїв можуть запам'ятовувати сигнали на час порядку секунд; для поверхневих акустичних хвиль неважко реалізувати багатовідвідні лінії затримки. Відповідним чином підбираючи розміщення та вагові коефіцієнти відводів, можна конструювати широкосмугові та вузькосмугові лінії затримки, фільтри, цифрові фільтри й аналогові фільтри, що пізнають або генерують спеціальні сигнали. Після подальших вдосконалень можливе створення програмованих фільтрів, характеристики яких можна змінювати на власний розсуд.

Більшість операцій функціональної обробки, виконуваних ПАХ-пристроями, можуть також виконувати пристрої на кремнії, але в частотній області, як правило, нижче 5 МГц із відповідно більшою часовою затримкою. Основною перевагою цієї технології є те, що швидкість запису і зчитування сигналів у цих пристроях можна змінювати, так що заданий сигнал на вході можна розширити або стиснути на його виході, зчитуючи його зі швидкістю, відмінною від тієї, з якою він був записаний.

Іноді використовуються взаємодії між двома типами вхідних сигналів. Наприклад, оскільки будь-який напівпровідниковий пристрій може бути зроблено чутливим до світла, можна створити світлочутливий пристрій, у якому сигнал, що відповідає розподілові інтенсивності світла уздовж пристрою, можна зчитувати як один рядок оптичного зображення. При використанні взаємодій поверхневих акустичних хвиль з напівпровідниками можна виконувати Фур'є-перетворення і проводити іншу функціональну обробку оптичних зображень [1, 2].

Нелінійні взаємодії між двома поверхневими акустичними хвилями в ПАХ-пристроях можна використовувати для виконання таких операцій обробки в реальному часі, як згортка й обчислення функції кореляції цих хвиль [1, 5, 9]. При цьому один із сигналів може використовуватися в якості опорного, що дозволяє обходитися без трансверсального фільтра з

фіксованими характеристиками. У цьому випадку трансверсальний фільтр із довільно змінюваними параметрами може бути легко створений простою зміною опорного коду. Аналогічний пристрій можна реалізувати з використанням двох багатовідвідних ліній затримки, з'єднаних разом; при цьому одна з ліній керує вихідними сигналами з відводів другої лінії, так що сигнали, подані на вхід першої, є опорними для сигналів, що проходять по другій.

Можна також використовувати взаємодію між акустичною хвилею і світловим променем для відхилення останнього, оскільки акустична хвиля формує аналог оптичної дифракційної решітки [1, 5]. Такі методи дозволили створити пристрої, що виконують Фур'є-перетворення й обчислюють функцію кореляції акустичних сигналів або один з одним, або із сигналом, використаним для модуляції світлового пучка. Принцип, що лежить в основі цих пристроїв, може використовуватися для відхилення променя світла в багатоадресних системах зв'язку або в проекційних телевізійних пристроях.

Спільним для всіх цих пристроїв є наявність трансверсального фільтру – лінії затримки, у якій поширюється акустичний або електричний сигнал і в різних точках якої забезпечується електричний, оптичний або акустичний доступ до цього сигналу. Такі точки утворюють «відводи» лінії затримки. При використанні для цієї мети світлового або акустичного пучка розподіл відводів можна вважати практично безперервним. Якщо ж використовуються електричні відводи, то доступ до хвилі, що поширюється, є дискретним. В обох випадках, підбираючи амплітудні і фазові вагові коефіцієнти відводів, можна здійснювати різноманітні функціональні перетворення сигналів.

Важливу роль при обробці сигналів у РЛС відіграють пристрої частотної селекції на ПАХ [1, 2]. Вони використовуватися як для фільтрації небажаних сигналів, що надходять у пристрій, так і для виділення частотних складових, які необхідні при спектральному аналізі сигналів РЛС. Типовими параметрами смугових фільтрів на ПАХ, що застосовуються в трактах

проміжної частоти РЛС для придушення інтерференційних складових, які повинні лежати поза смугою, ϵ : робочий діапазон частот - від 10 МГц до 1,6 ГГц; втрати, що вносяться – 5...25 дБ; придушення паразитних сигналів – 60 дБ (до 100 дБ); смуга пропускання – 0...50%; пульсації по амплітуді - 0,5 дБ; відхилення фазової характеристики від лінійної - 1 град.

Спектральний аналіз сигналів – важлива область застосування пристроїв частотної селекції на ПАХ. Традиційні прилади, що здійснюють спектральний аналіз, часто надто громіздкі й дорогі. Застосування мініатюрних і дешевих пристроїв на ПАХ у таких системах відкриває можливості, які містять, наприклад, вибір сигналу необхідної частоти та визначення доплерівських зсувів у реальному масштабі часу. Блоки фільтрів на ПАХ виготовляються на одній підкладці і забезпечують одночасне розділення сигналів у смузі близько декількох мегагерц зі стовідсотковою імовірністю виявлення.

Пристрої на ПАХ знайшли широке застосування у швидкодіючих системах, де успішно узгоджуються з традиційними компонентами на р-і-п-діодах [11, 12]. Швидкодія таких НВЧ-перемикачів досягає одиниць мікросекунд, ступінь розв'язки сигналів у станах увімкнення-вимкнення більше 100 дБ. Значне застосування ПАХ фільтрів у помножувачах частоти, змішувальних пристроях для виділення необхідних частот з високим ступенем придушення небажаних сигналів.

Значна роль частото вибіркового і частото здавального пристроям на ПАХ відводиться у вирішенні проблеми синтезу сигналу зі швидкою дискретною перебудовою частоти. Найефективніше це завдання вирішене в пристроях прямого синтезу, у яких гребінчастий спектр, що утворений шляхом маніпуляцій з сигналом опорного генератора, надходить на вхід блоку ПАХ-фільтрів, а на виході ПАХ-фільтрів виділяються окремі чисті спектральні лінії. Ці пристрої прямого синтезу відрізняються такими особливостями: стабільність частоти і фазова когерентність визначаються

одним здавальним генератором, зміни частоти здійснюються дуже швидко (швидкість обмежується тільки швидкодією ВЧ-перемикачів і затримкою фільтрів), метод прямого синтезу з використанням пристроїв на ПАХ виявляється набагато простішим, ніж попередні методи прямого синтезу за рахунок застосування високо вибіркового, компактних фільтрів на ПАХ.

Високий рівень придушення “паразитних” сигналів у такому синтезаторі досягається за допомогою каскадованих ПАХ-фільтрів з високим (не менше 10 дБ) придушенням позасмугових сигналів (дискретних складових у спектрі сигналу) і прийнятним рівнем внесених втрат (менше 30 дБ), виконаних на термостабільних кварцових підкладках.

Коли потрібна велика кількість робочих частот, замість указаної базової схеми доцільно використати інший підхід. Так, комбінуючи “чисті” вихідні сигнали від декількох, спеціально розрахованих, базових підсинтезаторів (когерентних із здавальним генератором) за допомогою змішувачів і простих широкосмугових фільтрів, можна одержати будь-яку частоту з великої кількості (декількох сотень) частот, що значно перевищують кількість ПАХ-фільтрів у цих підсинтезаторах. Інша можливість полягає в отриманні потрібної сітки робочих місць шляхом послідовного поділу і змішування невеликої кількості вихідних когерентних частот на комутованих виходах ПАХ-фільтрів. Ці методи можна застосовувати в різноманітних варіантах і поєднаннях, добиваючись оптимальних для конкретного застосування характеристик.

Альтернативний метод одержання сигналів зі швидкою перебудовою частоти полягає у використанні багаточастотних програмованих генераторів з комутованими частото задаючими фільтрами на ПАХ у колі зворотного зв'язку [1, 2, 11]. У таких генераторах за допомогою управління можна переходити від однієї частоти до іншої. Інший підхід полягає в заміні набору ПАХ-фільтрів у колі зворотного зв'язку широкосмугових ЛЗ з програмованими стрибками фази. Крім цього, при введенні до кола

зворотного зв'язку спеціального нелінійного елемента чи при синхронізації ПАХ-генератора з широкосмуговою ЛЗ зовнішнім сигналом визначеної частоти може бути забезпечений багатходовий режим генерації. Багатходові ПАХ-генератори можуть застосовуватись, наприклад, для формування сітки частот у схемі синтезатора.

Стабільність частоти ПАХ-генераторів визначається стабільністю і добротністю частото задаючого ПАХ-елемента в колі зворотного зв'язку. Типові значення стабільності частоти одномодових ПАХ-генераторів такі: відносна температурна нестабільність $\sim 10^{-4}$ (в інтервалі температур -60 до $+70^\circ\text{C}$), у режимі синхронізації до 10^{-8} ; відносна тривала нестабільність 10^{-6} на місяць; короткочасна тривала нестабільність частоти $10^{-9} \dots 10^{10}$ (за 1 сек).

Спектральні характеристики ПАХ-генератора можна поліпшити (приблизно на 10 дБ) при використанні ПАХ-резонаторів і структур з відбиваючими решітками добротністю близько 10000. Характеристики таких генераторів наближаються до характеристик високостабільних кварцових генераторів з колом помножувачів; вони мають такі переваги, як можливість створення генераторів на частоти аж до 3 ГГц без застосування помножувачів, малі габаритні розміри, низька потужність, що споживається, механічна міцність, відсутність побічних мод, простота здійснення частотної модуляції, слабка чутливість до механічних впливів та акустичних шумів [1, 2, 8, 11].

Переваги акустоелектронних пристроїв відкривають перспективи їхнього широкого використання не лише в трактах проміжної частоти, але й безпосередньо у входних та вихідних трактах надвисокочастотної (НВЧ) радіоелектронної апаратури. У НВЧ діапазоні сигнали можуть бути безпосередньо введені, оброблені й виведені без додаткових схем перетворення частоти.

Виготовлення ПАХ-пристроїв для роботи в діапазоні понад 1 ГГц пов'язане з відомими технологічними труднощами. Однак, останні

досягнення електронно-променевої літографії, а також розповсюдження методів фотолітографії для виготовлення субмікронних перетворювачів електромагнітних сигналів дозволяють впевнено говорити про розширення верхньої межі робочого діапазону частот ПАХ-пристроїв до 6...10 ГГц [1, 2, 8].

Поруч з цим, не припиняється пошук і дослідження нових матеріалів – як монокристалів, так і композиційних структур з високою швидкістю розповсюдження ПАХ та іншими корисними властивостями. Дуже перспективними в цьому розумінні є шаровані структури нітриду алюмінію та окису цинку на сапфірі [8, 11].

Однак, подальше підвищення робочої частоти пристроїв пов'язане перш за все з використанням приповерхневих об'ємних акустичних хвиль (ПОАХ), а також вищих гармонік зустрічно-штирьових перетворювачів. З цією метою розробляються більш технологічні та ефективніші конструкції перетворювачів з компромісними електричними параметрами [1, 8]. Значні зусилля спрямовуються на дослідження можливостей поєднання вказаних вище методів.

Так, перехід до застосування ПОАХ у поєднанні з електронно-променевою літографією та матеріалами з високим значенням швидкості акустичних хвиль дозволить підвищити робочу частоту пристроїв до 4,0 ГГц, а також підвищить їхню довговічність та поліпшить робочі характеристики. Подальше розширення функціональних можливостей акустоелектроніки пов'язане з більш поглибленим вивченням акустоелектронних явищ у напівпровідникових матеріалах та шарованих структурах. Продовжується вивчення та розробка нових пристроїв підсилення та генерації акустичних та електромагнітних хвиль. Наступним кроком до повної реалізації можливостей використання акустичних хвиль має стати створення монолітних пристроїв, у яких будуть об'єднані властивості п'єзоелектричних матеріалів для перетворення акустичних хвиль, матеріалів з низькими

втратами для акустичних ліній передачі та затримки й напівпровідникових матеріалів для підсилення акустичних та електричних сигналів. Реалізація подібних композицій має призвести не тільки до оптимізації характеристик дискретних акустичних пристроїв, але й до забезпечення їхньої узгодженості з різноманітними великими інтегральними схемами та, у кінцевому рахунку, до створення нового покоління пристроїв – монолітних інтегральних акустоелектронних схем [1, 2]. Практичний інтерес мають одержані результати по збудженню та керуванню параметрами ПАХ на епітаксiальному арсенiді галію з високою концентрацією носіїв заряду.

Важливою віхою на шляху широкого впровадження техніки ПАХ у радіоелектронні системи різноманітного призначення є розробка перенастроюваних та програмованих ПАХ-пристроїв: ЛЗ, фільтрів, багатовідвідних ЛЗ, узгоджених фільтрів для обробки сигналів зі змінними кодами тощо [1, 8, 10, 11]. Перемикання фази виконується за допомогою ВЧ-перемикачів з подальшим інтегруванням вихідних сигналів. Цікавим є застосування для цієї мети матеріалів з керованою швидкістю розповсюдження ПАХ. Такі пристрої можуть бути виконані по гібридній або монолітній технології та знайдуть широке застосування в системах РЛС та системах з розширеним спектром.

Широке застосування акустоелектронних пристроїв, безперервне розширення та удосконалення їхніх функціональних можливостей дає значний техніко-економічний ефект, основними показниками якого є: підвищення точності визначення відстані (висоти) радіолокаційними засобами в 5...10 разів за рахунок стабільності швидкості розповсюдження акустичних коливань у кристалах; зниження габаритних розмірів та маси апаратури в десятки разів за рахунок нижчої (у 50...100 тис. разів) у порівнянні з електромагнітними хвилями, швидкості розповсюдження акустичних хвиль у твердому тілі; підвищення надійності та ефективності робочого застосування систем радіоелектронного оснащення за рахунок

можливості здійснення неперервного вбудованого контролю точності роботи радіолокаційних засобів; суттєве зниження часу готовності систем; зниження металоємності виробів; розширення ринку збуту пристроїв.

Однією з переваг ПАХ-пристроїв є те, що вони виготовляються шляхом нанесення тонких металевих плівок на п'єзоелектричну підкладку згідно технології виготовлення інтегральних схем. Це відкриває можливість конструювання пристроїв, що не потребують настроювання, необхідного для індуктивно-ємнісних фільтрів.

Нанесені на п'єзоелектричну підкладку тонкі металеві пластинки утворюють структуру зустрічно-штирьового перетворювача (Рис.1.2), призначеного для збудження поверхневої акустичної хвилі.

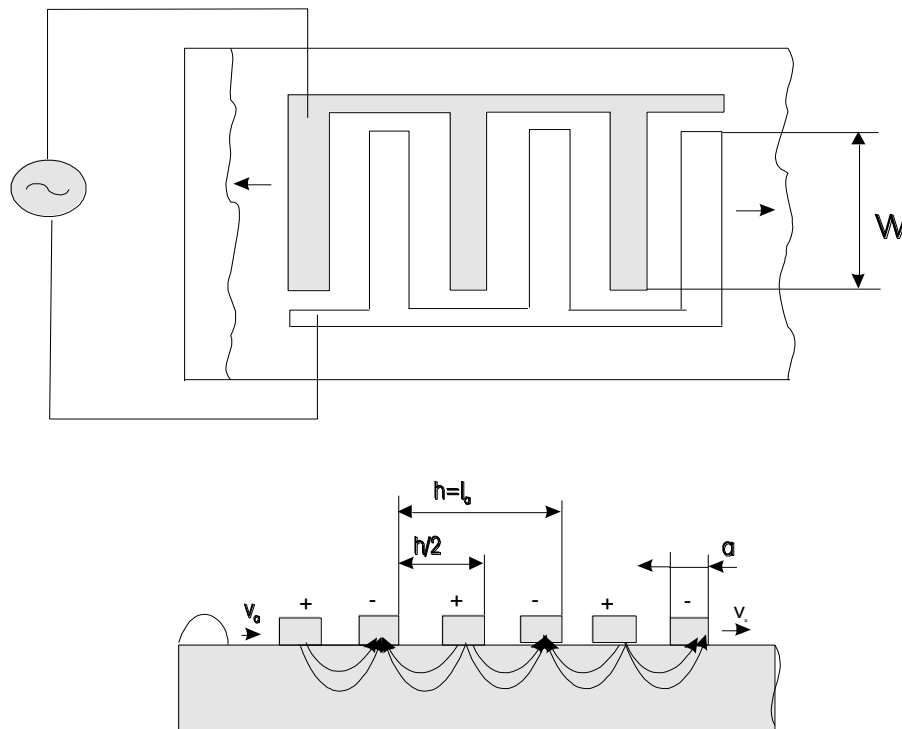


Рис. 1.2. Двохфазний зустрічно-штирьовий перетворювач ПАХ.

Цей перетворювач збуджує поверхневу акустичну хвилю, поле якої експоненційно спадає з глибиною зразка, причому глибина проникнення — порядку довжини хвилі [1, 2, 5, 9]. На частоті 40 МГц при швидкості поширення приблизно 3 км/с, глибина проникнення хвилі — порядку 75 мкм. Електроди, що чергуються, зустрічно-штирьового перетворювача

підключаються до двох електричних шин (вхідна і вихідна лінії). Як правило, період зустрічно-штирьового перетворювача (ЗШП) (відстань між центрами пари електродів) приблизно дорівнює одній довжині хвилі; наприклад, у телевізійному фільтрі проміжної частоти (ПЧ) 40 МГц період ЗШП дорівнює 75 мкм. Типова ширина електрода — порядку чверті довжини хвилі, тобто в даному випадку 20 мкм.

Пристрої такого типу можуть бути виготовлені з будь-якою заданою амплітудною і фазовою характеристикою в потрібній смузі частот. Їх можна сконструювати із заданим відгуком і навіть із відгуком на спеціальні аналогові або цифрові коди. Такі пристрої можуть працювати в діапазоні частот від 10 МГц до 2 ГГц.

Часовий відгук ПАХ-перетворювача неважко розрахувати на основі простих геометричних міркувань. Якщо відомий часовий відгук, за допомогою методів перетворення Фур'є легко знайти частотний відгук фільтра. У такий спосіб можна досить просто створити трансверсальний фільтр із заданою частотною характеристикою.

Спочатку розглянемо з точки зору фізики простий приклад фільтра з цифровим кодуванням, який можна використовувати як для генерації цифрових кодів, так і як погоджений приймач визначеного цифрового коду.

Розглянемо зустрічно-штировий перетворювач, зображений на рис.1.3. Металеві електроди нанесені на п'єзоелектричну підкладку, і кожний з'єднаний з однією з двох вхідних шин. На ту ж підкладку нанесень простий приймальний перетворювач із двох електродів. При поданні напруги на контактні шини на електродах виникають заряди протилежних знаків. Ці заряди у свою чергу збуджують поверхневі акустичні хвилі в п'єзоелектричному матеріалі. Амплітуда сигналу поверхневої акустичної хвилі, збудженої металевим електродом, має бути пропорційна заряду на електроді, тобто нормальному компоненту електричного поля на поверхні електрода.

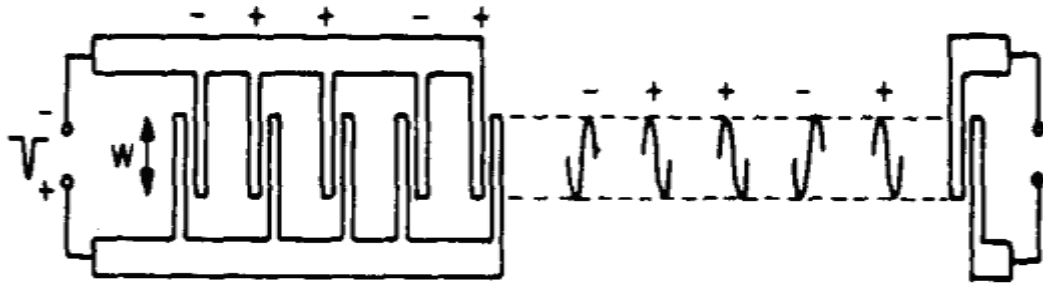


Рис. 1.3. ПАХ-фільтр із цифровим кодуванням.

У зображеній на рис.1.3 конфігурації перша пара електродів у правій частині випромінюючого перетворювача може вважатися поляризованою позитивно, а кожна пари електродів може розглядатися як конденсатор. Тоді при поданні напруги на перетворювач заряд на електроді буде пропорційний прикладеній напрузі. Заряд на першому електроді першої пари перетворювача збуджує позитивний акустичний імпульс, за яким йде негативний імпульс, котрий збуджується зарядом протилежного знаку іншого електроду цієї ж пари електродів. Відзначимо, що друга пара електродів приєднана до контактних шин протилежного знаку в порівнянні з першою парою. Перший радіочастотний (РЧ) акустичний імпульс проходить лінію затримки у вигляді одного періоду тонального повідомлення; за ним йде другий подібний імпульс протилежного знаку, збуджений другою парою електродів (поляриність яких протилежна першій парі). У свою чергу кожна пара електродів збуджує РЧ-імпульс, так що в лінії затримки на ПАХ збуджується кодована послідовність імпульсів, обумовлена геометрією електродів та їхнім електричним з'єднанням [1, 11]. Ця серія РЧ-імпульсів з цифровим кодуванням може бути прийнята приймальним перетворювачем, у результаті чого на виході 1 трансверсального фільтру формується кодований сигнал + – + + – , вигляд якого визначається геометричною конфігурацією фільтра. Такий код називається біфазним цифровим кодом, а РЧ-імпульс, або тональне повідомлення, – елементом коду.

Цей самий пристрій може використовуватися і як приймач кодованого сигналу. У цьому випадку заряд, що виникає на електроді вихідного

перетворювача, пропорційний амплітуді акустичного сигналу, а вихідна напруга перетворювача – цьому заряду. Якщо на лівий перетворювач (рис. 1.3) подається електричний сигнал $+ - + + -$, що відповідає оберненому в часі цифровому коду, то перший елемент цього коду, випромінюваний лівою парою електродів, є позитивним РЧ акустичним імпульсом, що виникає за рахунок того, що на «негативний» перетворювач подається РЧ електричний імпульс негативної полярності. Цей акустичний імпульс приходить на приймальний перетворювач у той же час, що і другий елемент коду, випромінюваний другою парою електродів. Оскільки вхідний код відповідає коду перетворювача, то всі елементи коду приходять на приймальний перетворювач одночасно і перетворюються в електричні сигнали однієї полярності. Ці сигнали додаються, у результаті чого формується сигнал амплітудою, у п'ять разів більшою, ніж від одиничної пари випромінюючих електродів.

Якщо ж на лінію затримки подається інший сигнал, що має послідовність позитивних і негативних РЧ-імпульсів, що відрізняється від заданої, то в жоден з моментів часу він не відповідатиме полярності всіх простих перетворювачів (пари електродів), що складають випромінюючий перетворювач. Іншими словами, сигнал і відгук фільтра незкорельовані, внаслідок чого вихідний сигнал буде менший по амплітуді. Це – простий приклад здатності трансверсального фільтра до розпізнавання образів і до вибору сигналу з заданим кодом із всіх інших сигналів. Так званий ортогональний набір кодів визначається як такий набір, для якого вихідний сигнал має одиничну амплітуду при узгодженості кодів і амплітуду в N разів більшу для узгоджених кодів довжиною в N елементів.

У загальному випадку можна показати, що мінімальна ширина вихідного імпульсу τ визначається шириною смуги B системи і дорівнює приблизно $\tau = 1/B$. Якщо T – довжина кодованого імпульсного повідомлення, ті τ – довжина одного елемента коду або імпульсу мінімальної довжини (у нашому випадку це буде імпульс, що відповідає сигналу від однієї пари

електродів або одного елементу). Відношення довжини вхідного імпульсу до довжини вихідного дорівнює, отже, T/τ або приблизно TB . Це – добуток часу затримки фільтра на смугу пропускання, названий коефіцієнтом стиснення імпульсу. Амплітуда вихідного імпульсу збільшується порівняно з амплітудою вхідного в те жє число разів; цей коефіцієнт характеризує виграш у відношенні сигнал/шум при обробці сигналів. Відзначимо, що для цифрового коду коефіцієнт стиснення імпульсу в N разів більше числа елементів коду і $N \approx TB$.

Для більш повного розуміння ідеї стиснення імпульсу розглянемо сигнал з цифровим кодуванням довжиною в N елементів (кожний має значення ± 1), що надходить на вхід узгодженого фільтра в присутності випадкового коду (шуму) [1]. На виході узгодженого фільтра формується одиничний імпульс тривалістю τ . Отже, його амплітуда буде збільшена в N , а пікова вихідна потужність – у N^2 разів. Дуже довгий випадковий шумовий сигнал (наприклад, неузгоджений цифровий код) не буде корелювати з відгуком узгодженого фільтра, і елементарні сигнали, що складають вихідний сигнал, не будуть додаватися у фазі. З іншого боку, потужність шуму на виході фільтра буде в N раз більше, ніж від одиничного елементу випадкового коду або шумового сигналу, тому що приймання ведеться поелементним фільтром і, отже, потужності додаються на кожному елементі фільтра. Тому середня вихідна потужність шуму випадкового коду буде в N раз більше, ніж одиничного елемента, що збільшить пікове за потужністю відношення сигнал/шум на виході в N^2/N раз, а це дорівнює коефіцієнту стиснення імпульсу $N = T/\tau$.

Характеристики пристроїв на ПАХ сильно залежать від конструктивних особливостей зустрічно-штирових перетворювачів. Однорідний перетворювач з постійною довжиною електродів і однаковою відстанню між парами електродів зображено на рис.1.2. Припустимо, що ширина електрода дуже мала порівнянню з довжиною хвилі.

У [1, 2] показано, що за таких міркувань

$$\frac{\Delta\omega(3\text{дБ})}{\omega_0} = \frac{1}{n}.$$

Спадання характеристики на 3,0дБ відбувається в точках $\Delta\omega(3\text{дБ})/\omega_0=0,89/n$, що відображено на рис.1.4.

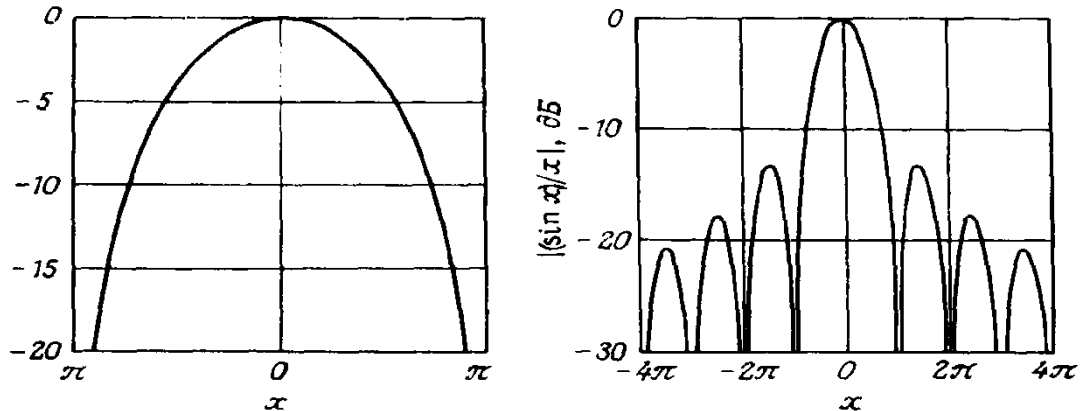


Рис. 1.4. Графіки функції $|(\sin x)/x|$ у децибелах.

Очевидно, що якщо певним чином змінити довжини електродів і відстань між ними, то можна одержати будь-яку форму відгуку перетворювача. Така зміна довжини електродів називається аподизацією. Наприклад, при однаковій відстані між електродами, якщо їхня довжина змінюється пропорційно $|(\sin x)/x|$, а полярність електрода залежить від знаку функції $(\sin x)/x$, то повний заряд на електроді буде змінюватися як $(\sin x)/x$. Вихідним сигналом перетворювача буде Фур'є-образ сигналу збудження електродів, унаслідок чого частотна характеристика буде прямокутною. Складність, звичайно, полягає в тому, що теоретично довжина перетворювача повинна бути нескінченною. Більш того, чим ближче електроди до краю перетворювача, тим меншу довжину вони повинні мати; при цьому основними стають процеси дифракції акустичної хвилі.

Найбільш очевидним, на перший погляд, методом аподизації є зовнішнє зважування. За допомогою зовнішніх шунтів (резистивних або

емнісних) між парами сусідніх електродів задаються різниці потенціалів, пропорційно амплітуді відповідного елементу імпульсного відгуку. Інтенсивність електричного поля між будь-якими сусідніми протифазними електродами визначається лише різницею їхніх потенціалів, оскільки апертюра перекриття всіх електродів постійна. Таким чином, інформація про закон модуляції “записана” в інтенсивності або щільності акустичного потоку. У цьому випадку вихідний перетворювач може мати довільну апертюру. Незалежно від апертюри сигнал на виході буде відповідати імпульсному відгуку вхідного перетворювача (враховуючи вплив кінцевої смуги пропускання вихідного). Ця важлива властивість зовнішнього зважування дозволяє поєднувати в спільному акустичному потоці одразу два аподизовані перетворювачі, значно збільшуючи пригнічення сигналів поза смугою пропускання [1, 2, 8, 11].

У методі безпосереднього зважування здійснюється зміна перекриття (довжини) електродів у відповідності з заданою імпульсною характеристикою. Цей вид зважування може розглядатися як амплітудно-імпульсна модуляція сигналу. Перевагою цього методу є висока роздільна здатність, оскільки зважування може відбуватися безперервно в широкому діапазоні.

Відомо, що для однорідного ЗШП амплітудно-частотна характеристика має вигляд $\text{Sin}X/X$ [1, 2, 11] і рівень бічних пелюсток дуже високий: $-13,46$ дБ. Однак, уже для фільтра, що складається з двох однакових однорідних ЗШП, рівень бічних пелюсток спадає до -27 дБ, що є наслідком згладжування імпульсної характеристики до країв. Такий результат підказує шлях зниження бічних пелюсток у фільтрах на ПАХ – згладжування імпульсної характеристики фільтра до країв, тобто множення її на деяку спадаючу до країв функцію, що зважує, названу функцією аподизації чи аподизація імпульсної характеристики. Цей метод широко застосовується в теорії цифрових фільтрів. Досить часто розробляється фільтр типу «косинус

на п'єдесталі», для якого функцію аподизації беруть у вигляді функції Хеммінга [1, 2, 8, 11].

Крім аподизації за Хеммінгом, можна використовувати й аподизацію Чебишева, Кайзера, SinX/X та ін., що дозволяють виконувати синтез фільтрів на ПАХ з характеристиками, що задовольняють вимогам сучасної радіоелектронної апаратури.

Однією з головних проблем, властивих методу зважування зміною довжини електродів, є точне відтворення малих амплітуд, що вимагається для реалізація затухання в смузі загородження понад 50...60 дБ. Це обмеження пов'язано з дією ефекту дифракції пучка ПАХ від малих апертур. Спотворення ж амплітудного і фазового фронтів ПАХ в аподизованому ЗШП практично виключають можливість використання двох подібних ЗШП в одному фільтрі з метою перемноження їхніх функцій передачі та послаблення вимог для вхідного перетворювача. Усунути цю проблему дозволяє використання іншого ЗШП із порівняно плоским фронтом випромінюваних ПАХ.

Відбиття від багатоелектродної структури можна зменшити, застосувавши структури ЗШП з розщепленими електродами, з зломом електродів поза зоною перекриття або секційні ЗШП з періодичним проріджуванням електродів. З метою зменшення втрат, обумовлених двонаправленістю випромінення ПАХ, використовують однонаправлені ЗШП, одна з половин якого зміщена на половину довжини хвилі і є відбивачем для оберненої ПАХ.

Значно розширити смугу пропускання в порівнянні з еквідистантними ЗШП можливо шляхом зважування просторового періоду електродів уздовж чи впоперек напрямку поширення ПАХ. Зважування при вибірковому вилученні електродів здійснюється завдяки перерозподілу зарядів між електродами, що виникло при цьому. Метод аналогічний комбінації часово-імпульсної та широтно-імпульсної модуляції сигналу. Застосування тих чи

інших конструкцій ЗШП з різними методами зважування визначається колом вимог до параметрів пристроїв на ПАХ.

Класифікація ЛЗ на ПАХ приведена на рис.1.5.

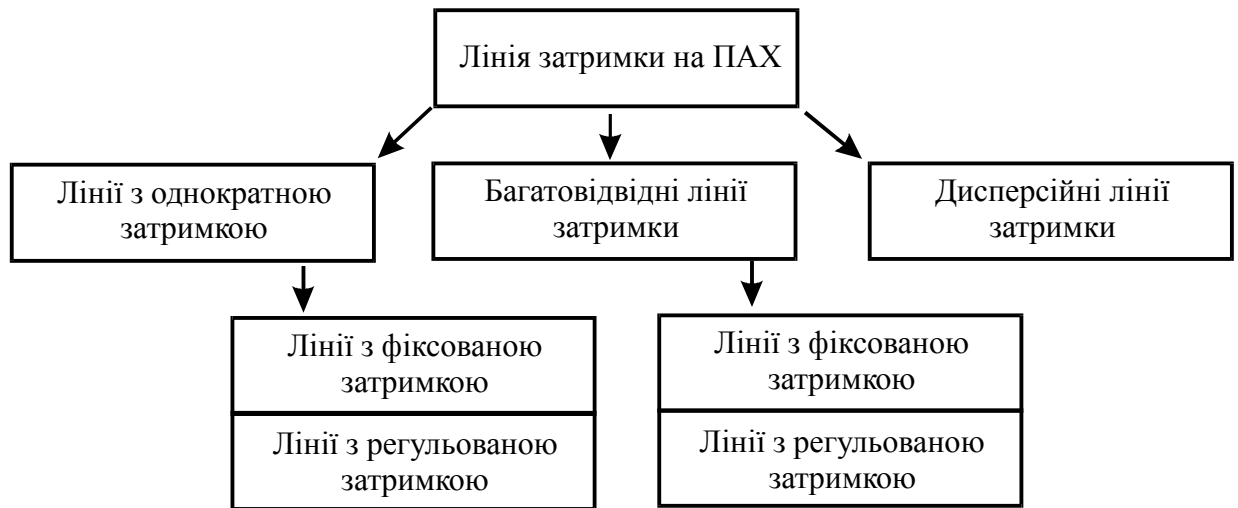


Рис.1.5. Класифікація ліній затримки на ПАХ

В таблиці № 1.1 приведено основні характеристики деяких ліній затримки на ПАХ, що виробляються серійно.

Таблиця 1.1.

Параметри ліній затримки на ПАХ

Найменування параметрів	Найменування ЛЗ на ПАХ		
	ЛЗПВ-1	ЛЗПВ-2	ЛЗПВ-3
Номинальна частота, МГц	15± 0,2	15± 0,2	15± 0,2
Смуга пропускання по рівню -6 дБ, МГц, не менше	6,0	6,0	6,0
Час затримки між вхідним сигналом і сигналом з першого відводу, мкс	2±0,05	3±0,05	3,2±0,01
Внесене згасання на останньому відводі, дБ, не більше	40	40	40
Температурний коефіцієнт затримки, 1/°С, не більше	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴

Висновки

1. Приведена порівняльна характеристика функціональних пристроїв на об'ємних і поверхневих акустичних хвилях. Дана класифікація ліній затримки та детально розглянуті найбільш характерні конструктивні реалізації ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях.

2. Функціональні можливості акустoeлектронних пристроїв значно розширились з переходом від простих приладів на об'ємних акустичних хвилях до значно складніших пристроїв на поверхневих акустичних хвилях, які знаходять широке використання для генерації й обробки високочастотних сигналів в електронних системах різноманітного призначення.

3. Великий інтерес до приладів на поверхневих акустичних хвилях зумовлено відомими особливостями перетворення й розповсюдження ПАХ, а також успіхами фото- та електронно-променевої літографії.

4. Функціональні пристрої на ПАХ в теперішній час представлені широкою номенклатурою пристроїв: вузькосмуговими та широкосмуговими фільтрами, лініями затримки, комутуючими пристроями; резонаторами на ПАХ, дисперсійними фільтрами стиснення ЛЧМ-сигналу, пристроями запам'ятовування й визначення частоти, генераторами на ПАХ, синтезаторами частот та рядом інших пристроїв.

2.ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Пристрої на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) широко використовуються в системах формування та обробки сигналів, вимірювальних перетворювачах фізичних та механічних величин. Вони починають активно впроваджуватися в системи безпроводних пасивних сенсорів та ідентифікатори об'єктів, що отримали назву «радіомітка» [13].

ПАХ являє собою акустичну хвилю, що розповсюджується в тонкому приповерхневому шарі матеріалу. Частинки матеріалу в ПАХ коливаються в площині, яка проходить через лінію розповсюдження хвилі і перпендикулярної до поверхні середовища. Швидкість розповсюдження ПАХ на п'ять порядків менша, ніж у електромагнітних хвиль – характерна швидкість ПАХ складає приблизно 3000 м/с. При цьому частота ПАХ знаходиться у радіочастотному діапазоні електромагнітних хвиль – зазвичай від 30 МГц до 3 ГГц. Відповідно, довжина хвилі ПАХ може складати від одного до кількох десятків мікрон. Амплітуда ПАХ лежить в межах нанометрового діапазону. Енергія ПАХ зменшується експоненціально зі збільшенням глибини – більша її частина зосереджена в приповерхневому шарі товщиною приблизно в одну довжину хвилі [13].

Якщо середовище розповсюдження ПАХ являється п'єзоелектричним матеріалом, тоді ПАХ може збуджувати електромагнітні хвилі, і, навпаки, для генерації ПАХ можна використовувати електромагнітні коливання. Для збудження і детектування ПАХ в п'єзоелектрику застосовують так звані зустрічно-штирєві перетворювачі (ЗШП). ЗШП складається з плоских паралельних металевих електродів, розташованих на поверхні п'єзоелектричного матеріалу і по чергово з'єднаних один з одним через спільні шини. Якщо до двох сусідніх електродів прикладена постійна напруга, то створене між ними електричне поле викликає пружну деформацію п'єзоелектрика (зворотній п'єзоэффект). Якщо ж прикласти змінну напругу до шин, то у п'єзоелектрику виникають гармонічні механічні

коливання. Ці коливання породжують ПАХ, яка розповсюджується в обидва боки від ЗШП. Процес детектування ПАХ відбувається у зворотному порядку: акустична хвиля, входячи у ЗШП, генерує розподіл електричного заряду між двома гребінками електродів (прямий п'єзоэффект) и тим самим формує вихідний електромагнітний сигнал у радіочастотному діапазоні [14].

Ефективність генерації та детектування ПАХ максимальна, коли період ЗШП співпадає з половиною довжини акустичної хвилі. Резонансна частота в свою чергу залежить від періоду ЗШП. Таким чином, змінюючи період ЗШП, можна підбирати необхідну частоту ПАХ.

В якості п'єзоелектрика використовують в основному монокристалічний кварц (SiO_2). Серед інших п'єзоелектричних матеріалів – оксид цинку (ZnO), ніобіт літію (LiNbO_3), танталат літію (LiTaO_3) та інші. Для виготовлення ЗШП використовують фотолітографічний метод.

2.1. Конструкція та принцип дії пасивної радіомітки на поверхневих акустичних хвилях.

В радіомітці, що складається із звукопроводу, вхідного/вихідного зустрічно-штирового перетворювача (ЗШП) ПАХ та масиву відбивних структур, використано принцип ортогонального частотного кодування (ОЧК). Недоліком пристрою є те, що при додаванні наступного біту кодової послідовності необхідно розширювати смугу пропускання системи, а застосування ОЧК потребує використання великої кількості електродів.

Радіомітка містить вхідний/ вихідний ЗШП, що призначений для узгодженої фільтрації вхідного сигналу радіозапиту з лінійно-частотною модуляцією, і вихідний масив електродів, що формує впорядковану у часі кодову послідовність імпульсів, що створює ідентифікаційну інформацію про дану радіомітку. Недоліком пристрою є те, що вихідний сигнал має часову модуляцію. Зміна умов оточуючого середовища (температура, тиск, вологість) призводить до зміни часу затримки, а отже до зміни вихідного коду [15].

Стиснення вхідного сигналу радіозапиту та режим множинного доступу у запропонованій радіомітці досягається тим, що вхідний/вихідний перетворювач виготовляється у вигляді секцій електродів різного періоду, з'єднаних спільною шиною, і є узгодженим фільтром для приймання та стиснення частотно-модульованого сигналу радіозапиту. Кількість секцій електродів (частот кодування) та порядок їх розміщення може змінюватися для забезпечення унікальної адреси радіомітки та режиму множинного доступу у системах, побудованих на основі цих пристроїв [15-21].

На рис.2.1 зображено приклад топології вхідного/вихідного ЗШП з 5-ма частотами кодування, який має 5 секцій електродів різного періоду, кожна з яких призначена для перетворення електричного сигналу певної частоти, де в ПАХ та навпаки. Порядок слідування частот кодування може змінюватися, за рахунок чого реалізується множинний доступ у вимірювальних системах, адже кожен сенсор отримує свою унікальну адресу. Опитування кожного окремого сенсору проводиться узгодженим до нього сигналом радіозапиту[15-21].

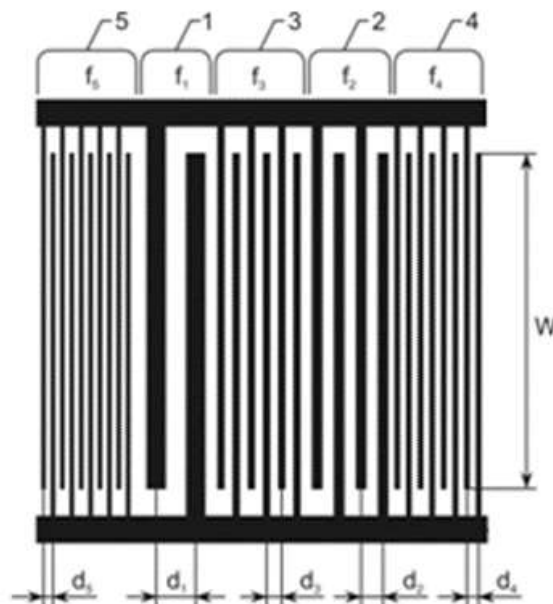


Рис.2.1. Конструкція перетворювача з 5-ма частотами кодування.

Ширина смуги пропускання та форма амплітудно-частотної характеристики кожної групи електродів головним чином визначається

півперіодом слідування електродів d_k та їх шириною, кількістю електродів у кожній секції N_k та апертурою перетворювача W . Півперіод електродів d_k вибирається рівним половині довжини ПАХ: $d_k = V/2f_k$, де V – швидкість поширення ПАХ на поверхні звукопроводу; f_k – центральна частота, на яку розрахована секція електродів. Кількість електродів N_k визначається з умови рівності акустичної та електричної добротностей перетворювача, а апертура W з умов узгодження перетворювача з навантаженням [4, 15,17].

Узгоджений сигнал радіозапиту (рис.2.2) у вигляді набору сигналів з різною частотою, тривалість яких однакова, а порядок слідування визначається топологією вхідного/вихідного перетворювача ПАХ.

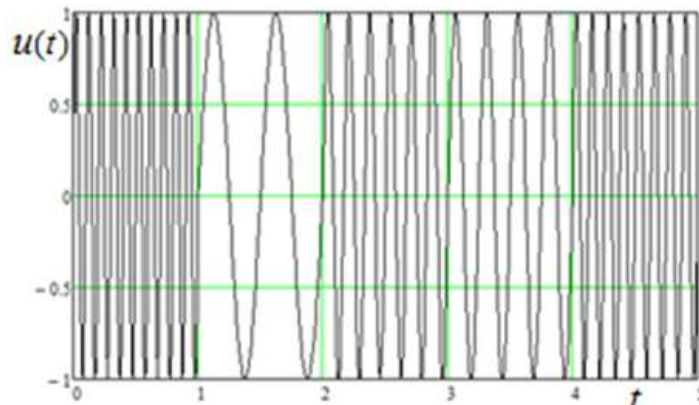


Рис.2.2. Сигнал радіозапиту узгоджений до вхідного перетворювача.

При надходженні такого сигналу на перетворювач відбувається його стиснення з коефіцієнтом стиснення n , де n – кількість частот кодування.

Пасивна радіомітка на поверхневих акустичних хвилях (рис.2.3) представляє собою ретранслюючий одновходовий пристрій на ПАХ, що містить п'єзоелектричний звукопровід 1 з термостабільними характеристиками, на поверхні якого розміщено верхню струмопровідну шину 2, нижню струмопровідну шину 3, вхідний перетворювач для стиснення ЧМ – сигналу 4 та масив вихідних електродів 5. Радіомітка містить вбудовану антену 6, що з'єднана з верхньою та нижньою струмопровідними шинами. Для зменшення помилкових сигналів на торцях звукопроводу

нанесено поглинаючі покриття 7 та 8. Вхідний/вихідний перетворювач 4 та масив електродів 5 також з'єднані з верхньою та нижньою струмопровідними шинами та конструктивно формують радіомітку на ПАХ 9. Від вхідного перетворювача 4 в напрямку масиву електродів 5 поширюється поверхнева акустична хвиля 10 [15-21].

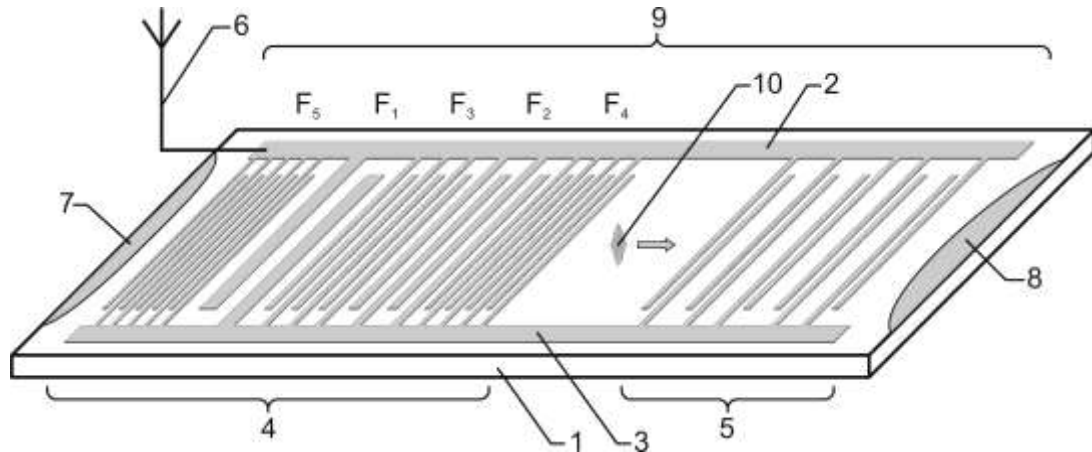


Рис.2.3. Конструкція радіомітки на ПАХ.

Вхідний/вихідний перетворювач 4 призначений для узгодженої фільтрації вхідного сигналу радіозапиту з частотною модуляцією. У вихідному масиві електродів 5 кодова послідовність формується за рахунок того, що суворе впорядкованість в чергуванні електродів протилежної полярності (+--+--+--+--) місцями змінюється (для прикладу, +-+--+--+--+). Таким чином, можна довільно задавати фазу високочастотної несучої всередині сигналу радіовідгуку [15-21].

Узгоджений сигнал радіозапиту 11 (рис.2.4) представляє собою сигнал з частотною модуляцією (ЧМ) і являє обернену в часі імпульсну характеристику вхідного/вихідного перетворювача. Вихідний сигнал радіовідгуку 12 (рис.2.4) містить послідовність з однакових за тривалістю відрізків високочастотної несучої, фаза яких змінюється у відповідності з чергуванням електродів у вихідному масиві електродів. Ця послідовність являє собою позиційний двійковий код з розрядами «1» та «0», яким відповідають фази «0°» та «180°» відрізків високочастотної несучої, тобто застосована фазо-кодова модуляція (ФКМ). ЧМ та ФКМ – сигнали

відносяться до складних сигналів та дозволяють збільшити радіус дії систем радіоідентифікації за рахунок збільшення відношення сигнал/шум та забезпечити захищеність при кореляційній обробці інформаційних сигналів у приймачі. Складні сигнали характеризуються базою сигналу $B = \Delta f \cdot T$, де Δf - ширина спектру сигналу; T - його тривалість. Для ЧМ ПАХ – пристроїв без відбивних структур B лежить в межах від 10 до 500.

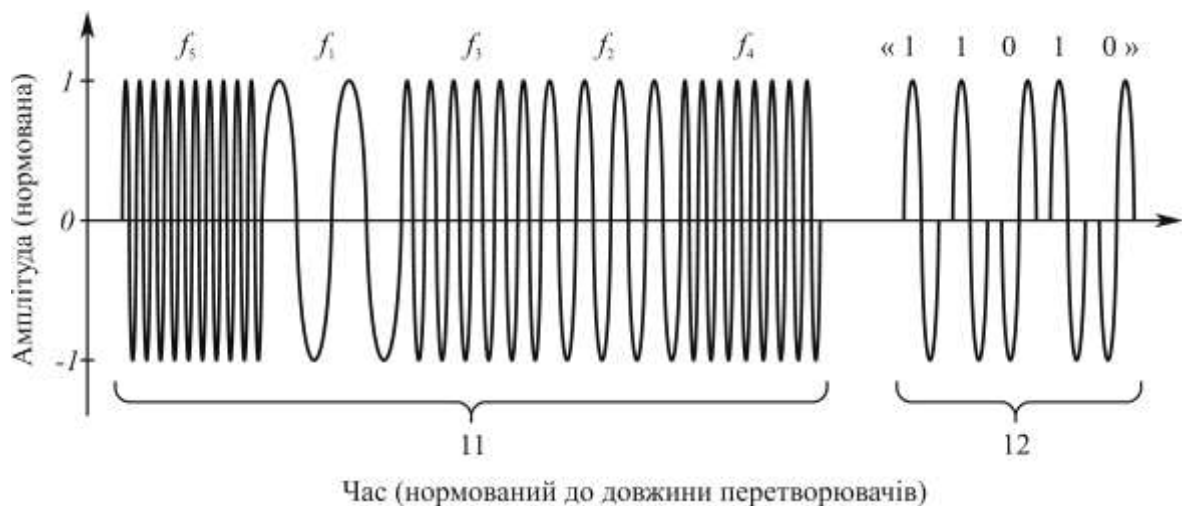


Рис.2.4. Сигнал радіозапиту (11) та радіовідгуку (12) для безпроводної пасивної радіомітки на поверхневих акустичних хвилях.

Розглянемо більш детально процес стиснення сигналу у вхідному/вихідному перетворювачі. Порядок слідування частот кодування в узгодженому сигналі радіозапиту відповідає порядку слідування цих частот у перетворювачі. Таким чином, в представленому прикладі на рис.2.3 та 2.4 першим на перетворювач надходить сигнал з частотою f_5 , далі сигнал з частотою f_1 і т.д. Тривалість сигналу кожної частоти дорівнює часу поширення ПАХ через відповідну групу електродів перетворювача. Отже, на сигнал з частотою f_5 «реагує» лише група електродів F_5 , перетворюючи його у ПАХ. Після проходження цієї ПАХ через групу F_5 на перетворювач надходить сигнал з частотою f_1 , на який реагує група електродів F_1 , перетворюючи його на ПАХ. При цьому, відбувається додавання ПАХ створеної групою F_5 та групою F_1 . Так продовжується, доки ПАХ не

проходить останню групу електродів F_4 . Результуюча ПАХ на виході перетворювача має амплітуду в 5 разів більшу за амплітуду ПАХ, створеної окремою групою електродів [15-18].

2.2. Система ідентифікації з пасивною радіоміткою на поверхневих акустичних хвилях.

Система радіочастотної ідентифікації (рис.2.5), зазвичай, складається з пристрою опитування та обробки інформації 13 (ПООІ) та декількох радіоміток 14 - 16. Радіусом дії системи 17 називається максимальна відстань між радіоміткою та ПООІ, при якій приймач ПООІ може виділити корисний сигнал мітки для подальшої обробки та оцінки на фоні перешкод та шумів.

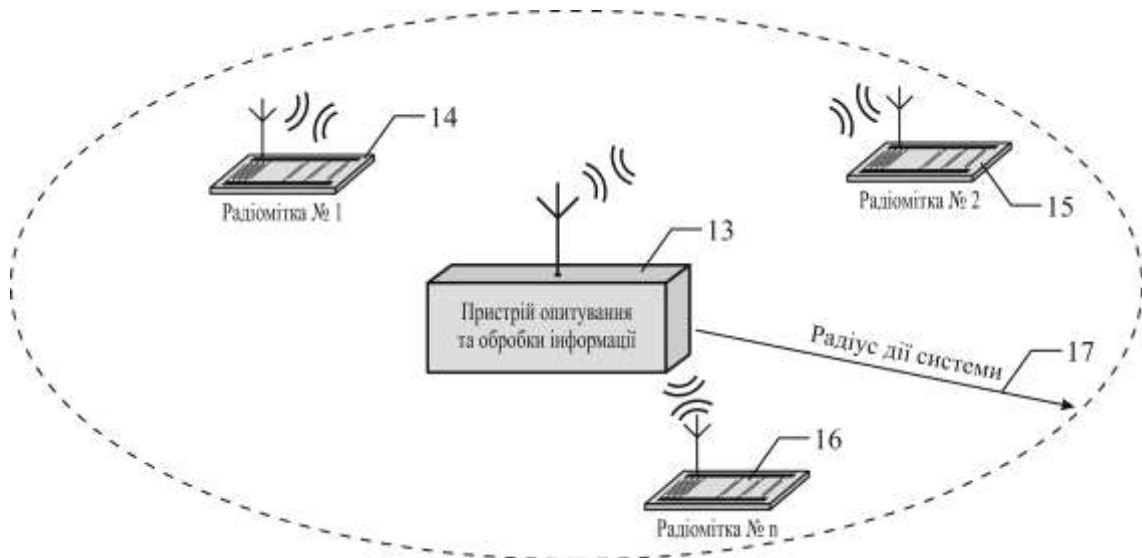


Рис.2.5. Система радіоідентифікації для роботи з безпроводними пасивними радіомітками на ПАХ.

Робота пристрою опитування та обробки інформації поділена на два етапи. Перший – запит, під час якого передавач через антену надсилає сигнал радіозапиту на всі пристрої в радіусі дії системи; другий етап - прийом від радіоміток сигналів радіовідгуку [15,19,20].

Під час радіозапиту, від пристрою опитування та обробки інформації узгоджений сигнал радіозапиту через радіоканал поступає на антени радіоміток на ПАХ. Антена перетворює радіосигнал в електричний сигнал,

що поступає на вхідні перетворювачі 4 (рис.2.3), що виконують перетворення електричного сигналу в поверхневу акустичну хвилю, разом з тим, виконуючи її стиснення. Імпульс ПАХ 10 рухається у напрямку масиву електродів 5, які частково відбивають ПАХ у зворотному напрямку. Зворотна хвиля, проходячи під структурою електродів 4, завдяки прямому п'єзоефекту збуджує вихідну кодовану послідовність, з подальшим її випроміненням через антену 6. Приймач ПООІ, що через радіоканал зв'язаний з радіоміткою на ПАХ, після надходження на нього сигналу радіовідгуку здійснює його обробку (підсилення, фільтрацію, кореляційний аналіз тощо).

Для забезпечення синхронної роботи кожної групи електродів та перетворювача в цілому, необхідно забезпечити ортогональність частот кодування. Умову ортогональності можна сформулювати наступним чином: максимум на спектрі сигналу однієї частоти приходить на нуль на спектрі сигналу суміжної частоти. На рис.2.6 приведено спектр вхідного сигналу радіозапиту, зображеного на рис.2.4, за умови, що частоти кодування відповідають умові ортогональності [16-20].

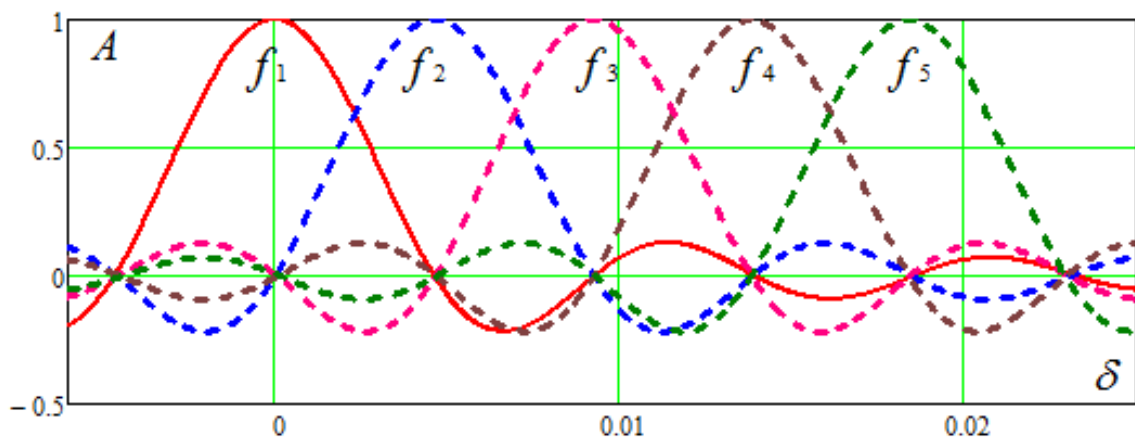


Рис.2.6. Спектр сигналу радіозапиту з ортогональним частотним кодуванням.

На рис.2.7 приведена відносна амплітудно – частотна характеристика узгодженої групи електродів вхідного/вихідного перетворювача. Як видно, за базової умова ортогональності частот кодування, головні пелюстки суміжних частот перекриваються по рівню -2 дБ, що неприпустимо мало для надійної роботи системи [15-21].

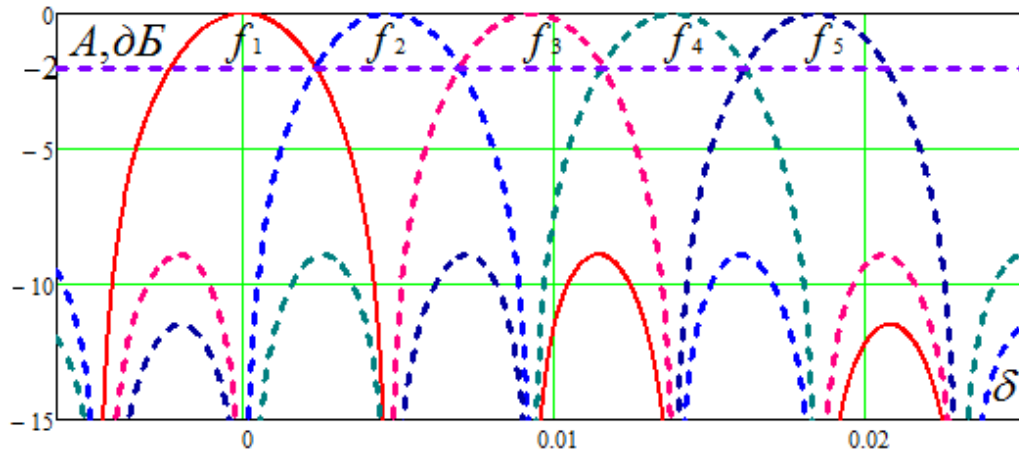


Рис.2.7. АЧХ вхідного/вихідного перетворювача з ортогональним частотним кодуванням.

Тому на практиці, часто використовують псевдоортогональне кодування, коли максимум у спектрі однієї частоти припадає на нуль першого або наступних бічних пелюсток на спектрі суміжної частоти (рис.2.8).

У цьому випадку головні пелюстки суміжних частот перекриваються по рівню -5 дБ. Таким чином, додається охоронний інтервал, що слугує захистом від інтерференції при багатопробієвому поширенні ПАХ.

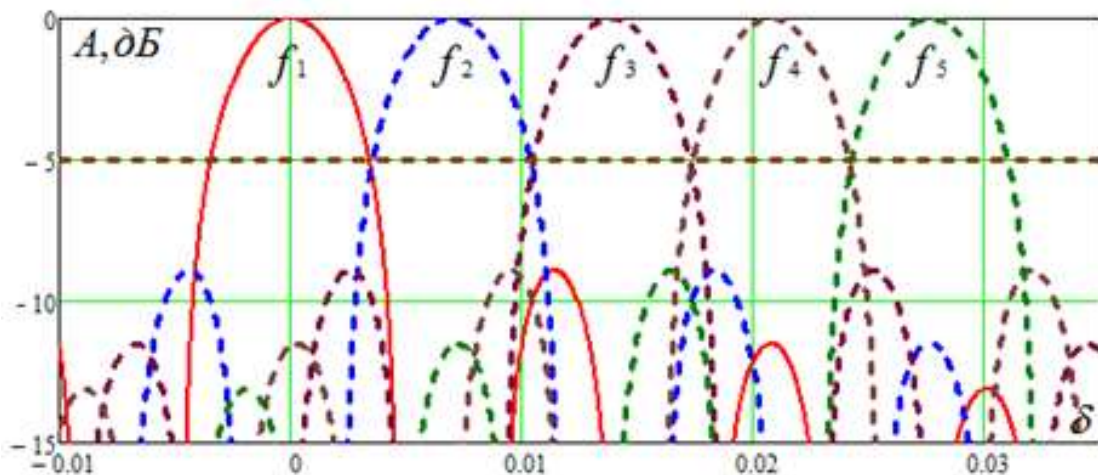


Рис.2.8. АЧХ вхідного/вихідного перетворювача з псевдоортогональним частотним кодуванням.

Оскільки сенсори на ПАХ є пасивними компонентами, що не мають у своєму складі будь-яких активних логічних елементів, неможливо опитати

кожен сенсор окремо. Сигнал радіозапиту від ПООІ надходить на кожен сенсор в радіусі дії і кожен сенсор ретранслює сигнал радіовідгуку. Таким чином, на вхід приймача ПООІ поступає сума сигналів відгуків усіх сенсорів в радіусі дії. Дана обставина значно ускладнює схему обробки вимірювальної інформації.

Для забезпечення роботи декількох сенсорів на ПАХ з одним ПООІ, тобто забезпечення множинного доступу можна використати наступні технології: множинний доступ з частотним розділенням каналів (frequency division multiple access, FDMA), множинний доступ з часовим розділенням каналів (time division multiple access, TDMA); множинний доступ з кодовим розділенням каналів (code division multiple access, CDMA), множинний доступ з просторовим розділенням каналів (space division multiple access, SDMA) або комбінації цих технологій.

Технологія SDMA заснована на надходженні на приймач ПООІ відгуку з достатньою амплітудою та відношенням сигнал/шум лише від одного сенсору, що реалізується завдяки вибору ширини діаграми направленості антени або r^4 (де r – відстань від антени до точки вимірювання) затуханню при поширенні. Технологія просторового розділення може бути використана для сенсорів, що рухаються за певним маршрутом на достатній відстані один від одного. Сенсори з SDMA технологією використовуються переважно для ідентифікації, де амплітудні та фазові помилки менш суттєві. Так, на основі даної технології реалізована система оплати за користування дорогами навколо Осло KOFRI. Перевагою систем з просторовим розділенням є те, що можна використовувати всі комбінації сімейства кодів, за виключенням першого та останнього бітів. Наприклад, за допомогою дворозрядного коду довжиною 32 біти можна присвоїти унікальний ідентифікаційний код 2^{30} сенсорам.

У разі роботи ПООІ з декількома сенсорами за TDMA технологією доступу, кожному сенсору виділено певний часовий інтервал, в якому він

може здійснювати передачу вимірювальної інформації. Вибір часового інтервалу реалізується через зміну часу затримки сигналу в сенсорі, а отже через зміну довжини звукопроводу. Практично реалізовані вимірювальні системи з десятима одночасно працюючими сенсорами на ПАХ із TDMA технологією. Недоліком цієї технології є те, що при збільшенні довжини звукопроводу зростають внутрішні втрати в сенсорі, що призводить до обмеження радіусу дії. Окрім того, необхідно чітко підбирати час затримки сенсорів до їх просторового положення відносно ПООІ аби забезпечити розділення сигналів відгуків.

Технологія CDMA передбачає нанесення на поверхню звукопроводу масиву відбивачів, причому просторове положення кожного відбивача відносно вхідного/вихідного ЗШП визначається ідентифікаційним кодом присвоєним даному сенсорю. За допомогою CDMA та відповідної системи обробки інформації реалізовані вимірювальні системи з 10-ма одночасно працюючими сенсорами. Недоліком технології є те, що максимальний радіус дії сенсорю обмежений сигналом, що ретрансльований останнім відбивачем. Враховуючи те, що сигнал відгуку зазнає багаторазового перевідбиття у масиві відбивачів, це призводить до нерівномірності амплітуди імпульсів в кожному розряді коду.

Останнім часом, для забезпечення множинного доступу для сенсорів на ПАХ, все частіше використовують технологію ортогонального частотного кодування (orthogonal frequency coding, OFC). Технологія ортогонального частотного кодування (ОЧК) передбачає залежність базового набору частот та їх смуг пропускання, що повинні відповідати умові ортогональності. В порівнянні з CDMA технологією, ОЧК технологія передбачає використання окремої ортогональної частоти для кожного розряду коду, що дозволяє отримати вихідний сигнал з рівномірною амплітудою імпульсів в кожному розряді. Таким чином, ОЧК технологія дозволяє збільшити радіус дії сенсорів на ПАХ та збільшити кількість сенсорів, що можуть одночасно працювати з одним ПООІ. Однак, проста заміна CDMA на ОЧК не

призводить до поліпшення параметрів вимірювальних систем з пасивними сенсорами на ПАХ. Як і раніше, необхідно поєднувати її з TDMA технологією.

Вибір технології забезпечення множинного доступу в першу чергу залежить від чутливого елемента, що використовується для побудови безпроводного сенсору. Для пристроїв на ПАХ з відбивними структурами можуть бути застосовані TDMA та CDMA технології доступу. Окрім вимірювальної інформації ці пристрої здатні надсилати свій ідентифікаційний номер, що значно полегшує процедуру калібрування та вимірювання. З іншої сторони, сенсори з відбивачами мають високі привнесені втрати та потребують широкої робочої смуги частот.

Однопортові ПАХ резонатори характеризуються меншими привнесеними втратами. Резонатори є вузькосмуговими приладами і можуть працювати на фіксованих частотах нижче 1 ГГц. Однак, девіація частоти в резонаторах надзвичайно мала і не перевищує 1%, що не дозволяє розробляти на їх основі високочутливі та точні сенсори. Окрім того, в сенсорах даного типу неможливо реалізувати створення ідентифікаційної інформації. Тож для резонаторних сенсорів на ПАХ може бути використана лише FDMA технологія забезпечення множинного доступу. Слід зазначити, що вимоги до антен для резонаторних сенсорів та сенсорів з відбивачами різні. Так, необхідно виключити вплив імпедансу антени на резонансну частоту. Антенний вихід, також, повинен забезпечувати проходження імпульсів високої амплітуди та малої тривалості.

Суттєвим недоліком усіх існуючих на сьогодні технологій забезпечення множинного доступу є відсутність можливості індивідуального опитування окремого пасивного сенсору на ПАХ. Це призводить до того, що при опитуванні, кожен сенсор в радіусі дії ПООІ надсилає свій сигнал радіовідгуку, таким чином створюючи додаткові перешкоди та погіршуючи надійність системи вимірювання.

2.3. Ортогонально-частотне кодування.

Поширення сигналів у відкритому середовищі, якою є радіоефір, супроводжується виникненням всякого роду перешкод, джерелом яких служать самі поширювані сигнали. Класичний приклад такого роду перешкод - ефект багатопроменевої інтерференції сигналів, що полягає в тому, що в результаті багаторазових відображень сигналу від природних перешкод один і той же сигнал може потрапляти в приймач різними шляхами. Але подібні шляхи поширення мають і різні довжини, а тому для різних шляхів поширення ослаблення сигналу буде неоднаковим. Отже, в точці прийому результуючий сигнал являє собою суперпозицію (інтерференцію) багатьох сигналів, що мають різні амплітуди і зміщених одна відносно одної за часом, що еквівалентно додаванню сигналів з різними фазами [22].

Наслідком багатопроменевої інтерференції є спотворення сигналу. Багатопроменева інтерференція властива будь-якому типу сигналів, але особливо негативно вона позначається на широкосмугових сигналах. Справа в тому, що при використанні широкосмугового сигналу в результаті інтерференції певні частоти складаються синфазно, що призводить до збільшення сигналу, а деякі, навпаки, - протифазно, викликаючи ослаблення сигналу на даній частоті.

Говорячи про багатопроменеву інтерференцію, що виникає при передачі сигналів, розрізняють два крайніх випадки. У першому випадку максимальна затримка між різними сигналами не перевищує часу тривалості одного символу і інтерференція виникає в межах одного переданого символу. У другому випадку максимальна затримка між різними сигналами більше тривалості одного символу, а в результаті інтерференції складаються сигнали, що представляють різні символи, і виникає так звана між символна інтерференція (Inter Symbol Interference, ISI).

Найбільш негативно на спотворення сигналу впливає між символна інтерференція. Оскільки символ - це дискретне стан сигналу, що характеризується значеннями частоти несучої, амплітуди і фази, то для різних символів змінюються амплітуда і фаза сигналу, тому відновити вихідний сигнал вкрай складно.

Щоб уникнути, а точніше, частково компенсувати ефект багатопроменевого поширення, використовуються частотні еквалайзери, проте у міру зростання швидкості передачі даних або за рахунок збільшення символної швидкості, або через ускладнення схеми кодування, ефективність використання еквалайзерів падає [22].

У стандарті 802.11b з максимальною швидкістю передачі 11 Мбіт / с при використанні ССК-кодів схеми компенсації між символної інтерференції цілком успішно справляються з покладеною на них завданням, але при більш високих швидкостях такий підхід стає неприйнятним.

Тому при більш високих швидкостях передачі застосовується принципово інший метод кодування даних - ортогональне частотне розділення каналів ущільнення каналів (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Ідея даного методу полягає в тому, що потік переданих даних розподіляється по безлічі частотних підканалів і передача ведеться паралельно на всіх цих підканалах. При цьому висока швидкість передачі досягається саме за рахунок одночасної передачі даних по всіх каналах, а швидкість передачі в окремому підканалі може бути і невисокою.

Оскільки в кожному з частотних підканалів швидкість передачі даних можна зробити не надто високою, це створює передумови для ефективного придушення між символної інтерференції.

При частотному поділі каналів необхідно, щоб ширина окремого каналу була, з одного боку, досить вузької для мінімізації спотворення сигналу в межах окремого каналу, а з іншого - досить широкою для забезпечення необхідної швидкості передачі. Крім того, для економного

використання всієї смуги каналу, яке поділяється на підканали, бажано якомога щільніше розташувати частотні підканали, але при цьому уникнути міжканальної інтерференції, щоб забезпечити повну незалежність каналів один від одного. Частотні канали, які задовольняють перерахованим вимогам, називаються ортогональними. Несучі сигнали всіх частотних підканалів (а точніше, функції, що описують ці сигнали) ортогональні один одному [22].

Важливо, що хоча самі частотні підканали можуть частково перекривати один одного, ортогональність несучих сигналів гарантує частотну незалежність каналів один від одного, а, отже, і відсутність міжканальної інтерференції (рис.2.9).

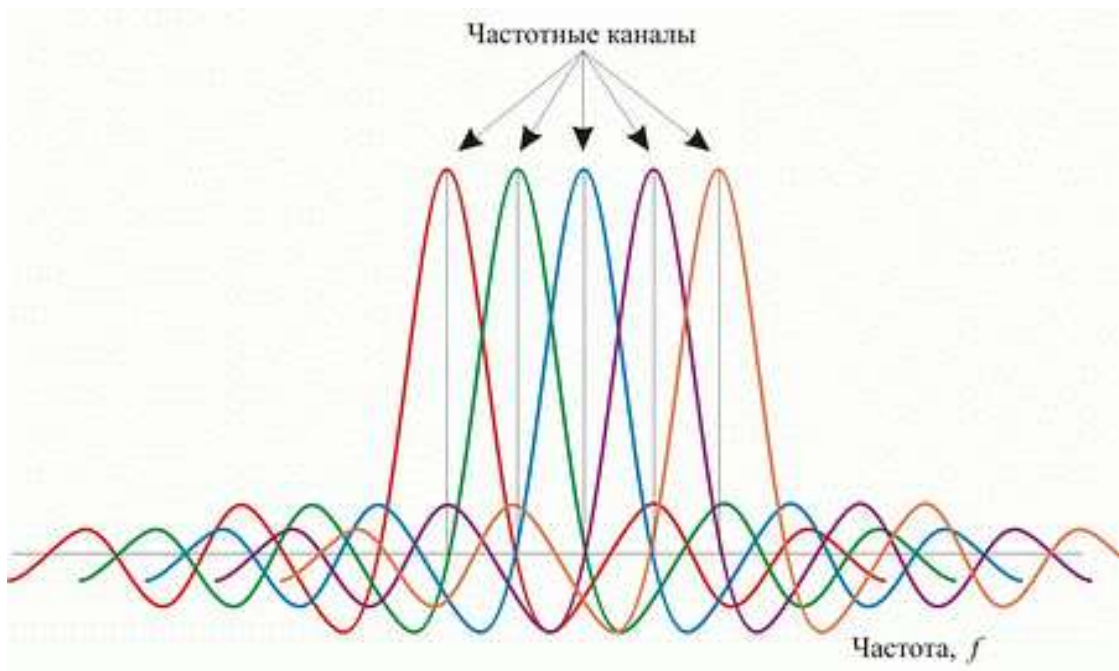


Рис.2.9. Приклад перекриваючих частотних каналів з ортогональними несучими.

Розглянутий спосіб розподілу широкосмугового каналу на ортогональні частотні підканали називається ортогональним частотним поділом ущільнення каналів (OFDM). Одним з ключових переваг методу OFDM є поєднання високої швидкості передачі з ефективним протистоянням багатопроменевого розповсюдження. Якщо говорити точніше, то сама по

собі технологія OFDM не усуває багатопроменеве поширення, але створює передумови для усунення ефекту міжсимвольної інтерференції. Справа в тому, що невід'ємною частиною технології OFDM є охоронний інтервал (Guard Interval, GI) - циклічне повторення закінчення символу, прилаштовується на початку символу (рис.2.10).

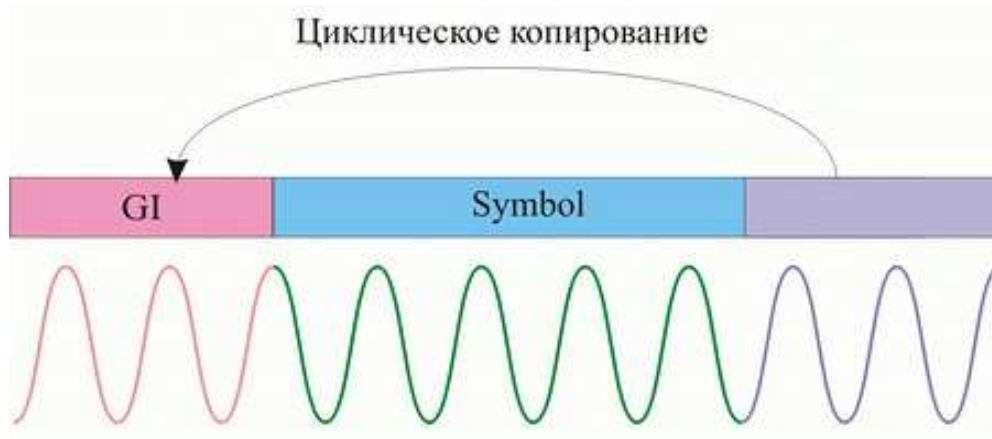


Рис. 2.10. Охоронний інтервал GI.

Охоронний інтервал є надлишковою інформацією і в цьому сенсі знижує корисну (інформаційну) швидкість передачі, але саме він служить захистом від виникнення міжсимвольної інтерференції. Ця надлишкова інформація додається до переданому символу в передавачі і відкидається при прийомі символу в приймачі.

Наявність охоронного інтервалу створює тимчасові паузи між окремими символами, і якщо тривалість охоронного інтервалу перевищує максимальний час затримки сигналу в результаті багатопроменеве поширення, то міжсимвольної інтерференції не виникає (рис. 2.11).

При використанні технології OFDM тривалість охоронного інтервалу становить одну четверту тривалості самого символу. При цьому сам символ має тривалість 3,2 мкс, а охоронний інтервал - 0,8 мкс. Таким чином, тривалість символу разом з охоронним інтервалом становить 4 мкс.

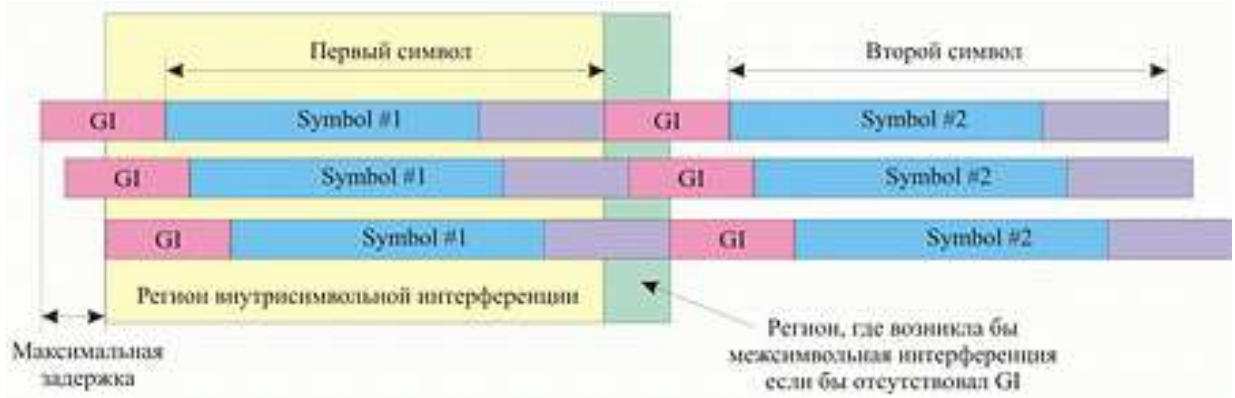


Рис.2.11. Уникнення міжсимвольної інтерференції за рахунок використання охоронних інтервалів.

Швидкісні режими і методи кодування в протоколі 802.11g

У протоколі 802.11g передбачено передачу на швидкостях 1, 2, 5,5, 6, 9, 11, 12, 18, 22, 24, 33, 36, 48 і 54 Мбіт / с. Деякі з даних швидкостей є обов'язковими, а деякі - опціональними. Крім того, одна і та ж швидкість може реалізовуватися при різній технології кодування. Ну і як вже зазначалося, протокол 802.11g включає в себе як підмножина протоколи 802.11b / b +.

Технологія кодування RBCC опціонально може використовуватися на швидкостях 5,5; 11; 22 і 33 Мбіт / с. Взагалі ж в самому стандарті обов'язковими є швидкості передачі 1; 2; 5,5; 6; 11; 12 і 24 Мбіт / с, а більш високі швидкості передачі (33, 36, 48 і 54 Мбіт / с) - опціональними.

Відзначимо, що для обов'язкових швидкостей в стандарті 802.11g використовується тільки кодування ССК і OFDM, а гібридне кодування і кодування RBCC є опціональним. Співвідношення між різними швидкостями передачі і використовуваними методами кодування відображено в табл. 3.

Говорячи про технології частотного ортогонального поділу каналів OFDM, застосовуваної на різних швидкостях в протоколі 802.11g, ми до сих пір не торкалися питання про метод модуляції несучого сигналу.

Нагадаємо, що в протоколі 802.11b для модуляції використовувалася або двійкова (BDPSK), або квадратурная (QDPSK) відносна фазова

модуляція. У протоколі 802.11g на низьких швидкостях передачі також використовується фазова модуляція (тільки не відносна), тобто двійкова і квадратурна фазові модуляції BPSK і QPSK. При використанні BPSK-модуляції в одному символі кодується тільки один інформаційний біт, а при використанні QPSK-модуляції - два інформаційних біта. Модуляція BPSK використовується для передачі даних на швидкостях 6 і 9 Мбіт / с, а модуляція QPSK - на швидкостях 12 і 18 Мбіт / с.

Для передачі на більш високих швидкостях використовується квадратурна амплітудна модуляція QAM (Quadrature Amplitude Modulation), при якій інформація кодується за рахунок зміни фази і амплітуди сигналу. У протоколі 802.11g використовується модуляція 16-QAM і 64-QAM. У першому випадку мається 16 різних станів сигналу, що дозволяє закодувати 4 біта в одному символі. У другому випадку мається вже 64 можливих станів сигналу, що дозволяє закодувати послідовність 6 біт в одному символі. Модуляція 16-QAM застосовується на швидкостях 24 і 36 Мбіт / с, а модуляція 64-QAM - на швидкостях 48 і 54 Мбіт / с.

Природно, виникає питання: чому при одному і тому ж типі модуляції можливі різні швидкості передачі. Розглянемо, наприклад, модуляцію BPSK, при якій швидкість передачі даних становить 6 або 9 Мбіт / с. Справа в тому, що при використанні технології OFDM використовується згорткове кодування з різними пунктурними кодерами, що призводить до різної швидкості згорткового кодування. В результаті при використанні одного і того ж типу модуляції можуть виходити різні значення інформаційної швидкості - все залежить від швидкості згорткового кодування. Так, при використанні BPSK-модуляції зі швидкістю згорткового кодування $1/2$ отримуємо інформаційну швидкість 6 Мбіт / с, а при використанні згорткового кодування зі швидкістю $3/4$ - 9 Мбіт / с.

2.4. Порядок розрахунку ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях.

1. Розраховуємо число штирів ЗШП за формулою:

$$N = 2f_0 \frac{\alpha}{\Delta f}$$

N -число штирів ЗШП; f_0 -центральна робоча частота; Δf -смуга пропускання; α -коефіцієнт 0,6-0,8, який враховує обвуження наскрізної смуги пропускання при перемножуванні АЧХ вхідного і вихідного перетворювачів.

2. Будуємо графік (рис.2.12) залежності кількості штирів N від Q_a і Q_e . Графік будуємо для 7 різних п'єзоматеріалів.

$$Q_a = \frac{N}{2}$$

$$Q_e = \frac{\pi}{8k_m^2 N}$$

k_m^2 -коефіцієнт електро-механічного зв'язку.

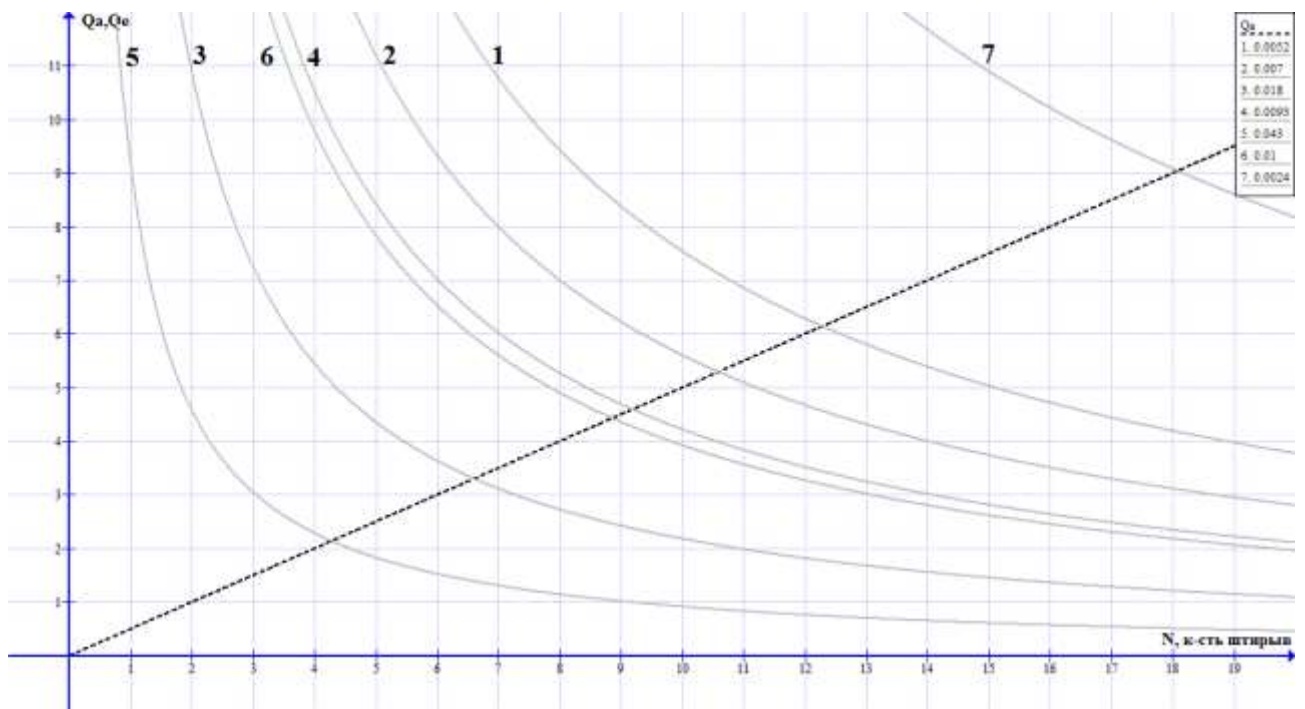


Рис.2.12 Залежність акустичної та електричної добротності Q_a і Q_e від кількості штирів N .

З графіку обираємо один з матеріалів дотримуючись умови $N_{розр} = N_{онт.}$ (номер на рис.2.12 відповідає номеру у таблиці 2.1)

3. Параметри матеріалу, а саме V_a і k_m^2 , обираємо з таблиці відповідно до обраного матеріалу у п.2.

Таблиця 2.1.

№	П'єзоматеріал	$v_a, \text{км/с}$	k_m^2
1	Ніобат літію	3,48-4,0	0,0052-0,0554
2	Германат бісмут	1,62-1,7	0,007-0,0164
3	Силікат бісмуту	1,7	0,018
4	Танталат літію	3,22-3,3	0,0069-0,0093
5	П'єзокераміка	2,21	0,043
6	Окис цинку	2,7	0,01
7	П'єзокварц	3,15-3,2	0,0012-0,0024

4. За допомогою отриманих параметрів у п.2 і п.3 знаходимо відстань між однофазними штирями h , апертуру ЗШП W , відстань між перетворювачами (їх центрами) L , ширина штиря d .

$$h = \frac{v_a}{f_0}$$

$$L = t_3 v_a$$

$$W = \sqrt{t_3 v_a \lambda_a}$$

v_a - швидкість розповсюдження хвилі у даному п'єзоматеріалі (обираємо з таблиці).

$\lambda_a = h$ - для забезпечення умови акустичного синхронізму.

$$d \leq \frac{1}{2} h'$$

де $h' = \frac{h}{2}$ - відстань між протифазними штирями.

Висновки

1. Пристрої на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) широко використовуються в системах формування та обробки сигналів, вимірювальних перетворювачах фізичних та механічних величин. Вони починають активно впроваджуватися в системи безпроводних пасивних сенсорів та ідентифікатори об'єктів, що отримали назву «радіомітка».

2. Принцип дії приладі на поверхневих акустичних хвилях полягає у використанні прямого та зворотного п'єзоефекту для перетворення енергії електромагнітних хвиль у механічну і навпаки.

3. Оскільки сенсори на ПАХ є пасивними компонентами, що не мають у своєму складі будь-яких активних логічних елементів, неможливо опитати кожен сенсор окремо. Сигнал радіозапиту від ПООІ надходить на кожен сенсор в радіусі дії і кожен сенсор ретранслює сигнал радіовідгуку. Таким чином, при використанні певних технологій реалізовується множинний доступ.

4. Поширення сигналів у відкритому середовищі, якою є радіоефір, супроводжується виникненням всякого роду перешкод, джерелом яких служать самі поширювані сигнали. Тому для зменшення впливу перешкод на практиці використовують ортогонально-частотне кодування (або псевдоортогонально-частотне кодування), що дозволяє збільшити відношення сигнал/шум і виділити корисний сигнал на фоні шуму. Що в свою чергу є завадостійким кодуванням радіосигналу.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОМІТКИ НА ПАХ

Початкові параметри радіомітки на ПАХ:

- нижня та верхня границі смуги пропускання: $f_H = 430 \text{ МГц}$, $f_B = 440 \text{ МГц}$;
- кількість частот кодування – 5;
- фазова швидкість ПАХ $V = 3488 \text{ м/с}$ (для звукопроводу з ніобіту літію YZ-зрізу);
- тривалість сигналу радіозапиту $\tau = 1 \text{ мкс}$.

Визначаємо:

- смуга пропускання системи:

$$\Delta f = f_B - f_H = 440 \text{ МГц} - 430 \text{ МГц} = 10 \text{ МГц};$$

- смуга пропускання частоти кодування:

$$\Delta f_k = \Delta f / 5 = 10 \text{ МГц} / 5 = 2 \text{ МГц};$$

- частоти кодування визначаються за формулою

$$f_k = f_H + 0,5(2k - 1) \cdot \Delta f_k :$$

$$f_1 = 430 \text{ МГц} + 0,5(2 \cdot 1 - 1) \cdot 2 = 431 \text{ МГц};$$

$$f_2 = 430 \text{ МГц} + 0,5(2 \cdot 2 - 1) \cdot 2 = 433 \text{ МГц};$$

$$f_3 = 430 \text{ МГц} + 0,5(2 \cdot 3 - 1) \cdot 2 = 435 \text{ МГц};$$

$$f_4 = 430 \text{ МГц} + 0,5(2 \cdot 4 - 1) \cdot 2 = 437 \text{ МГц};$$

$$f_5 = 430 \text{ МГц} + 0,5(2 \cdot 5 - 1) \cdot 2 = 439 \text{ МГц}.$$

Вибираємо ширину смуги пропускання секції електродів як половину ширини смуги пропускання частоти кодування

$$\Delta f_{\text{секц.}} = 0,5 \Delta f_k = 0,5 \cdot 2 \text{ МГц} = 1 \text{ МГц}.$$

Відносна смуга пропускання секції електродів $\Delta f_{\text{секц.}} \approx 0,5\%$.

Кількість електродів в кожній секції

$$N = 2f_k / \Delta f_{\text{секц.}}$$

$$N_1 = 2f_1 / \Delta f_{\text{секц.}} = 431;$$

$$N_2 = 2f_2 / \Delta f_{\text{секц.}} = 433;$$

$$N_3 = 2f_3 / \Delta f_{\text{секц.}} = 435;$$

$$N_4 = 2f_4 / \Delta f_{\text{секц.}} = 437;$$

$$N_5 = 2f_5 / \Delta f_{\text{секц.}} = 439.$$

Кількість електродів може бути зменшена за рахунок використання аподизації електродів.

Півперіод електродів визначається за формулою

$$d_k = V / 2f_k :$$

$$d_1 = 3488 \text{ м / с} / 2 \cdot 431 \text{ МГц} = 4,046 \text{ мкм};$$

$$d_2 = 3488 \text{ м / с} / 2 \cdot 433 \text{ МГц} = 4,028 \text{ мкм};$$

$$d_3 = 3488 \text{ м / с} / 2 \cdot 435 \text{ МГц} = 4,009 \text{ мкм};$$

$$d_4 = 3488 \text{ м / с} / 2 \cdot 437 \text{ МГц} = 3,991 \text{ мкм};$$

$$d_5 = 3488 \text{ м / с} / 2 \cdot 439 \text{ МГц} = 3,973 \text{ мкм}.$$

Тривалість стиснутої ПАХ на виході вхідного перетворювача ПАХ

$$t_{\text{ст}} = 2 / \Delta f = 2 / 10 \text{ МГц} = 0,2 \text{ мкс}.$$

Коефіцієнт стиснення

$$m = \Delta f \tau_{\text{ОЧК}} = 10.$$

Смуга пропускання кожної групи електродів вихідного масиву

$$\Delta f_{\text{ФКМ}} = 1 / t_{\text{ст}} = 1 / 0,2 \text{ мкс} = 5 \text{ МГц}.$$

Центральна частота високочастотної несучої вихідного сигналу

$$f_{0\Phi KM} = f_H + \Delta f / 2 = 430 \text{ МГц} + 10 \text{ МГц} / 2 = 435 \text{ МГц}.$$

Кількість електродів в кожній групі вихідного масиву

$$N_{\Phi KM} = 2f_{0\Phi KM} / \Delta f_{\Phi KM} = 2 \cdot 435 \text{ МГц} / 5 \text{ МГц} = 174.$$

Тоді, загальна кількість електродів вихідного масиву становить:
 $N = n \cdot N_{\Phi KM} = 5 \cdot 174 = 870$, де n - кількість розрядів у вихідній послідовності (для представленої радіомітки $n = 5$).

Довжина ПАХ на частоті високочастотної несучої вихідного сигналу

$$\lambda = V / f_H = 8 \text{ мкм}.$$

Довжина вихідного масиву електродів

$$L_{\Phi KM} = n \cdot N \cdot \lambda / 2 = 3,5 \text{ мм}.$$

Тривалість вихідної послідовності (сигналу радіовідгуку)

$$\tau_{\Phi KM} = L / V = 1012 \text{ нс}.$$

Відношення сигнал/шум на вході радіомітки на ПАХ зі стисненням сигналу в порівнянні з радіоміткою без стиснення визначається співвідношенням:

$$Q_{OЧК} / Q_0 \approx T \Delta f,$$

де $Q_{OЧК}$, Q_0 - відношення сигнал/шум для системи зі стисненням сигналу та без стиснення, відповідно; T - тривалість вхідного сигналу.

Для радіомітки із заданими конструктивними параметрами:
 $Q_{OЧК} / Q_0 \approx 1 \text{ мкс} \cdot 10 \text{ МГц} = 10$. Таким чином, стиснення вхідного сигналу забезпечує відношення сигнал/шум, що відповідає підвищенню пікової потужності передавача в 10 разів.

Порядок чергування електродів та кількість розрядів у вихідному масиві можуть змінюватися для реалізації довільної кодової послідовності. Так, для представленої радіомітки з 5 розрядами (5 секцій електродів) можливо реалізувати $2^5 = 32$ різноманітні коди. В разі використання 10 розрядів – 1024 коди, а для 32 бітної радіомітки кількість можливих кодів

перевищує 4 млрд. Це дозволяє використовувати запропоновані пасивні радіомітки на ПАХ для ідентифікації великої кількості об'єктів.

Висновки

1. Проведено розрахунки основних елементів моделі радіомітки для інформаційно – вимірювальних систем з безпроводними пасивними сенсорами на ПАХ. Особливістю її є те, що вона містить вхідний/вихідний зустрічно-штировий перетворювач, що забезпечує стиснення вхідного сигналу радіозапиту та дозволяє забезпечувати режим множинного доступу на основі ортогонального частотного кодування.

2. Відповідно до розрахунків можна спостерігати що кожна секція електродів має велику кількість штирів, звідси випливає, що мітка матиме відносно великий розмір. Але за рахунок використання аподизації електродів кількість електродів може бути зменшена.

3. Для представленої радіомітки з 5 розрядами (5 секцій електродів) можливо реалізувати різноманітні коди. В разі використання 10 розрядів – 1024 коди, а для 32 бітної радіомітки кількість можливих кодів перевищує 4 млрд. Це дозволяє використовувати запропоновані пасивні радіомітки на ПАХ для ідентифікації великої кількості об'єктів. Тому в залежності від необхідної кількості кодів ми можемо збільшувати або зменшувати кількість секцій вхідних електродів для того, щоб збільшити, чи зменшити кількість міток з різними кодами.

4. ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПРИБРОЇВ НА ПАХ

Технологічний процес виготовлення пристроїв на ПАХ можна представити у вигляді трьох етапів: виготовлення підкладки з п'єзоелектрика, формування електродних структур на її поверхні, складання та дослідження параметрів пристрою [1, 2, 5, 23, 24]. Виготовлення підкладки включає наступні основні операції: орієнтація кристала, різання, шліфування, полірування і відмивання. Для формування електродних структур виконуються операції відмивання, нанесення тонкої плівки металу і фотолітографії. Складання включає нанесення акустичного поглинача, приклею пластини до корпусу, монтаж електричних виводів і герметизацію. Усі приведені вище технологічні операції виготовлення пристроїв на ПАХ використовуються в технології виготовлення інтегральних мікросхем. Однак, застосування п'єзоелектричних монокристалів, а також специфіка пристроїв на ПАХ поставили ряд вимог до відомих технологічних процесів. Так, пристрої на ПАХ вимагають більш точної орієнтації підкладки, високої здатності, при виготовленні елементів на великих площах. Для найбільш освоєного діапазону частот від 10 до 400 МГц ширина електродів коливається від 1,5 до 50 мкм для одиночних штирів, і від 1 до 25 мкм для розщеплених, а загальна кількість їх змінюється від 10...100 до 400...600. При цьому довжина штиря повинна бути не менш $(40...200) \lambda$, тобто відношення довжини до ширини може наближатися до 200. Цей факт викликає значні складності в технології виготовлення ПАХ-структур, тому що при великій довжині і малій ширині штирів збільшується імовірність розривів і відходу лінійних розмірів від заданих на кожному етапі літографічного процесу. Разом з тим існують значні спрощення в технології виготовлення деяких різновидностей акустoeлектронних виробів у порівнянні з технологією виготовлення інтегральних схем, наприклад, топологія пристроїв на ПАХ одношарова і тому виключаються складні процеси сполучення шарів, відсутні процеси дифузії і т.д.

4.1. Виготовлення звукопроводу

Для пристроїв на ПАХ застосовуються п'єзоелектричні підкладки у формі паралелепіпеда. Основним параметром ЛЗ на ПАХ є швидкість розповсюдження хвилі, вона залежить у першу чергу від характеристик матеріалу звукопроводу п'єзоелектрика, у якому відбувається збудження, поширення і детектування ПАХ. Тому особливе місце у виготовленні ЛЗ займає виготовлення й обробка підкладки.

П'єзоелектричні монокристали [1] вирощують методом Чохральського у вигляді циліндричних буль, діаметр яких може досягати 50...70 мм, а довжина 100...200 мм. П'єзоелектричний монокристал ніобату літію вирощують в автоклавах високого тиску гідротермальним способом. Кристалографічні напрямки в булях визначаються орієнтацією затравок, з яких вирощують кристал. Першою стадією виготовлення підкладки є орієнтація булів рентгенівськими методами і розпиляння на заготовки на верстатах з алмазними дисками. Після розпиляння пластин над ними проводять перше шліфування для створення базової поверхні необхідної орієнтації з точністю $\pm 10'$, що прийнятно для більшості пристроїв на ПАХ, потім обробляється контур і зворотна сторона підкладки.

Зустрічно-штирвові перетворювачі (ЗШП), крім ПАХ, збуджують й об'ємні акустичні хвилі, які відбиваючись від нижньої і верхньої поверхні підкладки досягають вихідного ЗШП, вносячи при цьому спотворення. Для придушення цих хвиль зворотну сторону підкладки необхідно обробити так, щоб об'ємні хвилі не відбивалися, а розсіювалися в ній. Для цього на неї наносяться алмазним диском насічки під кутом до напрямку поширення ПАХ. Крок приблизно складає 5...15 довжин хвиль ПАХ, глибина дорівнює половині кроку. На високих частотах (понад 100 МГц) для ефективного розсіювання об'ємних хвиль досить прошліфувати зворотню сторону підкладки грубим шліфувальним порошком.

Перед поліруванням пластини піддають шліфуванню порошком М-20, при цьому знімається шар 0,25 мм, порошком М-10 - знімається шар 0,15 мм,

і ще раз порошком М-10 - знімається шар 0,1 мм. Полірування пластин здійснюється на плоско-шліфувальних верстатах. Для полірування ніобату літію використовується суспензія на основі синтетичних алмазних порошоків АСМ 3/2 і АСМ 1/0, якою знімається шар товщиною 5...10 мкм. Швидкість обертання шліфувальника і тиск на пластини підбирають експериментальним шляхом і звичайно вони складають відповідно 50...200об/ хв, 0,5...2,0 Н/см². Процес полірування пластин необхідно проводити в окремих технологічних приміщеннях, що мають низьку запиленість. Полірувальні суспензії повинні бути ретельно приготовлені і не містити часток, розмір яких перевищує розмір часток поліруючої речовини. Після полірування пластини не повинні мати подряпин і поверхня повинна відповідати вимогам ДСН 11141- 76, класу чистоти - Р1.

Описаний метод виготовлення підкладки дозволяє виготовляти пристрої на ПАХ на частотах аж до 400...500 МГц. Для більш високих частот необхідно додатково обробляти поверхню хіміко-механічними методами полірування.

Зустрічно-штирвові структури ЛЗ на ПАВ виготовляються з тонкої плівки алюмінію, нанесеної на поверхню підкладки методом термовакуумного напилювання. Вибір алюмінію як матеріалу електродів обумовлений наступним:

- низьким питомим опором;
- невеликою питомою масою в порівнянні з іншими металами;
- освоєною технологією нанесення плівки;
- малою вартістю алюмінію і технологічністю процесу його нанесення;
- стійкістю алюмінію до впливу навколишнього середовища;

Тому що алюміній є відносно легкоплавким металом, то для напилювання плівки використовують метод термічного випару у вакуумі. Найпростіше це здійснюється з використанням прямоканальних резистивних випарників, виконаних з тугоплавких металів (вольфрам).

При термічному випарі адгезія плівки алюмінію до поверхні підкладки низька. Тому в якості адгезійного підшару використовується ванадій. Вибір ванадію обумовлений задовільними адгезійними властивостями, відносною легкістю випару і можливістю одночасного чи роздільного травлення з алюмінієм. При напилюванні ванадію потрібен високий вакуум і відносно велика швидкість напилювання, тому що завдяки хімічній активності при підвищених парціальних тисках кисню й азоту відбувається інтенсивне утворення окислів і нітридів. Оптимальні результати досягаються при швидкості напилювання не меншій 3 мм/с і робочому вакуумі не гірше $1 \cdot 10^{-3}$ тор з обов'язковим застосуванням пасток, охолоджуваних рідким азотом, і натіканням повітря в систему не більш $3 \cdot 10^{-3}$ п. тор/с. Зниження швидкості напилювання, збільшення тиску і швидкості натікання повітря різко позначається на фізичних і хімічних властивостях плівок ванадію: підвищення питомого опору, погіршення відтворюваності, утрудненні травлення і т.д. Для забезпечення задовільної адгезії плівки алюмінію товщина підшару ванадію повинна бути 5...50 нм. Оптимальна температура підкладки при напилюванні алюмінію складає 120 ± 10 °С, швидкість осадження 10 нм/с. Товщина плівки Al коливається в межах 0,08...0,5 мкм, у залежності від робочої частоти пристрою на ПАХ.

Для одержання гарної адгезії і відтворюваності електрофізичних властивостей нанесених металевих плівок поверхня звуководу повинна бути добре очищена. Процедуру очищення можна розділити на етапи попереднього й остаточного очищення. Процес очищення ніобату літію можна проводити за наступною схемою :

- знежирення в трихлоретилені (C_2HCl_3), швидкість знежирення збільшується при температурі кипіння (10 хв);
- промивання в ацетоні або в етиловому спирті (10 хв);
- відмивання в кислотному або в лужному розчині (можна використовувати розчин двохромовоокислого калію, чи перекису

водню з додаванням лугу), підкладки варто витримувати в киплячому розчині 15 хв;

- відмивання в проточній деіонізованій воді з механічною обробкою обертовими кистями 30... 40 хв (питомий опір води 10...18 МОм);
- сушіння пластин у центрифугах, що знаходяться в обеспиленних скафандрах.

Хімічне остаточне ультразвукове очищення проводиться в гарячій воді з розчиненим в ній миючим засобом, а потім тривале відмивання в гарячій воді. Після цього підкладки кип'ятять в ацетоні протягом 5 хв. Сушіння відбувається в парах ацетону на відстані 1,5...2 см над його поверхнею протягом 45 ± 15 с [2].

Недостатньо якісне очищення підкладок звичайно призводить до поганої адгезії металевої плівки, а механічні забруднення - до проколів у плівці, що ведуть до обривів електродів ЗШП.

4.2. Формування електродних структур.

Основною найскладнішою операцією при виготовленні пристроїв на ПАХ є формування електродних структур [1, 2, 23]. Робочі параметри виготовлених пристроїв обмежуються такими характеристиками літографічного процесу як роздільна здатність, точність, щільність дефектів та ін. До відомих методів літографії відносяться контактна, проекційна фотолітографія, електронно-променева і рентгенографія, лазерографія і голографія.

Порівняння показують, що голографія, електроннографія і рентгенографія хоча і забезпечують необхідну для більшості пристроїв на ПАХ роздільну здатність, але мають малі робочі поля, а також складніше і дорожче обладнання. Для масового виробництва технічно й економічно вигідне застосування контактної фотолітографії. Основні етапи процесу формування топології на підкладці методом контактної фотолітографії показані на рис.4.1.

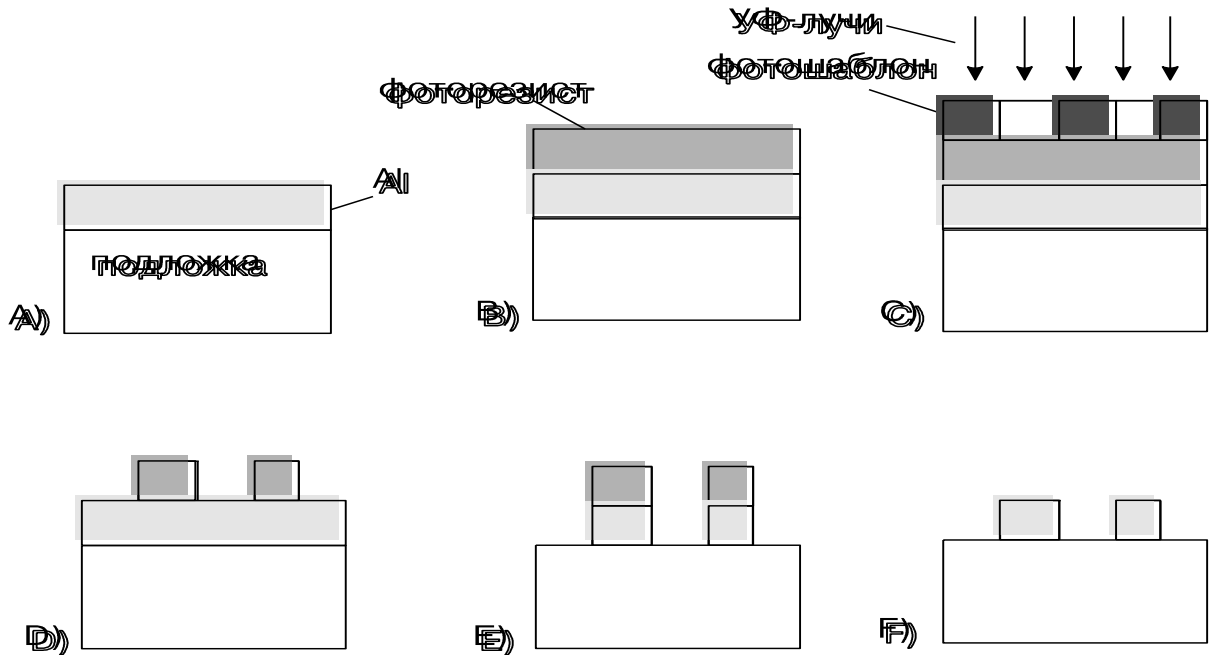


Рис. 4.1. Основні етапи фотолітографії:

- A. Підкладка з напиляною металевою плівкою;
- B. Нанесення фоторезисту;
- C. Експонування через фотошаблон;
- D. Прояв фоторезисту;
- E. Травлення металевої плівки;
- F. Зняття фоторезисту.

В основу процесу фотолітографії покладена здатність деяких високомолекулярних з'єднань (фоторезистів) змінювати свої властивості під дією світла. У залежності від механізму фотохімічних процесів, що протікають під дією випромінювання, розрізняють позитивні і негативні фоторезисти.

У позитивних фоторезистах під дією світла відбувається руйнування міжмолекулярних зв'язків і опромінені ділянки стають розчинними в лужних розчинах. Негативні фоторезисти полімеризуються під дією світла і не розчиняються в проявнику. Негативні фоторезисти мають меншу роздільну здатність через велику довжину молекул і не забезпечують необхідної якості фотолітографії. На рис.4.1 зображено приклад експонування через фотошаблон позитивного фоторезисту. Експонування виробляється через

щільно притиснутий до поверхні пластини фотошаблон (контактна фотолітографія). Метод простий і зручний, дозволяє автоматизувати процес фотолітографії, здійснювати групову обробку пластин на всіх стадіях виготовлення структур на ПАХ.

Теоретична межа роздільної здатності контактної фотолітографії дорівнює довжині хвилі активного випромінювання. При використанні стандартних джерел УФ-випромінювання роздільна здатність складає приблизно 0,4 мкм. Головним фактором, що обмежує роздільну здатність є дифракція світла на елементах топології. Виникнення дифракційних ефектів зв'язано з наявністю зазору між фотошаблоном і пластиною. Навіть в умовах твердого притиску шаблону до пластини контактуючі поверхні не прилягають одна до одної по всій площині через шорховатості як фотошаблону так і пластини. Крім того, кожна часточка, що потрапила на контактуючі поверхні приводить до утворення зазору [23, 24].

Контактна фотолітографія може забезпечити і більш вузькі лінії, шириною порядку 1 мкм, але для цього необхідно усунути дифракційні ефекти (ліквідуючи зазор), застосовуючи фотошаблони і підкладки, неплоскостність яких значно менше оптичної довжини хвилі, наносячи рівномірні плівки фоторезисту, усунувши пил і мікронерівності, а також підібравши оптимальні технологічні режими нанесення, експонування, проявлення, травлення і т.д., особливо при великих робочих полях.

Одним з показників, що характеризує якість розробки технологічних процесів, є величина розкиду параметрів готової продукції. Вона залежить від ступеню нестабільності процесу виробництва і від чутливості електричних параметрів виробів до нестабільності виробництва.

Проблема реалізації характеристик пристроїв на ПАХ пов'язане з надійністю фотолітографічних методів, що забезпечують високу роздільну здатність, мінімальний відхід і розкид параметрів, точність сполучення, відтворюваність структур. Одна з основних проблем технології літографічного процесу - дотримання жорстких допусків на розміри

елементів зображення, що звичайно не перевищують 5 % номінального значення ширини лінії. Для більшості пристроїв практично не допускаються (1%) обриви електродів, найбільш небезпечні в області центрального пелюстка зустрічно-штирьової структури. Не допускаються замикання електродів у зоні їхнього взаємного перекриття, поза зоною можлива наявність не більш 3-5 дефектів типу “острівець”. Не допускаються наскрізні подряпини чи пори на електродах контактних площадках, що оголюють підкладку в будь-якій точці, а також наскрізні подряпини чи пори, що зменшують перетин електродів контактних площадок більш ніж на 40 %. Не допускається наявність сторонніх часток, що з'єднують будь-які два плівкових елементи структури і, що не видаляються за допомогою очищення газом, а також наявність між електродами металевих ділянок, що мають діаметр більш 50 % зазору між електродами.

Оптимізація технологічного процесу фотолітографії спрямована на підвищення якості проведення операцій і забезпечення надійності за допомогою підвищення вимог при контролі. З метою оптимізації процесу фотолітографії були відпрацьовані режими і маршрути операцій : нанесення фоторезисту, сполучення й експонування, проявлення, травлення. Метою даної роботи було з'ясування дії різних факторів, що впливають на протікання цих операцій, визначення найбільш істотних з них, вибір умов, при яких якість обробки відповідає пред'явленим вимогам. Відпрацьовування режимів технологічного процесу виготовлення ЛЗ можуть вироблятися на установках, що входять в автоматизований комплекс “Лада-125”: автомат нанесення фоторезисту 08ФН- 125/200-004, установка ІК-конвеєрної термообробки 02СТ-170-005, автомат проявлення фоторезисту 08ФН-125/200-003. Операції травлення і зняття фоторезисту виконуються на устаткуванні, що входить у напівавтоматичну лінію “Лада-1” : установка обробки в органічних розчинниках 084ХО-100-003, установка відмивання і сушіння 0848ЛС-0/1500-004 . Для міжопераційного контролю використовується мікроскоп МССО ТУ 3-3587.78, а для більш точного

контролю відтворюваності розмірів - мікроскоп МЕТАМ ДСТ 15150-69, який дає максимальне збільшення в 300 разів [1].

Технологічний процес фотолітографії проводиться в приміщенні, що відповідає вимогам електронно-вакуумної гігієни ОТТ 4ГО.091 319-81, третьому класу по чистоті, другому класу по вологості і температурі.

Нанесення фоторезисту є одною з основних і найбільш відповідальних операцій фотолітографічного процесу, тому що від якості плівки фоторезисту в основному залежить якість зображення структури (чіткість краю, відсутність невитравлених ділянок, щільність проколів), недотримання оптимального режиму може привести до неточної передачі розмірів. Фоторезисти повинні забезпечувати одержання тонких (0,2÷3 мкм) і суцільних плівок з якісною адгезією до підкладки, високою рівномірністю по товщині (1÷5 %), відсутністю механічних і інших забруднень.

З метою зниження дефектності плівки фоторезист перед нанесенням доцільно піддати центрофугування протягом однієї години з частотою обертання 6000...7000 об/хв. Після цього проводиться ретельна фільтрація під тиском через фільтри тонкого очищення з розміром пір 0,25 мкм (Millipor) . Фільтри встановлюються безпосередньо в установку нанесення фоторезисту.

Фоторезист наносять методом центрофугування на установці 08ФН-125/200-004. Підкладка закріплюється на металевому столику за допомогою вакууму. При включенні центрифуги з дозатора на центр пластини подається кілька капель фоторезисту. Під дією центробіжної сили фоторезист розтікається по поверхні пластини, а надлишки скидаються в збірник. З моменту попадання фоторезисту на пластину починається інтенсивний випар розчинника, у результаті чого в'язкість фоторезисту швидко зростає. У визначений момент часу внутрішні сили зчеплення молекул фоторезисту врівноважують відцентрові сили, розтікання фоторезисту припиняється і формування шару закінчується.

Товщина шару визначається швидкістю обертання центрифуги, часом центрування і в'язкістю фоторезисту. Фактори, що спотворюють малюнок, сильніше виявляються в товстому фотошарі, тому зі збільшенням товщини

роздільна здатність падає. З іншого боку, товщина шару повинна бути достатньою, щоб протистояти дії травників і перекривати неминучі локальні дефекти в структурі плівки. Таким чином, вибір товщини фотошару обумовлений компромісом між вимогою достатньої роздільної здатності і адгезії, та з іншого боку захисними властивостями фотомаски. При цьому можна виходити з того, що мінімальний розмір елемента a_{min} і товщина шару фоторезисту h у визначеному наближенні зв'язані співвідношенням $h \leq 0.3 \cdot a_{min}$. Це співвідношення накладає обмеження на максимально припустиму товщину фотошару. Максимально припустима величина визначається припустимою щільністю проколів, оскільки зі зменшенням h щільність проколів зростає.

Для одержання мінімального розміру елемента $a_{min} = 1,7$ мкм товщина шару $h \leq 0,3 \cdot 1,7 \approx 0,5$ мкм. Основні характеристики фоторезистів ФП-383 і ФП-051МК приведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1

Основні характеристики фоторезистів ФП-383 і ФП-051 МК

Фоторезист	В'язкість, мм ² /с	Щільність, ρ г/см ⁻³	Мінімально відтворений розмір, мкм	Товщина плівки, мкм
ФП - 383	6...6,5	0,923	2,4	1,6±0,2
ФП- 051МК	40±5	1,057	2,0	1,0±0,2

Експериментально перевірялися залежності товщини шару фоторезисту від в'язкості і числа обертів центрифуги. Режими нанесення змінюються в наступних межах: доза 0,5...12, розтікання $\tau=1...10$ с ($v_1=600...1500$ об/хв), формування $\tau=20...40$ с ($v_2=3000...6000$ об/хв), тиск у бачку з фоторезистом $P=0,6...0,7$ кг·с/см².

При роботі з ФП-383 спостерігалася поява при центрифугуванні нерівномірностей, що мають вид променів, що радіально розходяться від центру пластини. Поява променів призводить до локальної зміни розмірів (нерівність краю), тому що умови експонування променів на виступі і

впадині різні. Крім того по краю підкладки виникає стовщення, ширина і висота якого залежить від в'язкості фоторезисту, швидкості і часу обертання центрифуги.

Дослідження показали, що зі збільшенням частоти обертання центрифуги покриття виходять більш тонкими, і що більш важливо, рівномірними. Час прискорення також є важливим чинником. Мінімальний розмір стовщення був отриманий при мінімальному часі прискорення (1с). Час центрифугування мало впливає на параметри шару, для формування досить 20...30 сек. При центрифугуванні зі швидкістю вище 6000 об/хв зростає щільність проколів в плівці фоторезисту [1].

Для ФП-383 експериментальним шляхом були отримані наступні оптимальні режими нанесення: доза 0,5...0,7, розтікання $\tau=1\text{с}$ ($v_1=1500$ об/хв), формування $\tau=20\text{...}30\text{с}$ ($v_2=5000$ об/хв). Товщина отриманого шару вимірюється з використанням мікроскопу МІІ-4.

Кращі результати були отримані при роботі з фоторезистом ФП-051МК. Він характеризується більшою роздільною здатністю, більшою стійкістю до хімічних впливів, кращою адгезією до плівки алюмінію. Для досягнення товщини $h=0,5\text{мкм}$ збільшення швидкості обертання центрифуги виявилось недостатнім. Тому був створений розчинник (диоксан) для розведення фоторезисту у визначеному, емпірично підбраному співвідношенні (1:2). У такий спосіб виявлено, що найбільш висока якість фотошару по товщині і рівномірності забезпечує фоторезист ФП-051МК розведений диоксаном у співвідношенні 1:2. Для одержання заданої (номінальної) товщини шару доцільно частоту обертання установлювати вище критичної (5000 об/хв), тобто в області, де вона практично не впливає на товщину для задовільної відтворюваності результатів.

Наступною операцією при нанесенні фоторезисту є сушіння, ціль якої полягає у видаленні залишків розчинника, що може послабити адгезію фоторезисту до металевої плівки. Щоб уникнути зниження світлочутливості, розтріскування плівки фоторезисту і збереження її еластичності сушіння

доцільно проводити в два етапи: попереднє витримання при кімнатній температурі протягом 10-15 хв, і остаточне сушіння при температурі 90-100 °С. Операція проводиться на установці ІЧ-конвеєрної термообробки, температура в якій підтримується за законами відповідно 95-100-95 °С протягом 6-8 хв. При ІЧ- сушінню джерелом теплоти є підкладка, що поглинає ІЧ - випромінювання, тоді як навколишнє середовище (повітря) зберігає приблизно кімнатну температуру завдяки безупинному продуванню. При цьому в плівці фоторезисту відбуваються складні релаксаційні процеси, що ущільнюють структуру шару, що зменшують внутрішні напруження і підвищують адгезію шару до підкладки. Особливо небезпечним є перепади температури вздовж заготовки.

При недостатньому сушінні можуть змінюватися вимоги до експонування, тому що розчинник перешкоджає утворенню поперечних зв'язків і перетворенню функціональних груп, в результаті чого буде спостерігатися розмивання структури. Відхилення температури сушіння від оптимального значення на кілька градусів призводить до відхилення розмірів елементів (спостерігається недопроявлення малюнка при пересушуванні або перепроявлення і відхід розмірів при недостатній температурі сушіння фоторезисту). Час експонування недосушеного фоторезисту збільшується внаслідок того, що при засвічуванні молекули розчинника, що залишився, екранують шар, який лежить нижче, і після прояву залишаються дефекти у виді нерозчинених областей [24].

Підкладки з нанесеним фоторезистом експонують на установках сполучення й експонування ЕМ-576А (довжина хвилі випромінювання ртутної лампи $\lambda=350\text{...}450$ нм), ЕМ 5006 А ($\lambda=350\text{...}450$ нм). Установки містять пристрій сполучення, за допомогою якого здійснюється взаємна орієнтація підкладки і фотошаблону, і забезпечується щільний контакт між ними (вакуумний притиск). Щораз перед початком роботи варто перевіряти освітленість $L=40$ тис. лк.

Технологічні режими експонування вибираються у відповідності з властивостями використовуваного фоторезисту. При виборі оптимального часу експонування варто враховувати взаємозв'язок його з часом прояву. З метою зменшення спотворень через дифракцію і відбивання, які ведуть до розширення експонованих ділянок, у результаті чого після прояву спостерігається відхід від розмірів, варто зменшувати час експонування [1].

З іншої сторони недостатньо експонований малюнок цілком залишається під “вуаллю” нерозчинного полімеру.

Як проявник добре зарекомендував себе 0,5% розчин лугу КОН при $T=22^\circ$, рН розчину $=12,84\pm 0,01$.

Основними параметрами оцінки якості прояву є точність передачі (відношення розмірів зображення на фоторезисті до розмірів на фотошаблоні) і відтворюваність. Дослідження показали, що фоторезист ФП-383 відрізняється нестабільністю при одержанні мікронних штрихів порядку 3 мкм і менше, але дає задовільні результати при виготовленні структур з мінімальними розмірами більше 10 мкм. При цьому оптимальний час експонування на установці ЕМ-756А $t_3=6\dots 8$ сек, при цьому час прояву $t_{пр}=15\dots 20$ сек.

Для одержання елементів з розмірами порядку 1,7...3 мкм доцільно використовувати фоторезист ФП-051МК, тому що в нього краща адгезія до підкладки і він більш стійкий до впливу проявника. Необхідна якість малюнка виходить шляхом зменшення часу експонування при збільшенні часу прояву. При цьому оптимальні режими експонування на установці ЕМ-5006А $t_3=2\dots 3$ сек, $t_{пр}=40\dots 60$ сек.

Після прояву варто провести контроль якості отриманого зображення.

Можливі наступні види дефектів на виявленому малюнку в шарі фоторезисту й основні причини їхнього виникнення:

- неповний прояв: перевищення t сушіння фоторезисту; недостатній час експонування; величина рН проявника менша встановленої; товщина фоторезисту більше заданої; малий час прояву;

- нерівність краю малюнка: брудний фотошаблон; наявність зазору між пластиною і фотошаблоном у момент експонування; недостатня обробка фото шару;
- збільшені розміри ділянок, вільних від фоторезисту: збільшений час експонування; наявність зазору між пластиною і фотошаблоном у момент експонування; перевищення pH розчину для прояву; перевищення температури проявника;
- наявність механічних ушкоджень проявленої плівки фоторезисту: часточки фоторезисту, що прилипли до шаблону при повторному експонуванні без промивання фотошаблону; сполучення при нульовому контакті; неакуратність роботи оператора;
- локальні проколи і включення в шарі: не якісний фотошаблон; неякісна фільтрація фоторезисту; пилинки між фотошаблоном і пластиною; повітряні міхури, що утворюються при зануренні пластини в розчин проявника;
- у процесі прояву вилучений весь фоторезист: перевищення часу меж операційного збереження пластин; незадовільна якість металевої плівки; низька температура чи недостатній час термообробки фоторезисту; перевищення часу витримки в проявнику; перевищення величини pH і t розчину для прояву;
- нечітке зображення або нерівномірний відхід розмірів по робочому полю: поганий контакт фотошаблону з підкладкою; неплосинність пластини або фотошаблону вище норми.

Аналіз причин виникнення дефектів показує тісний взаємозв'язок і вплив кожної попередньої операції на наступну, у результаті чого причиною прояву браку при формуванні малюнка у виявленому шарі фоторезисту може виявитися відхилення від оптимальних режимів кожної з попередніх операцій [23, 24].

Наступна термообробка виявленого рельєфу проводиться з метою підвищення адгезії і хімічної стабільності фоторезистивного покриття. Від

температури і характеру підвищення її під час сушіння залежить точність передачі розмірів зображень. Різке нагрівання викликає оплавлення країв, тому для точної передачі малих розмірів застосовується плавне підвищення температури. Недосушіння резисту призводить до швидкого підтравлювання, навіть при низьких температурах травлення. Збільшення температури може привести до глибокої полімеризації фоторезисту, після якої навіть при тривалому впливі органічних розчинників не вдається видалити залишки фоторезисту. Оптимальні режими сушіння на установці конвеєрної термообробки 6...8 хв при $T=120-125-120$ °C відповідно для трьох зон.

Травлення є завершальною стадією технологічного процесу формування електродних структур і впливає на вихідні параметри виробів. До процесу травлення висувають наступні вимоги: мінімальні спотворення геометричних розмірів структур; повне видалення матеріалу на ділянках, не захищених фоторезистом; висока селективність травника; можливість керування процесом.

Якість травника багато в чому визначається якістю фоторезистивної маски, її адгезією до підкладки, мікроструктурою і рівномірністю по товщині. Травники повинні бути хімічно пасивними стосовно матеріалу фотомаски. Повинні допускати можливість підбору оптимальної для даних умов швидкості травлення, що забезпечує з однієї сторони мінімальну щільність дефектів отриманого малюнка, а з іншої - можливість точного контролю часу травлення. Для травлення плівок алюмінію широко використовується травник наступного складу: кислота ортофосфорна 76 мл, кислота оцтова 15 мл, кислота азотна 5 мл, вода 5 мл.

Оптимальним режимом процесу травлення є: температура травника $T=45$ °C, час травлення - 60 сек. При зміні температури травника більше, ніж на 5°С змінюється час травлення, а занадто повільне чи швидке травлення призводить до збільшення величини підтравлювання.

Особливістю даного травника є те, що в процесі травлення утворюються пухирці водню, що тяжко видаляються унаслідок великої

в'язкості травника (ортофосфорної кислоти). Видаляти їх необхідно для того, щоб не залишалися непротравлені ділянки (характерні великі плями алюмінію), що призводять до закорочування електродів. Тому для досягнення кращих результатів травлення ефективно використовується травник наступного складу: окис хрому - 60 г, фтористий алюміній - 10 г, вода - 1 л. Перевагою його є відсутність недотравлених ділянок, кімнатна температура травлення при тому ж часі травлення, одержання більш чіткого краю малюнка. Для одержання мінімального підтравлювання, що більше позначається на елементах з розмірами менше 3 мкм, застосовується періодичне видалення продуктів реакції швидким промиванням струменем води. Для підбурення підшару ванадію використовується 30% розчин перекису водню, $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t=4-7$ сек.

Найпростішою й остаточною операцією процесу фотолітографії є видалення фоторезисту. За умови дотримання оптимальних режимів технологічного процесу видалення фоторезисту легко здійснити в холодній суміші диметилформіду і моноетиноламіну (1:1).

У такий спосіб для одержання високої точності передачі, відтворюваності і якості електродних структур необхідне дотримання оптимальних режимів всіх операцій. Крім того для одержання високої якості малюнка необхідне використання фоторезисту ФП-051МК. ФП-383 дає гарну відтворюваність результатів при виготовленні структур з розмірами елементів порядку 10 мкм і більше.

4.3. Конструктивні особливості пристроїв на ПАХ

Для захисту від зовнішніх впливів акустoeлектронні модулі на ПАХ розміщуються в корпусах [1], до яких пред'являються наступні вимоги:

- корпус повинен бути виготовлений металів з високою електропровідністю (мідь, латунь, алюміній) для електромагнітної розв'язки між входом і виходом пристрою;

- виводи повинні бути високочастотними і герметичними, повинні бути розташовані поблизу контактних площадок пристрою на ПАХ;
- корпус повинен забезпечити герметичність- усередині корпусу створюється вакуум або запускається інертний газ.

Операції складання пристроїв на ПАХ проводяться за наступною схемою: приклейка підкладки в корпус; розварювання золотим дротом електричних виводів і заземлень; зміцнення лаком чи струмопровідним клеєм золотих виводів на контактних площадках; герметизація корпусу; перевірка герметичності гелієвим пристроєм для пошуку витікання через штенгель; відкачка і наповнення інертним газом; герметизація штенгелю.

Приклеювання пластини повинно забезпечити механічну міцність при вібрації та ударах. Шар клею повинен бути досить еластичним, щоб при температурних розширеннях корпусів не розривалася пластина. Клей не повинен виділяти газоподібні речовини, взаємодіючи з підкладкою і металевою плівкою ЗШП на її поверхні. Найбільш придатним є кремнійорганічний компаунд КЛТ-30 [23].

Приєднуються провідники до контактних площадок мікрозварюванням. Труднощі створення подібного роду зварених з'єднань полягають у наступному:

- мала товщина металевих плівок, нанесених на тендітні підкладки;
- велика різниця в товщинах елементів, що з'єднуються, (золоті провідники діаметром 40 мкм і плівки товщиною 0,2...0,5 мкм);
- велике розходження у фізичних властивостях матеріалів, що зварюються.

Основними причинами виходу з ладу в процесі експлуатації пристроїв на ПАХ є:

- руйнування п'єзоелектричної підкладки;

- порушення цілісності елементів кріплення (найчастіше зварених з'єднань) чи виникнення в них залишкових деформацій;
- виникнення механічних ушкоджень і структурних змін у поверхневому шарі звукопровода.

Висновки

1. Технологічний процес виготовлення пристроїв на ПАХ можна представити у вигляді трьох етапів: виготовлення підкладки з п'єзоелектрика, формування електродних структур на її поверхні, складання та дослідження параметрів пристрою.

2. Для пристроїв на ПАХ застосовуються п'єзоелектричні підкладки у формі паралелепіпеда. Основним параметром ЛЗ на ПАХ є швидкість розповсюдження хвилі, вона залежить у першу чергу від характеристик матеріалу звукопроводу п'єзоелектрика, у якому відбувається збудження, поширення і детектування ПАХ.

3. Основною найскладнішою операцією при виготовленні пристроїв на ПАХ є формування електродних структур. Робочі параметри виготовлених пристроїв обмежуються такими характеристиками літографічного процесу як роздільна здатність, точність, щільність дефектів та ін. До відомих методів літографії відносяться контактна, проєкційна фотолітографія, електроннопроменева і рентгенографія, лазерографія і голографія.

4. Для захисту від зовнішніх впливів акустoeлектронні модулі на ПАХ розміщуються в корпусах, до яких пред'являються наступні вимоги:

- корпус повинен бути виготовлений металів з високою електропровідністю (мідь, латунь, алюміній) для електромагнітної розв'язки між входом і виходом пристрою;
- виводи повинні бути високочастотними і герметичними, повинні бути розташовані поблизу контактних площадок пристрою на ПАХ;
- корпус повинен забезпечити герметичність (усередині корпусу створюється вакуум або запускається інертний газ).

ВИСНОВКИ

1. Функціональні можливості акустoeлектронних пристроїв значно розширились з переходом від простих приладів на об'ємних акустичних хвилях до значно складніших пристроїв на поверхневих акустичних хвилях, які знаходять широке використання для генерації й обробки високочастотних сигналів в електронних системах різноманітного призначення.

2. Великий інтерес до приладів на поверхневих акустичних хвилях зумовлено відомими особливостями перетворення й розповсюдження ПАХ, а також успіхами фото- та електронно-променевої літографії.

3. Функціональні пристрої на ПАХ в теперішній час представлені широкою номенклатурою пристроїв: вузькосмуговими та широкосмуговими фільтрами, лініями затримки, комутуючими пристроями; резонаторами на ПАХ, дисперсійними фільтрами стиснення ЛЧМ-сигналу, пристроями запам'ятовування й визначення частоти, генераторами на ПАХ, синтезаторами частот та рядом інших пристроїв.

4. Пристрої на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) широко використовуються в системах формування та обробки сигналів, вимірювальних перетворювачах фізичних та механічних величин. Вони починають активно впроваджуватися в системи безпроводних пасивних сенсорів та ідентифікатори об'єктів, що отримали назву «радіомітка».

5. Принцип дії приладі на поверхневих акустичних хвилях полягає у використанні прямого та зворотного п'єзоефекту для перетворення енергії електромагнітних хвиль у механічну і навпаки.

6. Оскільки сенсори на ПАХ є пасивними компонентами, що не мають у своєму складі будь-яких активних логічних елементів, неможливо опитати кожен сенсор окремо. Сигнал радіозапиту від ПООІ надходить на кожен сенсор в радіусі дії і кожен сенсор ретранслює сигнал радіовідгуку. Таким чином, при використанні певних технологій реалізовується множинний доступ.

7. Поширення сигналів у відкритому середовищі, якою є радіоефір, супроводжується виникненням всякого роду перешкод, джерелом яких служать самі поширювані сигнали. Тому для зменшення впливу перешкод на практиці використовують ортогонально-частотне кодування (або псевдоортогонально-частотне кодування), що дозволяє збільшити відношення сигнал/шум і виділити корисний сигнал на фоні шуму. Що в свою чергу є завадостійким кодуванням радіосигналу.

8. Проведено розрахунки основних елементів моделі радіомітки для інформаційно – вимірювальних систем з безпроводними пасивними сенсорами на ПАХ. Особливістю її є те, що вона містить вхідний/вихідний зустрічно-штировий перетворювач, що забезпечує стиснення вхідного сигналу радіозапиту та дозволяє забезпечувати режим множинного доступу на основі ортогонального частотного кодування.

9. Технологічний процес виготовлення пристроїв на ПАХ можна представити у вигляді трьох етапів: виготовлення підкладки з п'єзоелектрика, формування електродних структур на її поверхні, складання та дослідження параметрів пристрою.

10. Для пристроїв на ПАХ застосовуються п'єзоелектричні підкладки у формі паралелепіпеда. Основним параметром ЛЗ на ПАХ є швидкість розповсюдження хвилі, вона залежить у першу чергу від характеристик матеріалу звукопроводу п'єзоелектрика, у якому відбувається збудження, поширення і детектування ПАХ.

11. Основною найскладнішою операцією при виготовленні пристроїв на ПАХ є формування електродних структур. Робочі параметри виготовлених пристроїв обмежуються такими характеристиками літографічного процесу як роздільна здатність, точність, щільність дефектів та ін. До відомих методів літографії відносяться контактна, проекційна фотолітографія, електроннопроменева і рентгенографія, лазерографія і голографія.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Речицкий В.И. Акустоэлектронные радиокомпоненты: элементы и устройства на поверхностных акустических волнах. – М.: сов. радио, 1980-264 с. ил.
2. Морган Дейвид. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. – Москва: советское издание – 415с.
3. RFID-технология. Все о радиочастотной идентификации. // РСТ Инвент. URL: <http://www.rst-invent.ru/about/technology/> (дата звернення: 08.04.2018).
4. Chernenko D., Zhovnir M., Oliinyk O., Tsyganok B. Wireless Passive Sensor Using Frequency Coded SAW Structures //35th International Spring Seminar on Electronics Technology „Power Electronics” (ISSE 2012). – Bad Aussee (Austria). – 2012. – P. 424 – 428.
5. Поляков П.Ф., Хорунжий В.А., Поляков В.П. Акустоэлектроника. Физико-технологические основы и применение: Справ. пособие: Том1.- Харьков: ООО «Компания СМИТ», 2007. – 552 с.
6. Поверхностные акустические волны / Под ред. А.Олинера; пер. с англ.; под ред. И.С.Реза. –М.:Мир, 1981. - 392 с.
7. Бондаренко В.С., Бочков Б.Г., Громашевский В.Л., Соболев Б.В. Нелинейные акустоэлектронные устройства и их применение / Под ред. В.С. Бондаренка. – М.: Радио и связь, 1985.
8. Багдасарян А.С. «Устройства на поверхностных акустических волнах в системах и средствах связи», Инженерная микроэлектроника, 8(71), с.33-39, 2002.
9. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 287 с.
10. Гуляев Ю.В. «Акустоэлектроника – Российский приоритет». Радиоэлектроника и управление», 2-3, с.55-61, 2002.
11. А. С. Бугаев, В. Ф. Дмитриев, С. В. Кулаков Устройства на поверхностных акустических волнах – М., 2009.

12. Жовнір М.Ф., Черняк М.Г., Черненко Д.В. та інш. Вимірювальні перетворювачі фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях // *Електроника и связь*. – 2011, № 1(60). – С.153-157.
13. Kalinin V., Beckley J. Wireless Interrogation of SAW Strain Sensors for Automotive Applications Using TMS320C28x Controller. – TI DeveloperConference, Dallas, 2006. URL: <http://www.transense.co.uk/downloads/articles/TIDC.pdf>.
14. Reindl L.M. Wireless Passive SAW Identification Marks and Sensors. URL: http://www.ieee-uffc.org/freqcontrol/tutorials/Reindl_2002_files/frame.htm.
15. Бітов М.В., Жовнір М.Ф., Писаренко Л.Д., «Ідентифікатор об'єкта на поверхневих акустичних хвилях» // 10-та конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки», 6-7 квітня 2016 року.
16. Жовнір М.Ф., Черняк М.Г., Черненко Д.В. та інш. Вимірювальні перетворювачі фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях // *Електроника и связь*. – 2011, № 1(60). – С.153-157.
17. Zhovnir M.F., Kuzmenko O.M., Pokutnyi S.I. Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement / *Journal of Applied Chemistry*. – 2015, 3(1).- P. 7-13.
18. Пат. US 7,642,898 B1 США, МПК H04Q 5/22. Orthogonal frequency coding for surface acoustic wave communication, tag and sensor application / Donald C. Malocha (США), Derek Puccio (США); заявл. 12.08.05; опубл. 5.01.10.
19. Pavlina J. M., Kozlovski N., Santos B. and Malocha D. C. SAW RFID Spread Spectrum OFC and TDM Technology // *International Conference on RFID*. – 2009. – P. 110 – 116.
20. Пат. US 20100060429A1 США, H04Q 5/22, H01L 41/047. SAW sensor tags with enhanced performance / Jacqueline H.Hines (США), Leland P.Solie (США), Saul Ewing LLP; заявл. 06.08.09; опубл. 11.03.10.
21. Пат. № UA 77898 U Україна, МПК G01S 13/26, G01S 13/75, H01L 41/08. Пасивна радіомітка на поверхневих акустичних хвилях / Черненко Д. В., Жовнір М. Ф.; заявл. 08.10.2012; опубл. 25.02.2013, бюл. № 4.

22. Беспроводные сети - как это работает. // Ferra.ru. URL: <http://www.ferra.ru/ru/networks/s25619/page-2/#.V1XNUdmLTdc>
23. Разработка технологии изготовления активных приборов на ПАВ, Лучинин В. В., 1988. С.5 – 23.
24. Поляков П.Ф., Хорунжий В.А., Поляков В.П. Акустоэлектроника. Физико-технологические основы и применение. – Харьков: ООО «Компания СМИТ», 2007. – т.2. – 552 с.