

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроніки
Кафедра електронних приладів та пристроїв**

«На правах рукопису»
УДК 534.24

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

_____ Л.Д. Писаренко
“ ____ ” _____ 2018 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 171 –Електроніка
Спеціалізація «Електронні прилади та пристрої»**

**на тему: «Дослідження та моделювання хвильових структур на
поверхневих акустичних хвилях»**

Виконала:

Студентка 6 курсу, гр. ДЕ-61м

Плешка Т.Є. _____

Науковий керівник:

Доцент, канд. техн. наук., с.н.с.

Жовнір М.Ф. _____

Нормоконтроль:

Доцент, канд. техн. наук., с.н.с.

Жовнір М.Ф. _____

Рецензент:

канд.техн. наук

Доцент кафедри мікроелектроніки,
Івашук А.В. _____

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

Студентка _____

Київ – 2018

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

Факультет (інститут) _____ Е л е к т р о н і к и

Кафедра _____ Електронні прилади та пристрої

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за 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 студентці

Плешка Тетяні Євгеніївни

1. Тема дисертації «Дослідження та моделювання хвилевідних структур на поверхневих акустичних хвилях»

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

2. Термін подання студентом дисертації: « ____ » _____ 2018 р.

3. Об'єкт дослідження: Хвилевідні структури на поверхневих акустичних хвилях.

4. Предмет дослідження: На базі порівняльного огляду науково-технічної літератури щодо конструктивних особливостей та методів фізико-математичного моделювання хвилевідних структур на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) розробити методику розрахунку та дослідження характеристик хвилеводів на ПАХ. Хвилеводи на базі п'єзоелектричної плівки ZnO; частотний діапазон $f=40\dots180$ МГц.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Огляд науково-технічної літератури по хвилевідним структурам на поверхневих акустичних хвилях; методика інженерного розрахунку ПАХ-хвилеводів і кільцевого ПАХ-резонатора.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: складальне креслення хвилевідного модулю, плакати з формулами та графіками.

7. Перелік публікацій:

- 7.1. Шелест Я.О., Плешка Т.Є., Жовнір М.Ф. Математична модель п'єзоелектричного хвилеводу поверхневих акустичних хвиль / XIII Всеукраїнська наукова конференція студентів і молодих вчених «Молодь: освіта, наука, духовність». Київ, 12-14 квітня 2016. – С. 303–305.
- 7.2. Плешка Т.Є., Жовнір М.Ф. П'єзоелектричні хвилеводи для вимірювальних перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях / X-а науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки». Київ, 07-08 квітня 2016. С. 94–100.
- 7.3. M.F. Zhovnir, T.E. Pleshka, «Mathematical model of piezoelectric film waveguide surface acoustic wave», XII International conference “Electronics and applied physics”, October 19-22, 2016, Kyiv, Ukraine, 2 p.
- 7.4. M.F.Zhovnir, T.E.Pleshka, L. D. Pysarenko, Saw-sensors of angular speed, XVII International young scientists' conference on applied physics, May, 23-27, 2017, 2 p.
- 7.5. Шевченко Д.Г., Плешка Т.Є., Жовнір М.Ф. «Підсилювачі поверхневих акустичних хвиль на структурах п'єзоелектрик-напівпровідник» / «XIV Всеукраїнська наукова конференція студентів і молодих вчених», м. Київ, 4-6 квітня 2017 р. – С. 468-469.
- 7.6. Плешка Т.Є., Жовнір М.Ф. Резонатор на біжучих поверхневих акустичних хвилях / XI-а науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки». Київ, 06-07 квітня 2017. С. 101–106.
- 7.7. M.F.Zhovnir, L. D. Pysarenko, T.E. Pleshka, «Comb filter based on saw-resonator of running wave», XIII International scientific conference «Electronics and applied physics» October 24-27, 2017, Kyiv, Ukraine, 2 p.
- 7.8. Бітов М.В., Жовнір М.Ф., Писаренко Л.Д., Плешка Т.Є., «Акустоелектронні перетворювачі з безконтактними чутливими елементами», ISSN 1811-4512. Electron Commun, 2017, vol. 22, №3 (98). – 61-67.
- 7.9. Плешка Т.Є., Жовнір М.Ф., «Математична модель пов'язаних ПАХ-хвилеводів» 12-та конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки», 19-20 квітня 2018 року, 3 с.
- 7.10. 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 : 12.02.2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд науково-технічної літератури по хвилевідним структурам поверхневих акустичних хвилях	10.04.2018	
2.	Методи моделювання хвилеводів поверхневих акустичних хвилях	20.04.2018	
3.	Методика та розрахунок параметрів хвилевідних структур поверхневих акустичних хвилях	30.04.2018	
8.	Оформлення пояснювальної записки, креслення та плакатів. Підготовка доповіді.	15.05.2018	

Студент гр. ДЕ-61м

Т.Є. Плешка

Науковий керівник дисертації

М.Ф. Жовнір

РЕФЕРАТ

Дослідження та моделювання хвилевідних структур на поверхневих акустичних хвилях / Магістерська дисертація зі спеціальності **171– Електроніка** спеціалізації **«Електронні прилади та пристрої».** **Плешка Тетяна Євгеніївна.** НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-61м. – К.: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2018. – 87 с., іл. 31.

Ключові слова: ОАХ – об’ємна акустична хвиля; ПАХ – поверхнева акустична хвиля; хвилевід; п’єзоелектричний хвилевід; концентратор; АЕП – акустоелектронні пристрої; ЗШП – зустрічно-штировий перетворювач; АРК – акусторадіоелектронні компоненти.

Короткий зміст роботи: В магістерській атестаційній роботі представлено огляд науково-технічної літератури по хвилеводних структурах на ПАХ.

Показано перспективи використання пристроїв на ПАХ для фільтрів та ліній затримки на тривалий час, пристроїв згортки радіоімпульсів, відгалужувачів, подільників потужності, циркуляторів, сенсорів фізичних та механічних величин.

Приведено результати дослідження фізико-математичної моделі розрахунку конструктивних параметрів хвилеводу на поверхневих акустичних хвилях та довжини зв’язку двох слабо пов’язаних хвилеводів. Приведено результати дослідження фізико-математичної моделі хвилеводів і кільцевого резонатора, що можуть бути використані в якості гребінкових фільтрів.

А Н О Т А Ц І Я

Пристрої на поверхневих акустичних хвилях надзвичайно універсальні, комерційний потенціал яких постійно зростає. Вони конкурентноздатні за ціною, міцні, дуже чутливі, надійні.

Хвилеводи поверхневих акустичних хвиль дозволяють більш раціонально використовувати площу підкладки, значно підвищувати густину акустичної потужності. П'єзоелектричні звукопроводи та хвилеводи, в яких поширення поверхневих акустичних хвиль супроводжується біжучим електричним полем, можуть знайти застосування у вимірювальних перетворювачах лінійних та кутових переміщень, кутової швидкості.

S U M M A R Y

Devices for surface acoustic waves are extremely versatile, commercial potential is constantly growing. They are competitive, strong, very sensitive, reliable.

Waveguide surface acoustic waves allow use the area of the substrate more efficiently, significantly increase the density of acoustic power. Piezoelectric Sound-Conductor and waveguide, in which propagation of surface acoustic waves accompanied by a traveling electric field, can be applied to measuring transducers of linear and angular displacement, angular velocity.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1 Класифікація і загальні відомості про поверхневі акустичні хвилі	11
1.2 Загальна характеристика пристроїв на ПАХ.....	12
1.3 Основні поняття про хвилеводи.....	15
1.4 Типи хвилевідних структур ПАХ	16
1.5 Властивості хвилеводів:.....	32
1.6 Опис резонаторів на ПАХ	32
1.7 Характеристика фільтрів на ПАХ.....	34
1.8 Матеріали для пристроїв на ПАХ.....	36
Висновки	37
2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.....	38
2.1 Моделювання плівкового ПАХ-модуля.....	38
2.2 Моделювання пов'язаних плівкових ПАХ-хвилеводів.....	47
2.2. Моделювання кільцевого ПАХ-резонатора.....	51
Висновки	57
3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	58
3.1 Особливості конструювання і виготовлення АРК.....	58
3.2 Технологічний процес виготовлення звукопроводу.....	62
3.3 Процес фотолітографії	66
3.4 Основні питання конструювання і виготовлення АРК	75
Висновки	84
ВИСНОВКИ.....	85
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАННОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	88

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

АЕП - акустoeлектронні пристрої

АРК - акусторaдіoeлектронні компоненти

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ВП – вимірювальний перетворювач

ЗШП – зустрічно-штирові перетворювачі

КР – кільцевий резонатор

ПАХ - поверхнева акустична хвиля

ОАХ - об'ємні акустичні хвилі

ВСТУП

На сьогоднішній день акустoeлектронні пристрої (АЕП) все більш успішно впроваджуються при створенні електронних систем обробки інформації і вимірювальної техніки.

Технологія пристроїв ПАХ в значній мірі базується на прогресивних прийомах, що застосовуються у виробництві виробів мікроелектроніки із застосуванням процесів фотолітографії, групових процесів планарної обробки підкладок і т. д. Це створює передумови для масового виробництва високоякісних перетворювачів.

Пристрої на поверхневих акустичних хвилях надзвичайно універсальні, комерційний потенціал яких постійно зростає. Вони конкурентноздатні за ціною, міцні, дуже чутливі, надійні.

Тонкоплівкові хвилеводи поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) запобігають розширенню пучків ПАХ, що в свою чергу дозволяє більш раціонально використовувати площу підкладки і змінювати напрям поширення хвилі, що обумовлює їх використання для поліпшення параметрів акустoeлектронних пристроїв.

Хвилеводи поверхневих акустичних хвиль використовують для створення фільтрів та ліній затримки на тривалий час, пристроїв згортки радіоімпульсів, відгалужувачів, подільників потужності, циркуляторів, сенсорів фізичних та механічних величин [1]. П'єзoeлектричні звукопроводи та хвилеводи, в яких поширення ПАХ супроводжується біжучим електричним полем, можуть знайти застосування у вимірювальних

перетворювачах (ВП) лінійних та кутових переміщень, кутової швидкості [2-4].

Фільтруючі пристрої – невід'ємна частина практично будь-якої складної радіоелектронної системи. В теперішній час в діапазоні десятків мегагерц – одиниць гігагерц широко застосовуються фільтри на поверхневих акустичних хвилях, що використовують резонансні властивості зустрічно-штирових перетворювачів (ЗШП) ПАХ [3, 4].

Завданням магістерської дисертації є розробка математичної моделі двох п'єзоелектричних ПАХ-хвильоводів при забезпеченні одномодового режиму поширення хвилі і розробка конструкції та математичної моделі гребінкового фільтра на базі кільцевого резонатора (КР) та двох хвильоводів поверхневих акустичних хвиль з врахуванням інтегральних погонних втрат.

1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Класифікація і загальні відомості про поверхневі акустичні хвилі

Поверхнева акустична хвиля - акустична хвиля, що поширюється вздовж поверхні твердого матеріалу, не проникаючи в об'єм. Її амплітуда затухає швидко, часто експоненціально, з глибиною матеріалу. Поверхневі пружні хвилі займають діапазон 10^{-5} — 10^{-1} см. Їхні частоти відповідають області ультразвуку.

Перші роботи по поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) знайшли застосування в розробці методів сейсмології і сейсморозвідки. Але особливе прикладне значення ПАХ отримали з середини 60-х років, коли використання п'єзоелектричних матеріалів і ефективних збудників хвиль, дозволило знайти ефективне застосування пружним хвилям з частотою порядку 10^6 Гц, зокрема в галузі неруйнівного контролю. Успіхи досягнуті в цьому напрямку в умовах бурхливого розвитку електроніки привели до створення нового розділу прикладної науки - акустoeлектроніки. Коло питань, що вивчаються в акустoeлектроніці вельми широкий, так що навіть коротка характеристика напрямів зайняла б великий об'єм. Тому увага буде зосереджена на проблемі, рішення якої має ряд специфічних додатків в пристроях обробки інформації: конвольверах, лініях тривалої затримки сигналу, оперативних запам'ятовуючих пристроях. Йдеться про хвилеводи поверхневих акустичних хвиль.

Класифікувати однозначно хвилеводи на ПАХ складно. Проте, в літературі виділяють наступні типи акустичних хвилеводів: топографічні, плоскі шаруваті і хвилеводи з локальною зміною властивостей плоскої підкладки [1,2].

Перш, ніж приступити до характеристики кожного з перерахованих типів хвилеводів, слід представити деякі відомості, що стосуються фізичних основ проходження поверхневих акустичних хвиль у шарових середовищах.

Рішення ПАХ, що розповсюджуються на напівнескінченній підкладці, не представляє особливих математичних труднощів у разі плоских хвиль в ізотропному середовищі. Як відомо, при проходженні об'ємних хвиль в пружному твердому тілі розрізняють два типи коливань - подовжні і поперечні, причому кожен тип коливань має свою швидкість, і тому може бути виділений.

1.2 Загальна характеристика пристроїв на ПАХ

У твердому тілі може поширюватися кілька типів поверхневих акустичних хвиль. В ізотропному твердому тілі вздовж вільної поверхні кристала можуть поширюватися релеївські поверхневі хвилі. Ці хвилі мають два компонента пружних зміщень, розташовані в сагітальній площині, тобто площині утвореною нормаллю і хвильовим вектором.

Іншим типом пружних хвиль в твердому тілі є хвилі Стоунлі, які поширюються уздовж кордону розділу двох ізотропних тіл. При визначеному співвідношенні між матеріальними параметрами двох середовищ ці хвилі мають структуру, близьку до структури релеївської поверхневої хвилі, і проникають в глиб середовища на товщину порядку довжини хвилі.

Уздовж поверхні, покритої однорідним шаром іншої речовини, поширюються хвилі Лява. Хвилі Лява є чисто зсувні хвилі, які мають тільки компонент пружних зміщень, перпендикулярний сагітальній площині, і проникають в глиб речовини на довжину хвилі. Хвилі Лява володіють дисперсією, їх швидкість залежить від частоти і товщини шару.

У поверхневих хвилях, що поширюються в п'єзоелектриках, пружні зміщення через п'єзоефект супроводжуються змінним електричним полем. У свою чергу змінні електричні поля, пронизують п'єзоелектрик, і призводять до появи пружних деформацій, що поширюються в його об'ємі. Пружні поверхневі хвилі в п'єзоелектриках описуються системою рівнянь теорії пружності та рівняннями Маковелла. Швидкість цих хвиль приблизно на п'ять порядків менше швидкості світла в речовині[3].

ПАХ являються характерною рисою багатьох видів електронних компонентів, зокрема фільтрів, осциляторів, і датчиків. Пристрої ПАХ зазвичай використовують електроди на п'єзоелектричному матеріалі для перетворення електричного сигналу на ПАХ, і в зворотньому напрямку.

У акустoeлектронних пристроях використовуються звукові і ультразвукові хвилі широкого діапазону частот від одиниць до десятків ГГц. У низькочастотній області акустoeлектронні вироби виконуються на основі п'єзокерамічних матеріалів, що дозволяють перетворювати звукові і ультразвукові сигнали в електричні і назад, що дає можливість створити дуже багато акустoeлектронних виробів, що працюють в діапазоні від одиниць до 30 МГц.

Для високочастотного діапазону широко використовуються як об'ємні акустичні хвилі (ОАХ), так і поверхневі акустичні хвилі. Основною перевагою ПАХ є доступність хвильового фронту, що дозволяє знімати сигнал і управляти розповсюдженням хвилі в будь-яких точках звукопровода,

а також управляти характеристиками цих пристроїв і створювати численні пристрої з різними функціями [4].

Сучасні акустoeлектронні прилади зазвичай представляють собою структури резонансного типу. Принцип дії багатьох з них заснований на використанні п'єзoeфекту.

Прямий п'єзoeфект виявляється в виникненні зарядів на поверхні твердого тіла під впливом механічної напруги. Зворотний п'єзoeфект виявляється в зміні геометричних розмірів тіла під дією прикладеної напруги.

Історично першим матеріалом, що знайшов застосування в акустoeлектроніці, був монокристал кварцу. На його основі реалізуються різні акустoeлектронні прилади[5].

Пристрої на поверхневих акустичних хвилях надзвичайно універсальні, комерційний потенціал яких постійно зростає. Вони конкурентноздатні за ціною, міцні, дуже чутливі, надійні. Серед них можна виділити чималий різновид датчиків. Деякі є бездротовими й/або не вимагають елементів живлення. Бездротові датчики досить зручні для використання на об'єктах, що рухаються, наприклад, для виміру тиску покришок на машинах або крутному моменті вала. Датчики яким не потрібна енергія застосовуються для спостереження за хімічними випарами, вологістю й температурою. Інші застосування включають вимір сили, прискорення, ударної хвилі, кутової швидкості, в'язкості, зсуву й потоку. Датчики також володіють електроакустичною чутливістю, що дозволяє їм визначати рівень іонних домішок й електричні поля. Датчики поверхневої акустичної хвилі одні з найчутливіших, що є результатом високої щільності енергії на поверхні. Триває робота з розробки даних датчиків для застосування їх в інших областях[4].

1.3 Основні поняття про хвилеводи

У більшості акустичних радіокомпонентів для збудження (прийому) поверхневої акустичної хвилі використовуються перетворювачі з апертурою, що значно перевищує довжину хвилі ($W = 20 \dots 200\lambda_a$). Мінімальна апертура перетворювача обумовлена дифракційними ефектами, що виникають за межами першої зони Френеля, межа якої визначається виразом $t = W^2 / \lambda_a$.

На відстані від перетворювача, що збуджує хвилю, більше t розширення акустичної хвилі призводить до значних енергетичних втрат і спотворення електричних характеристик. У однозахідних лініях затримки електричних сигналів з великим часом затримки перетворювачі рознесені на значні відстані; поряд з цим потрібно збільшувати і апертуру перетворювачів (і поперечний розмір звукопровода). Локалізація енергії акустичної хвилі у вузькому промені дозволяє значно раціональніше використовувати робочу поверхню звукопровода. Операцію локалізації здійснюють елементи акустичного тракту, що отримали назву акустичних хвилеводів[2].

Хвилевід — структура, призначена для передачі хвиль, електромагнітних, звукових, або іншої природи, в якій хвиля обмежена в одному чи двох вимірах повним внутрішнім відбиттям на границі. Електромагнітний хвилевід, наприклад, застосовується для передачі мікрохвильового випромінювання і має вигляд металевої труби. В оптичному діапазоні електромагнітного спектру хвилеводами є оптоволокно. Прикладом звукового хвилевода є стетоскоп.

Зазвичай поперечні розміри хвилевода одного порядку з довжиною хвилі, яка в ньому розповсюджується. Електромагнітні хвилі, з довжиною, набагато більшою від поперечних розмірів хвилевода, в ньому не розповсюджуватимуться. В акустичному хвилеводі з жорсткими стінками

поширюється плоска хвиля з довільною довжиною. Якщо довжина хвилі набагато менша від розмірів хвилевода, втрати в ньому збільшуються внаслідок розсіювання хвилі, при якому кут її падіння на стінки стає більшим від кута повного внутрішнього відбиття.

Зазвичай у хвилевода існує одна або кілька нормальних мод, тобто конфігурацій поля хвилі.

Збудження хвилеводних мод відбувається двома шляхами: з торця хвилевода та призмовим методом. Збудження з торця не підходить для збудження окремих мод, тому при лабораторних дослідженнях спектру хвилеводних мод в інтегрально-оптичних структурах користуються, як правило, методом призми з порушенням повним внутрішнім відбиттям [5].

1.4 Типи хвилевідних структур ПАХ

ПАХ-хвилеводи представляють собою геометричні структури, що обмежують хвилю в поперечному напрямку на поверхні підкладки. На рис.1 представлено основні три типи хвилеводів, які принципово можуть бути використані при розробці вимірювальних перетворювачів: топографічні хвилеводи (а, б); хвилеводи з локальною зміною параметрів підкладки (в); плівкові хвилеводи (г-ж) [1].

Гребінкові топографічні хвилеводи отримують, як правило, вибіркоким травленням. В гребінковому хвилеводі (рис.1, а) поширюється антисиметрична (згинальна) мода, якій властиві сильна локалізація та значне уповільнення хвилі, але ця мода має сильну дисперсію фазової швидкості, що необхідно враховувати при створенні пристроїв, що повинні функціонувати у визначеному частотному діапазоні. У цьому ж хвилеводі може збуджуватися також симетрична (псевдорелеєвська) мода, яка забезпечує високу локалізацію хвилі, але має менше уповільнення хвилі. У той же час,

ця мода має меншу дисперсію фазової швидкості хвилі у широкій смузі частот.

У клиноподібному топографічному хвилеводі (рис.1, б) спостерігається сильна локалізація акустичного поля, високе уповільнення та низька дисперсія фазової швидкості. Фазова швидкість та можливі моди хвильового поширення ПАХ сильно залежать від кута при вершині клина. При кутах, що перевищують 45° поширюється основна уповільнена мода, яка майже не має дисперсії. Однак, якщо порушується вершина, то виникає значне відбиття та дисперсія фазової швидкості хвилі.

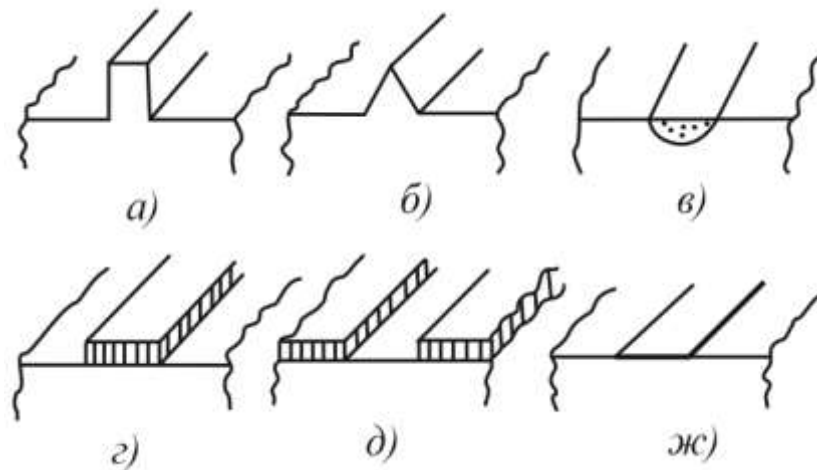


Рис.1.1.Типи ПАХ-хвилеводів

Дифузійні хвилеводи (рис.1, в) створюються локальною зміною властивостей матеріалу підкладки, наприклад, дифузією, іонною імплантацією тощо. Такі хвилеводи мають слабку локалізацію акустичного поля та мале уповільнення хвилі. Однак, такі хвилеводи мають низьку дисперсію фазової швидкості та малі втрати на поширення.

У центральних областях плівкових хвилеводів (рис.1, г...ж) фазові швидкості менші, ніж на зовнішніх областях, що призводить до локалізації акустичного поля. У випадку плівкового хвилеводу (рис.1, г) плівка

напилюється із матеріалу, на поверхні якого акустична хвиля мала би меншу швидкість у порівнянні зі швидкістю на підкладці. У випадку хвилеводу (рис.1, д) підкладка повинна забезпечувати меншу фазову швидкість хвилі, ніж на бічних поверхностях, що призводить до локалізації акустичного поля у центральній області структури.

Хвилевід (рис.1, ж) створюється напиленням на поверхню п'єзоелектричної підкладки тонкого металевого шару, що закорочує електричне поле, яке виникає у результаті деформацій на поверхні п'єзоелектрика, і призводить до уповільнення ПАХ в області плівки.

Плоскі поверхневі хвилі є лінійною комбінацією подовжніх і поперечних хвильових коливань, при яких будь-яка точка поверхні описує в просторі еліпс. Рішення ПАХ можна одержати з основного рівняння теорії пружності - рівняння Ламе [1...5].

Дещо складніше з рішенням задачі розповсюдження ПАХ в анізотропних п'єзоелектричних середовищах. Взаємний вплив електричних і механічних зсувів призводить до того, що в процесі рішення рівнянь доводиться мати справу з тензорами різних рангів, а це значно ускладнює точний розрахунок хвильових полів. Тому спочатку розглянемо розповсюдження поверхневих пружних хвиль в ізотропних шарових середовищах.

Зроблена спроба одержати спрощені, орієнтовні співвідношення для проектування поверхневих акустичних хвилеводів і пристроїв на їх основі. У більшості статей автори так чи інакше зверталися до теорії проходження поверхневих акустичних хвиль в шарових середовищах, вводячи нові методи рішення задач з метою максимального спрощення чисельних розрахунків.

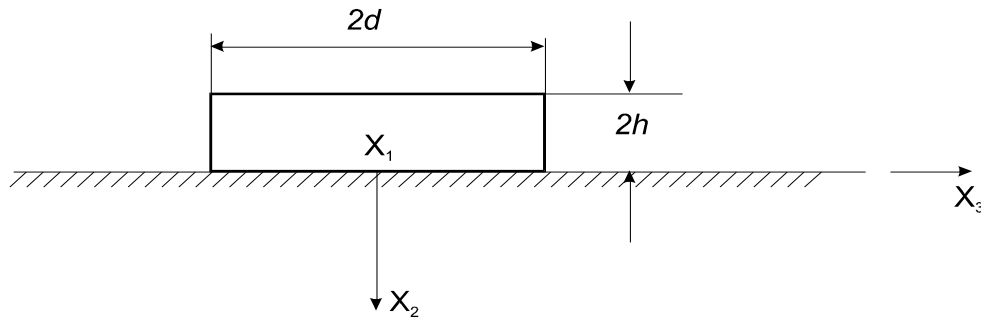


Рис. 1.2. Стрічковий хвилевід

Розглянемо хвильоводну систему, представлену на рис.1.2. Хвилі розповсюджуються уздовж x_1 з рисунка. Одержати точне рішення для цього випадку вельми складно, проте існує безліч способів наближеного рішення, точності, яких виявляється достатньо у ряді практичних випадків.

Оскільки в хвильоводах на ПАХ плівка тонша в порівнянні з довжиною хвилі і амплітуда ПАХ зменшується з глибиною, то можна побудувати простий і разом з тим достатньо точний метод рішення задачі. Він полягає у тому, що певні властивості хвиль змінного профілю містяться в рішенні плоского скалярного хвильового рівняння:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = c^{-2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2}, \quad (1.1)$$

де ω - хвильова функція, а c - швидкість плоскої хвилі; причому, рішення (1.1) може бути записане у вигляді

$$\omega = D \cos(\eta x_3) e^{i(kx_1 - \omega t)}, \quad (1.2)$$

що після підстановки в (1.1) дає співвідношення для швидкості:

$$V = c \left[1 + \frac{\eta^2}{h^2} \right], \quad (1.3)$$

де, $c = c(\xi)$ є функція результуючого поверхневого хвильового числа ξ , і зокрема там, де підкладка вільна від плівки, $c = V_R$, тобто постійна. Дисперсійні криві швидкості ПАХ в шарових середовищах звичайно будують у функції безрозмірного хвильового числа kh . Так от в даному випадку якраз мається на увазі що, $\eta = 2h\xi$ і є безрозмірне хвильове число, виражене через результуюче ξ , і для випадку плоских хвиль постійного профілю $\xi = k$, $\eta = 0$. Користуючись графіками дисперсійних залежностей для хвилеводів можна визначити $c = c(\xi)$.

Рівняння (1.1) описує проходження хвиль по обидві сторони межі g (при цьому c - різні). У таких задачах завжди ставиться питання: які умови повинні задовольнятися на межі розділу. В даному випадку - на межі g . Якби (1.1) було рівнянням руху деякого механічного об'єкту, наприклад мембрани, то швидкість c була б пов'язана з питомими коефіцієнтами густини кінетичної m і пружної енергії l співвідношенням:

$$c^2 = l/m, \quad (1.4)$$

При цьому на будь-якій лінії неоднорідності слід було б вимагати безперервності ω разом з своєю похідною по нормалі до межі:

$$\omega^+ = \omega^-, \quad l^+ \frac{\partial \omega^+}{\partial n} = l^- \frac{\partial \omega^-}{\partial n} \quad (1.5)$$

Необхідно визначити значення l^+ і l^- що легко зробити знаючи c^+ і c^- і скориставшись (1.4), але тільки в тому випадку, якщо можливо відшукати значення m . Для цього потрібно узяти усереднений за часом інтеграл по замкнутому контуру від питомої об'ємної густини кінетичної енергії для

хвиль постійного профілю з урахуванням глибини проникнення і поділити його на значення питомої густини кінетичної енергії для того ж розв'язання на поверхні підкладки, усередненого по замкнутому контуру.

Приведений спосіб рішення задачі хоча і менш точний, чим скажемо, метод якнайменших площ або певні варіаційні методи, але при достатній в практичній точності зберігає аналітичну простоту і полегшує значною мірою безпосередній розрахунок[1].

Представимо аналітичне рішення для конфігурації, зображеної на рис.1.2 у припущенні, що в плівці розповсюджується симетрична мода. Хвильова функція має наступний вигляд:

$$\begin{aligned}\bar{\omega} &= \bar{P} \cos(\bar{\eta} x_3) e^{i(kx_1 - \alpha t)}, \quad 0 < x_3 < d \\ \omega &= P \exp(-\eta(x_3 - d)) e^{i(kx_1 - \alpha t)}, \quad d < x_3\end{aligned}\quad (1.6)$$

де штрихи ставляться над величинами, що відносяться до області, покритої плівкою. Рівняння (1.6) задовольняє (1.1) і після підстановки приводять до умов:

$$\begin{aligned}\bar{\eta}^2 &= k^2 \left[\frac{V^2}{\bar{V}_s^2} - 1 \right], \\ \eta^2 &= k^2 \left[1 - \frac{V^2}{V_s^2} \right],\end{aligned}\quad (1.7)$$

де $\bar{V}_s$ - фазова швидкість хвиль постійного профілю у області покритої плівкою. Результируюче хвильове число виражається через $\bar{\eta}$:

$$\xi^- = (k^2 + \eta^{-2})^{1/2},$$

а на вільній поверхні:

$$\xi = (k^2 - \eta^2)^{1/2}.$$

Слід зазначити, що $V_s \equiv V_R$ - швидкість релєєвських хвиль постійного профілю на вільній поверхні.

Як випливає з рівнянь (1.7), щоб $\bar{\eta}$ і η були дійсними, необхідно, щоб, $V > \bar{V}_s$, $V < V_s$ відповідно або

$$\bar{V}_s < V < V_s. \quad (1.8)$$

З рівнянь (1.6) видно, що поверхневі хвилі у хвилеводі концентруються у півці при виконанні умови $\bar{V}_s < V$. Тому, є всі підстави вважати результуючий ефект хвилеводним при дійсних і позитивних η і $\bar{\eta}$, де (1.6) описує ПАХ в поверхневому акустичному хвилеводі. Головною перевагою релєєвської моди в цьому випадку є її слабкий зв'язок з іншими модами при зростанні частоти.

Задоволення граничних умов на $x_3 = d$ (див. формулу (1.5)) приводить до необхідності виконання

$$\bar{P} \cos(\bar{\eta}d) = P, \quad l^- \frac{\partial \omega^-}{\partial x_3} = l^+ \frac{\partial \omega^+}{\partial x_3},$$

або з урахуванням (1.4):

$$\operatorname{tg}(\bar{\eta}d) = \left(\frac{\eta}{\bar{\eta}} \right) \left(\frac{m}{\bar{m}} \right) \left(\frac{V_s^2}{V_s^{-2}} \right).$$

Одержане трансцендентне рівняння дозволяє визначити швидкість поверхневих хвиль в хвилеводі. На рис.1.3 приведені дисперсійні характеристики для плівкових хвилеводів, звідки видно, що крива нижчої симетричної моди (1.6) асимптотично наближається до кривої швидкості релєєвської хвилі на вільній поверхні для плоских хвиль постійного профілю.

Наступною модою, вищого порядку по відношенню до симетричної, є перша антисиметрична мода, яка починає розповсюджуватися в хвилеводі

після досягнення хвильовим числом $\bar{\omega} = \hbar k$ певного значення і погіршує зазвичай умови експерименту.

Хвильова функція для антисиметричної моди має вигляд:

$$\bar{\omega} = \bar{Q} \sin(\bar{\eta} x_3) e^{i(kx_1 - \omega t)}, \quad 0 < x_3 < d \quad (1.9)$$

$$\omega = Q \exp[-\eta(x_3 - d)] e^{i(kx_1 - \omega t)}, \quad d < x_3$$

Аналогічним чином знаходиться і дисперсійне рівняння для антисиметричної моди

$$\operatorname{tg}(\bar{\eta} d) = -\left(\frac{\bar{\eta}}{\eta}\right) \left(\frac{\bar{m}}{m}\right) \left(\frac{\bar{V}_s^2}{V_s^2}\right) \quad (1.10)$$

У приведеному аналізі поверхневих акустичних хвилеводів була віддана перевага розгляду плівкових хвилеводів. Було показано, що ефект каналізації пружної енергії спостерігається при виконанні умови (1.8), з якого виходить однозначний висновок: швидкість псевдорелєєвських хвиль в матеріалі плівки повинна бути менша швидкості зсунутих хвиль в підкладці[1].

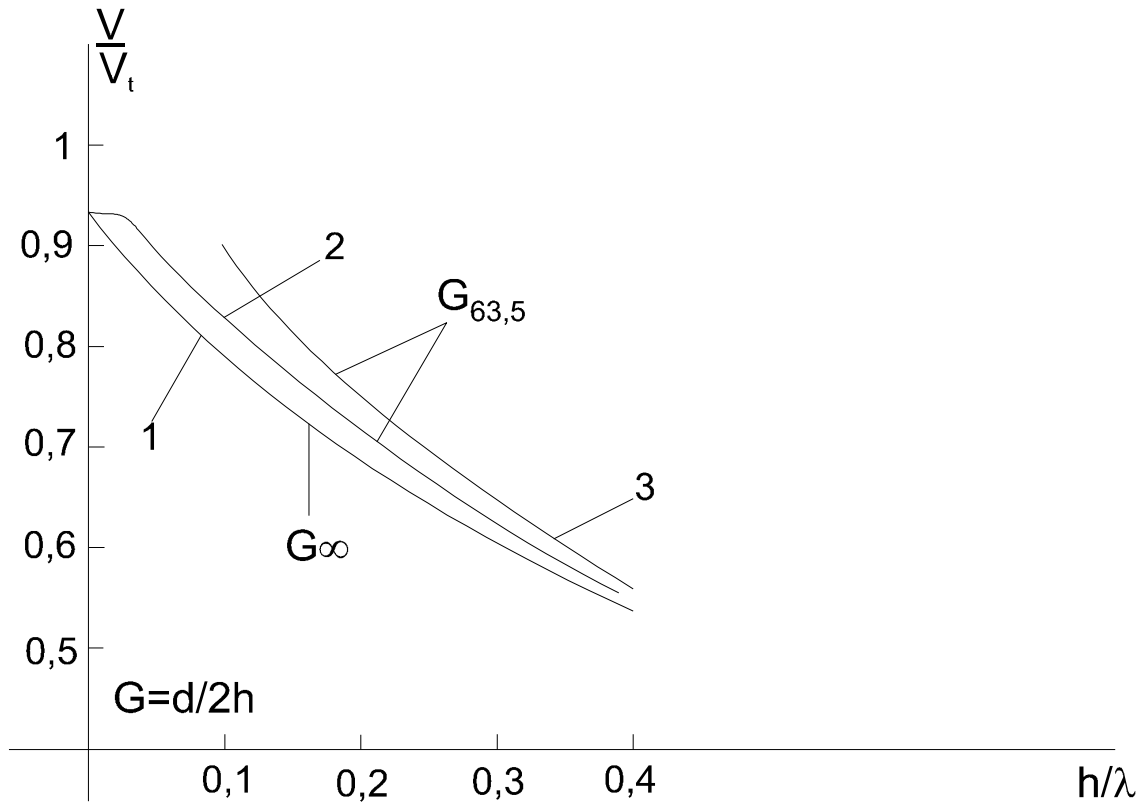


Рис. 1.3. Дисперсійні криві для смуги Au на SiO₂ пл. :

1- суцільне покриття; 2- симетрична мода; 3- антисиметрична мода

При цьому приймають, що плівка забезпечує масове навантаження поверхні. Проте, це не єдиний спосіб створення плівкових хвильоводів. Можлива і інверсна структура (рис. 1.4), для якої можна побудувати умови аналогічні (1.8) і також забезпечуючі хвильоводні властивості приповерхностного шару.

Очевидно, що в цьому випадку швидкість псевдорелеєвської моди в області $d < |x_3|$ повинна бути більша, ніж в підкладці, тобто плівкове покриття забезпечує жорсткість поверхні і, відповідно, хвильоводні властивості області $|x_3| < d$. Такі хвильоводи називаються щілевими. Важливою їх перевагою є слабка, в порівнянні з плівковими хвильоводами, дисперсія фазової швидкості, що виявляється істотним у ряді практичних випадках. В цілому

аналіз щілевих хвильоводів проводиться аналогічно розглянутому і одержані для плівкових хвильоводів формули зазнають незначні зміни.

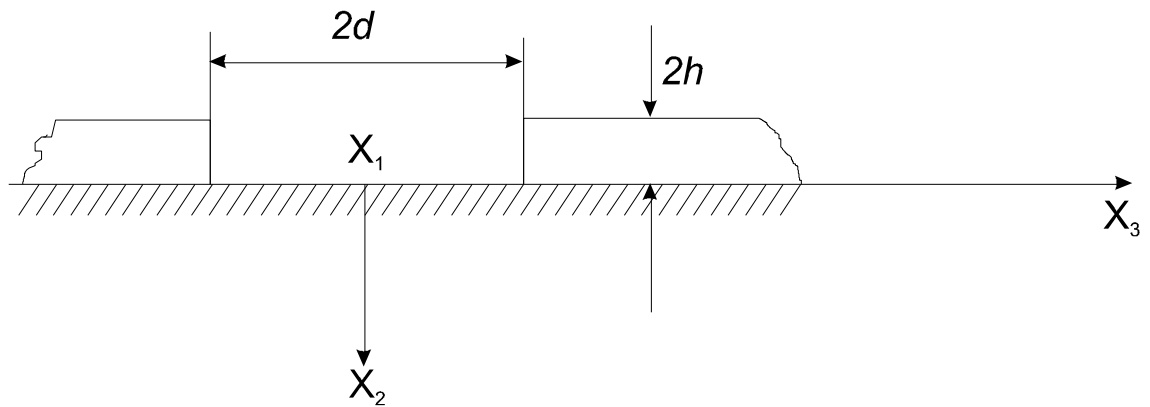


Рис. 1.4. Щілевий хвильовод

Як вже наголошувалося, точне рішення задачі поверхневих акустичних хвильоводів вельми складне через громіздкість розрахунків. Тому багато авторів робили спроби - і часто успішні - по введенню всіляких апроксимацій. Так, введення поверхневого акустичного імпедансу і застосування методу Галеркіна дозволяє істотно спростити кінцево-різницевий аналіз акустичних полів в плівкових хвильоводах.

Метод узгодження функції Гріна на межі розділу шарових систем робить математичні викладення менш громіздкими і веде до ряду узагальнень. Теорія скалярного потенціалу дозволяє одержати нескладну і разом з тим достатньо точну апроксимацію дисперсійних залежностей.

Ми ще повернемося в цьому огляді до плівкових хвильоводів, але вже в п'єзоелектричних шарових системах, а раніше розглянемо наступний в класифікації тип - поверхневі топографічні хвильоводи. Топографічні хвильоводи одержані лазерним відпалом, анізотропним труїнням, або іншим

способом локальні зміни форми поверхні пружної підкладки, забезпечуючі концентрацію акустичних полів у вузькій області.

Розглянемо топографічний хвилевод, зображений на рис.1.5. Розрахунки показують, що чим більше відношення H/W тим сильніша дисперсія фазової швидкості, причому топографічні хвилеводи з трикутним поперечним перетином істотно менш диспергуючі, ніж прямокутні. Проте трикутні топографічні хвилеводи володіють і недоліком: умови розповсюдження у них пружних поверхневих хвиль сильно залежить від стану вершини - будь-який скол або інша неоднорідність приводить до віддзеркалення хвиль, утворення помилкових сигналів, погіршення хвилеводних властивостей взагалі. Причому, із зростанням частоти ці небажані ефекти посилюються, що викликане концентрацією енергії акустичної хвилі у поверхні. Тому застосування топографічних хвилеводів обмежене.

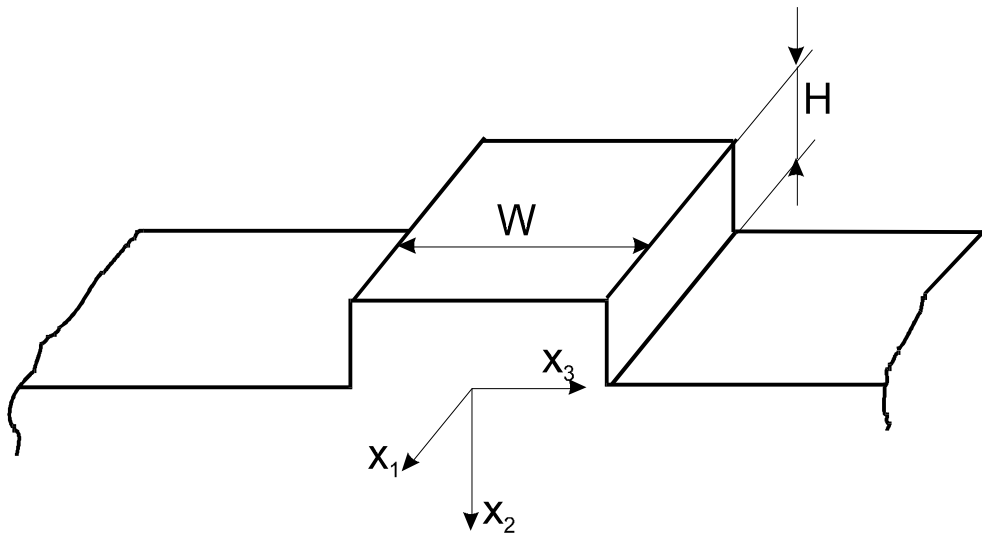


Рис. 1.5. Топографічний хвилевід

На рис. 1.6. приведена дисперсійна залежність фазової швидкості в трикутному топографічному хвилеводі.

Третій тип хвильоводів об'єднує структури з локальною зміною властивостей матеріалу звукопровода методом іонної імплантації. При цьому в підложці утворюється область, швидкість ПАХ в якій на 1-2% вища або нижче за швидкість ПАХ на вільній підкладці. Повідомлення про такі іонно-імплантовані хвильоводи зустрічаються відносно рідко, хоча деякі автори вважають створення таких хвильоводів перспективні.

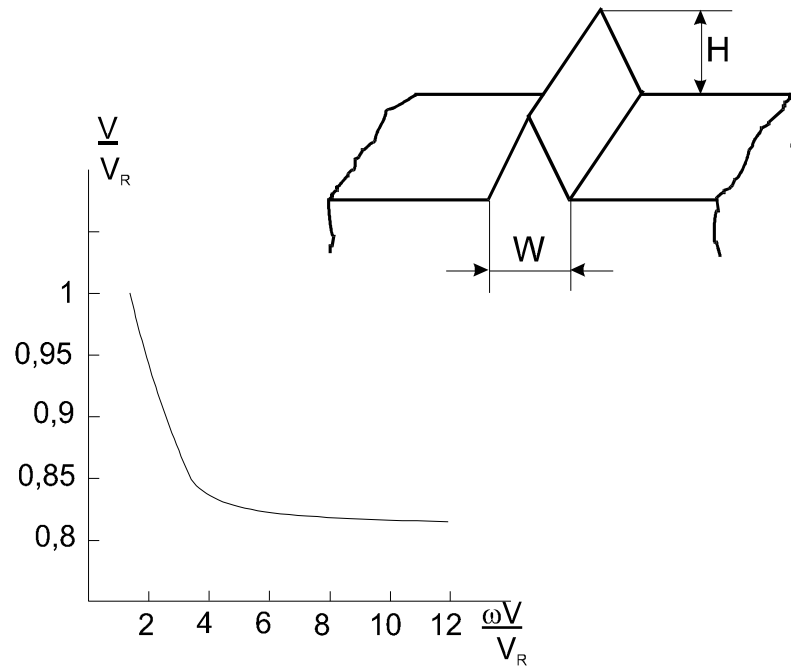


Рис. 1.6. Дисперсійна залежність фазової швидкості в трикутному топографічному хвильоводі

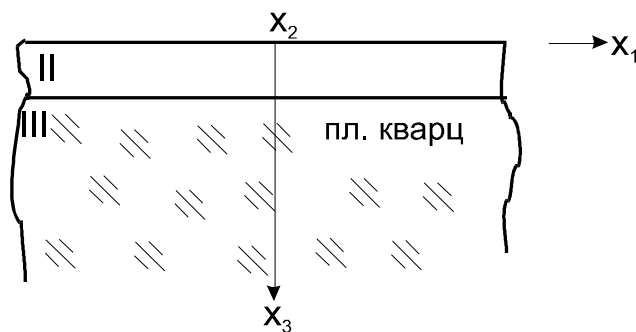
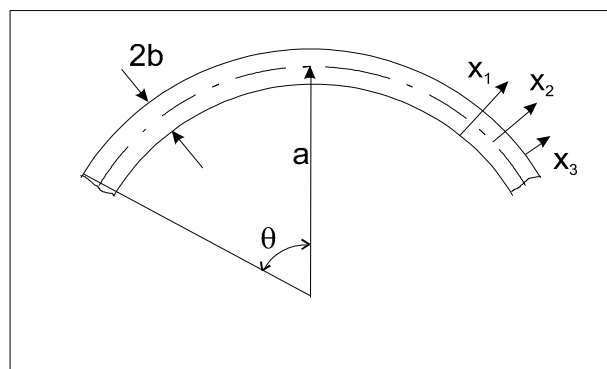


Рис. 1.7. Структура з локальною зміною властивостей матеріалу

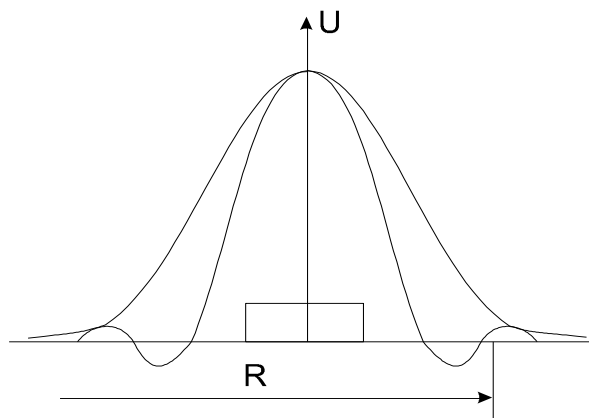
Можливо розповсюдження ПАХ в шарових середовищах на поверхні п'єзоелектричних матеріалів різних комбінацій: діелектрична плівка на

п'єзоелектричній підложці і навпаки, плівка металу на п'єзопідкладці і т.д. (див. рис. 1.7) [2].

Огляд літератури по хвильоводах ПАХ буде неповним, якщо не привести результати, одержані при вивченні вигину (заокруглення) хвильоводів. Непрямолінійні акустичні хвильоводи застосовуються в довгих лініях затримки, конвольверах, ультразвукових відгалужувачах. Поширення ПАХ у криволінійних хвильоводах розглянуто в роботі [6].



а)



б)

Рис. 1.8. Закруглений хвильовод

Розповсюдження поверхневих хвиль описується хвильовим рівнянням

$$\nabla^2 \omega = C_t^{-2} \ddot{\omega}, \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \quad (1.1)$$

1)

У циліндричних координатах хвильові функції можуть бути записані у вигляді

$$\omega = f(r) \cos(\nu\theta - \omega t), \quad (1.12)$$

де ν - умовне хвильове число.

Підстановка (1.12) в (1.11) приводить до диференціального рівняння Бесселя

$$f'' + \frac{1}{r}f' + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\nu^2}{r^2}\right)f = 0,$$

рішення якого:

$$f = cJ_\nu\left(\frac{\omega r}{c}\right), \quad f = cY_\nu\left(\frac{\omega r}{c}\right),$$

де J_ν і Y_ν - функції Бесселя першого і другого роду порядку ν . Порядок функцій ν великий - для всіх випадків більше 150. Значення аргументу теж дуже велике:

$$\frac{\omega r}{c} = \frac{\xi V_r}{c}$$

Більш того, оскільки для таких великих ν функція Бесселя носить експоненціальний характер при малих значеннях аргументу і істотно тригонометричний характер при великих значеннях аргументу, а також існує перехідна область, в якій порядок і аргумент приблизно рівні, то виникає необхідність приблизного рішення диференціального рівняння. І хоча функцію Бесселя можна апроксимувати з скільки завгодно малим кроком, вибрано лише три значення постійних радіусів, характерних для даної структури, рис.(1.8a)

$$r_1 = a - b, \quad r_2 = a, \quad r_3 = a + b$$

В цьому випадку рішення диференціальних рівнянь у характерних областях мають вигляд:

$$g_1 = A_1 e^{\eta_1 x_1}, \quad -(a-b) < x_1 < 0$$

$$g_2 = A_2 \cos \eta_2 x_2 + B_2 \sin \eta_2 x_2, \quad -b < x_2 < b$$

$$g_3 = A_3 e^{-\eta_3 x_3}, \quad x_3 > 0$$

Одержані звідси дисперсійні рівняння можна звести до безрозмірних змінних. Підкреслюється, що не дивлячись на досить точні апроксимації, все ж таки існує дві межі - різні для різних значень a/b - при наближенні до яких точність істотно погіршується: один з них - межа аналізу, він обумовлений суттю прийнятих попередніх припущень; інший - межа точності, за яким достовірний опис розповсюдження ПАХ в зігнутому хвилеводі неможливий без оцінки нового параметра - радіусу хвилевода

$$R = \frac{V_{sa}}{V} \left(1 - \frac{1}{4a^2 \xi} \right) \cong \frac{V_{sa}}{V}$$

де $V_s = c$ - швидкість релеєвської хвилі на вільній поверхні, фазова швидкість ПАХ в хвилеводі. Якщо R достатньо великий за зовнішнім радіусом, що окреслює хвилевод, то дані аналізу будуть задовільні; при наближенні R до $a+b$ або, у гіршому разі, $R = a+b$, не можна точно сказати, які умови проходження хвиль, бо в цьому випадку спостерігається сильне випромінювання енергії пружної хвилі в зовнішню область (аргумент функції Бесселя $\frac{\omega r}{c} = \frac{\omega R}{c}$), що вимагає проведення оцінки витоку, а задача ця вельми непроста. Тому параметри матеріалів повинні бути такі, щоб дисперсійна крива була в рівній мірі віддалена від кривих, що визначають межі точності і аналізу [6].

Приведений наступний порядок визначення радіусу заокруглення хвилеводу. По аналогії з хвилеводами електромагнітних хвиль можна розширити область застосування рішення для прямолінійних хвилеводів на випадок достатньо слабкої кривизни звукопровода. Якщо напівширина

звукового пучка рівна Y_m , то для радіусів заокруглення $R \gg Y_m$ рішення поблизу смужки хвилеводу можна вважати таким же, як і для прямолінійного випадку. Y_m визначається як відстань від осі пучка, на якому амплітуда хвиль в m раз менше максимального значення.

При цьому має місце співвідношення:

$$Y_m = y_0 + \frac{\ln(m \cos(\alpha y_0))}{\alpha g(\alpha y_0)}$$

де, y_0 - напівширина звукопровода, $\alpha = \alpha(h, y_0)$. Приблизно значення мінімального радіусу заокруглення можна визначити таким чином

$$R_0(h, y_0) \cong 10Y_m(h, y_0)$$

При фіксованому значенні h величини Y_m і R_0 залежно від y_0 змінюються в суттєвих межах.

$Y_m(R_0) \rightarrow \infty$ як при $y_0 \rightarrow 0$ так і при $y_0 \rightarrow \infty$: тому існує деяке оптимальне значення при якому Y_m мінімальне. Значення це приблизно рівне $3 \cdot 10^{-3}$ см. Очевидно і те, що для різних матеріалів різні і значення y_0 .

Песимістичні прогнози виказані авторами відносно вигину щілевих хвилеводів в традиційній структурі Al/T40, де необхідні відношення $\frac{R_0}{y_0} = \frac{a}{b} = 1200$; хоча і не виключена можливість підбору іншої пари матеріалів,

що дозволяють знизити цей стан.

Використання поверхневих акустичних хвилеводів ускладнюється з наступних причин:

1. Реальні хвилеводи володіють значною дисперсією і втратами.
2. Хвилеводи не допускають ефективного збудження.

Питання дисперсії нами вже було розглянуте. Що ж до другої з названих причин, то основною складністю створення режиму хвиль, що

біжать, в хвилеводі ПАХ є збудження вузьких плівкових шарових структур перетворювачами з апертурою, що в десятки разів перевершує ширину хвилеводу. Тому виникає задача створення перехідної області, що погоджує, призначенням якої є стиснення звукового пучка на вході хвилеводу[6].

1.5 Властивості хвилеводів:

У хвилеводах, як в системах з розподіленими параметрами, можливе існування в ньому дискретного (при не дуже сильному поглинанні) набору (ансамблю) типів коливань (мод), кожен тип коливань поширюється зі своїми фазовими і груповими швидкостями. Всі моди мають дисперсією, тобто їх фазові швидкості залежать від частоти і відрізняються від групових швидкостей.

У екранованому хвилеводі фазові швидкості зазвичай перевищують швидкість поширення плоскої однорідної хвилі в заповнює середовищі (швидкість світла, швидкість звуку), ці хвилі називаються швидкими. При неповному екрануванні вони можуть проникати крізь стінки хвилеводу, переізнучаясь в навколишній простір. У відкритих хвилеводах, як правило, поширюються повільні хвилі, амплітуди яких швидко зменшуються при віддаленні від направляючого каналу. Кожна мода характеризується граничною частотою, яка називається критичною[7].

1.6 Опис резонаторів на ПАХ

Резонатори на ПАХ досить успішно зарекомендували себе в якості елемента стабілізації частоти генератора для малопотужних передавальних пристроїв. Такі пристрої, завдяки технічним можливостям резонаторів ПАХ, знайшли досить широке застосування в радіотехнічних системах малого радіусу дії.

Переваги резонаторів на ПАХ:

- низький рівень фазових шумів, що забезпечує виключно високу чистоту спектра генерованого сигналу;
- висока добротність;
- відносно високий рівень допустимої потужності, що розсіюється;
- висока стійкість до зовнішніх механічних впливів;
- малі розміри;
- висока відтворюваність еквівалентних параметрів;
- різноманітність типів і конструкцій;
- низька ціна.

Основою резонатора ПАХ є кварцева пластина, вирізана з монокристала кварцу. Орієнтація пластини щодо осей монокристала утворює зріз.

На поверхню кварцевої пластини нанесений тонкий шар металу. Найчастіше використовується алюміній. У металі з використанням фотолітографії сформована структура резонатора, що складається з одного або двох перетворювачів на зустрічних штирях (ЗШП) та двох відбивних решіток. Електричний високочастотний сигнал за допомогою перетворювачів створить на поверхні кварцу механічні (акустичні) коливання, що поширюються в вигляді хвилі.

Швидкість ПАХ в кварці в 100 000 разів менше швидкості електромагнітної хвилі. Повільне поширення акустичної хвилі є основою

мініатюризації приладів ПАХ. Максимальна ефективність перетворення досягається на частоті синхронізму, тобто на такій частоті підводиться електричний сигнал, коли довжина хвилі акустичних коливань збігається з просторовим періодом електродів перетворювача.

Низький рівень фазових шумів, а значить і чистота спектру стабілізуючого сигналу генераторів на резонаторах ПАХ, перевершує всі інші відомі технічні рішення, за винятком кріогенної техніки. Багаторічні дослідження механізмів виникнення фазових шумів в приладах ПАХ дозволили оптимізувати конструкцію і технологію виготовлення резонатора.

1.7 Характеристика фільтрів на ПАХ

Фільтруючі пристрої – невід'ємна частина практично будь-якої складної радіоелектронної системи. У залежності від частотного діапазону вони будуються на базі дискретних або розподілених компонентах.

Фільтри на ПАХ мають комерційне застосування на частотах від 30 МГц до 3 ГГц. На низьких частотах габарити фільтрів стають занадто великими, тому замість них знаходять застосування монолітні фільтри на об'ємних хвилях, виконані з п'єзоелектричної кераміки. На частотах вище 3 ГГц роздільна здатність фотолітографічного процесу не дозволяє отримати високий відсоток виходу придатних виробів, і ціна таких фільтрів стає неконкурентною порівняно з іншими рішеннями. На високих частотах застосовуються електромагнітні фільтри, виконані з кераміки.

Більшість переваг ПАХ-пристроїв обумовлено безпосередньо їх фізичною структурою: малою вагою і габаритами; лінійної (або визначається вимогами) фазою; фактором форми, що наближається до одиниці (дуже висока прямоугільність); температурною стабільністю. Оскільки центральна частота і форма частотної характеристики визначаються топологією, вони не

вимагають складної настройки в апаратурі і немає необхідності турбуватися за них в процесі експлуатації. Технологія виготовлення, сумісна з напівпровідниковим виробництвом, дозволяє випускати їх в великому обсязі з високою відтворюваністю.

Для реалізації фільтрів на поверхневих хвилях використовуються п'єзоелектрики, подібні кварцовою платівці. Однак кварц рідко використовується для їх виготовлення. Зазвичай застосовується титанат барію або ніобат літію. Відмінність в роботі ПАХ фільтрів від кварцових або п'єзокерамічних полягає в тому, що використовується не об'ємне коливання п'єзоелектрика, а хвиля, що розповсюджується по поверхні. Для того, щоб не виникало об'ємних хвиль, які можуть спотворити АЧХ, приймаються спеціальні конструктивні заходи.

Із застосуванням ПАХ резонаторів реалізуються фільтри, подібні звичайним кварцовим фільтрам. За таким принципом зазвичай реалізуються вузькосмугові смугові фільтри. Їх принцип роботи заснований на добре відомих фільтрах Баттерворта і Чебишева. Втрати в смузі пропускання при цьому визначаються добротністю резонаторів і можуть бути 2 ... 3 дБ, що дозволяє використовувати цей вид ПАХ-фільтрів у вхідних каскадах приймачів і вихідних каскадах передавачів. [8]

Основними елементами акустичного тракту пристроїв на ПАХ є вхідний і вихідний перетворювачі і п'єзоелектричний звукопровід (підкладка) між ними. Характеристики пристроїв на ПАХ формуються за рахунок частотно-залежного перетворення електричного сигналу в акустичну хвилю вхідним перетворювачем і акустичної хвилі в електричний сигнал вихідним перетворювачем. Швидкість ПАХ становить 3-4 км/сек, тобто на 4 порядки менше швидкості електромагнітної хвилі. Цим обумовлені габарити

пристроїв на ПАХ, менші на 2-3 порядки в порівнянні з електромагнітними аналогами[8].

1.8 Матеріали для пристроїв на ПАХ

В приладах на ПАХ використовуються монокристали, п'єзокераміка і шаруваті системи, що являють собою комбінацію із неп'єзоелектричної підкладки і п'єзоплівки, які призначені для збудження і прийому ПАХ. Шаруваті системи у вигляді п'єзопідкладки і діелектричної плівки дозволяють реалізовувати перетворювачі з підвищеною температурною стабільністю.

В традиційному застосуванні ПАХ матеріали повинні мати: малі акустичні втрати; велику ефективність електромеханічного перетворювача; високу температурну стабільність, низьку швидкість поширення ПАХ, яка досягається при відповідній товщині плівки.

На практиці найбільш широке застосування отримали п'єзокварц, ніобат і танталат літію, германат вісмуту, берлініт, плівки нітриду алюмінію, оксид цинку, сульфід кадмію. Перспективним вважається використання у якості матеріалів підкладки – звукопроводів для ПАХ монокристалічного кремнію, у якого технологія формування досягла в останні роки високого рівня. В цьому випадку для збудження ПАХ застосовують п'єзоелектричні плівки ZnO[9].

Висновки

На сьогоднішній день пристрої на ПАХ широко застосовуються при створенні електронних систем обробки інформації і вимірювальної техніки: лінії затримки, фільтри, генератори, сенсори фізичних величин.

Технологія пристроїв ПАХ в значній мірі базується на прогресивних прийомах, що застосовуються у виробництві виробів мікроелектроніки із застосуванням процесів фотолітографії, групових процесів планарної обробки підкладок і т. д. Це створює передумови для масового виробництва високоякісних перетворювачів.

Пристрої на поверхневих акустичних хвилях надзвичайно універсальні, комерційний потенціал яких постійно зростає. Вони конкурентноздатні за ціною, міцні, чутливі та надійні.

Більшість переваг ПАХ-пристроїв обумовлено безпосередньо їх фізичною структурою: малою вагою і габаритами; лінійної (або визначається вимогами) фазою; фактором форми, що наближається до одиниці (дуже висока прямокутність); температурною стабільністю. Оскільки центральна частота і форма частотної характеристики визначаються топологією, вони не вимагають складної настройки в апаратурі і немає необхідності турбуватися за них в процесі експлуатації. Технологія виготовлення, сумісна з напівпровідниковим виробництвом, дозволяє випускати їх в великому обсязі з високою відтворюваністю.

Основною перевагою ПАХ є доступність хвильового фронту, що дозволяє знімати сигнал і управляти розповсюдженням хвилі в будь-яких точках звукопровода, а також управляти характеристиками цих пристроїв і створювати численні пристрої з різними функціями.

2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Моделювання плівкового ПАХ-модуля

Для створення ПАХ хвильоводів, доцільно застосувати плівковий хвилевід на базі п'єзoeлектричної плівки ZnO на підкладці із плавленого кварцу $SiO_{2пл.}$, поперечний переріз якого представлений на рис. 2.1, технологічний процес виготовлення якого достатньо відпрацьований і який дозволяє розміщувати на одній підкладці як акустoeлектричний модуль, так і електронні блоки, необхідні для створення та оброблення інформаційних сигналів.

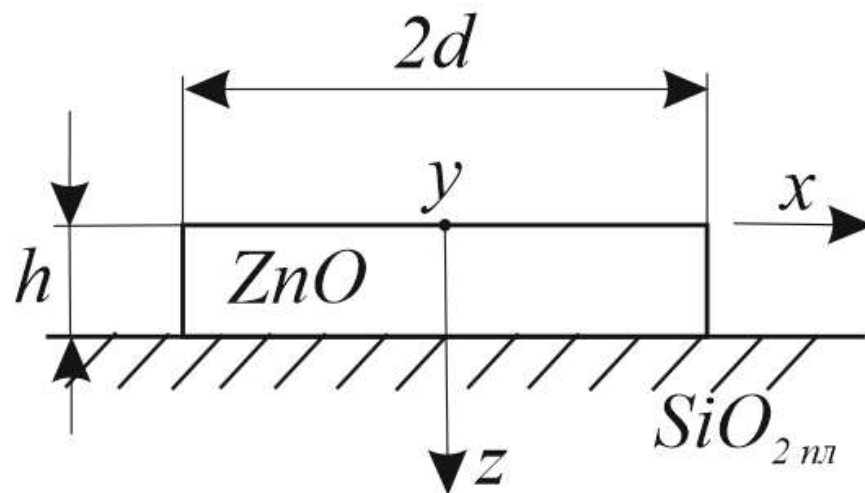


Рис.2.1. Поперечний переріз ПАХ-хвильоводу

Направлене поширення ПАХ в плівковому хвильоводі, на відміну від розповсюдження в необмеженому середовищі, характеризується дисперсією фазової швидкості хвилі, що виникає в результаті впливу багаторазових відбиттів хвилі на границях хвильоводу. При цьому може спостерігатися багатомодовий процес поширення ПАХ, при якому кожна мода має свою фазову швидкість та критичну частоту. Це буде призводити до виникнення додаткових фазових зсувів у вихідному сигналі ПАХ-приймача, що внесе похибку у результати вимірювання. Тому, розробка та дослідження математичних моделей, що дозволяють обґрунтувати конструктивні параметри хвилевідних структур для забезпечення одномодового режиму, є важливим завданням при створенні пристроїв на ПАХ.

Дисперсійне рівняння для ПАХ-хвильоводу, що пов'язує геометричні розміри хвильоводу, параметри плівки, частоту (довжину хвилі) поверхневої акустичної хвилі, можна представити у вигляді:

$$\frac{2\pi h G}{\lambda V_S} \sqrt{V^2 - V_S^2} = m \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{V_S}{V_R} \sqrt{\frac{V_R^2 - V^2}{V^2 - V_S^2}}, \quad (2.1)$$

де V – фазова швидкість ПАХ у хвильоводі; V_R – швидкість релеївських хвиль на підкладці; V_S – швидкість ПАХ на необмеженій плівковій структурі; $G = d/h$; $2d$ – ширина та h – товщина плівкового покриття; λ – довжина ПАХ; $m = 0, 1, 2, \dots$ – номер моди хвильоводу ПАХ.

Дисперсійне рівняння (1) при $m = 0$ описує поширення найнижчої симетричної (фундаментальної) моди в плівковому хвильоводі шириною $2d$ і висотою h .

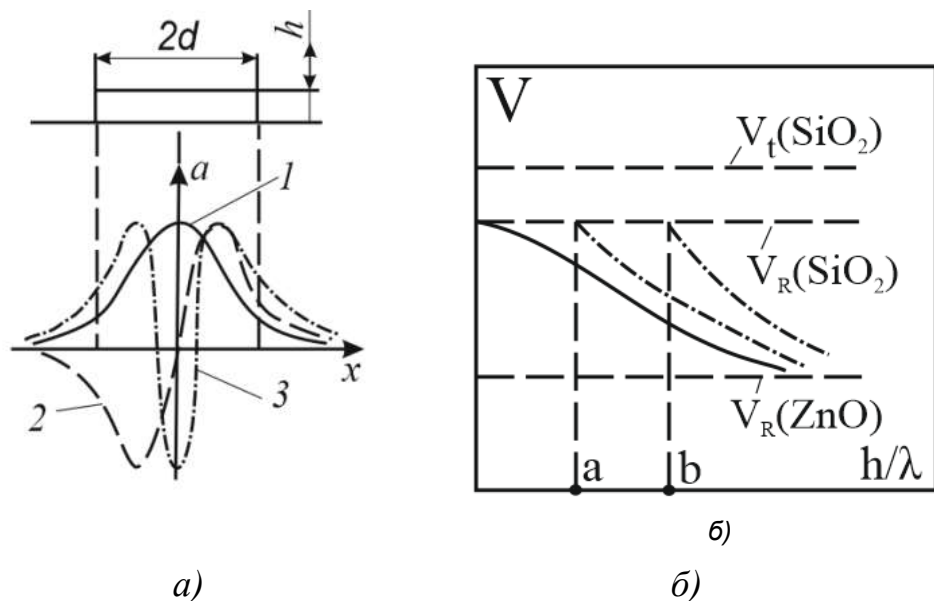


Рис.2.2. Профілі механічних зміщень (а) та дисперсійні характеристики (б) для перших трьох мод хвильоводу ПАХ

На рис.3 зображені профілі нижчих мод хвильоводу $a(x)$ та дисперсійні характеристики $V(h/\lambda)$. Наступними типами коливань у ПАХ-хвильоводі є вищі моди, які можуть поширюватися при $h/\lambda \geq a$ та $h/\lambda \geq b$ і т.д. В інтервалі значень $h/\lambda = 0 \dots a$ відбувається одномодовий режим поширення

поверхневих акустичних хвиль у вигляді фундаментальної моди. Фазова швидкість коливань нижчої антисиметричної моди не може перевищувати швидкість релеївських хвиль на підкладці, тому що в протилежному випадку ПАХ переходить в об'ємну хвилю і пружна енергія більше не концентрується у поверхні. Так, наприклад, обравши частоту генератора f при відповідній V_s , можна змінювати (в розумних межах) товщину і ширину хвилевідної плівки. Значення d і h обмежені практичними і технологічними міркуваннями: надмірне збільшення ширини хвилеводу при незмінній частоті веде до проявлення багатомодовості на все більш нижчих частотах; зменшення ширини ускладнює проблему узгодження хвилеводу з джерелом хвиль, потребує зменшення апертури ЗШП і знижує ефективність збудження і приймання ПАХ. Аналогічно, збільшення товщини хвилевідної плівки h хоч і бажано з точки зору ефективності перетворень, але обмежено можливостями технології, зокрема, через злучення плівки та слабкої адгезії. Зменшення товщини h негативно позначається на хвилевідному ефекті, знижує концентрацію пружної енергії у плівці. Для багатьох типів хвилеводів, до яких в першу чергу відносяться і плівкові, ширину хвилевідного тракту вибирають близько $(2,0...3,5)\lambda$.

Для моделювання хвилеводу і концентратора ПАХ з метою оптимізації конструктивних параметрів нами була використана експериментальна залежність фазової швидкості ПАХ в необмеженій плівковій структурі $ZnO-SiO_{2nl.}$, апроксимацією якої отримана аналітична залежність фазової швидкості ПАХ V_s у вигляді:

$$V_s = V_R \exp \left[-1,412h/\lambda + 1,811(h/\lambda)^2 \right], \quad (2.2)$$

де $V_R = 3400$ м/с – швидкість релеївських хвиль на підкладці $SiO_{2nl.}$.

Ця залежність представлена на рис.4 (графік 1).

Це дозволило представити дисперсійне рівняння для ПАХ-хвиеводу (2.1) у вигляді:

$$2\pi G \frac{h}{\lambda} \sqrt{\beta^2 - 1} = m \frac{\pi}{2} + \arctg \sqrt{\frac{V_R^2 - \beta^2 V_S^2}{V_R^2 (\beta^2 - 1)}}, \quad (2.3)$$

де $\beta = V/V_S$.

Для кожного значення h/λ знаходиться із рівняння (2.2) швидкість ПАХ на необмеженій плівковій структурі V_S , яке в подальшому використовується для знаходження коренів β трансцендентного рівняння (2.3) при заданих значеннях G і λ , що дозволяє отримати дисперсійні залежності фазової швидкості ПАХ для найнижчої симетричної (фундаментальної) моди при $m=0$ та вищих мод при $m=1, 2, \dots$

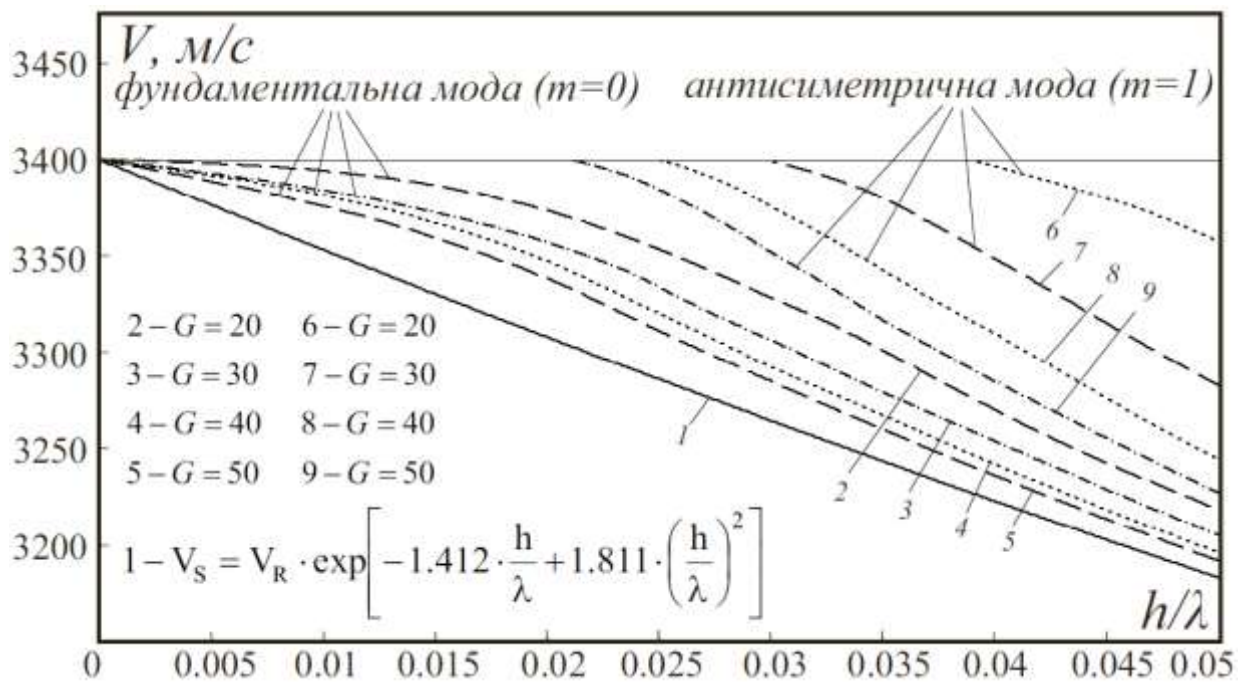


Рис. 2.3. Залежності фазової швидкості ПАХ у хвиеводі V від нормованої товщини плівки ZnO

На рис.2.3 зображено результати теоретичних розрахунків визначення швидкості ПАХ у хвиеводі для симетричної моди (криві 2...5) і першої антисиметричної моди (криві 6...9) в залежності від нормованої товщини плівки ZnO h/λ при різних значеннях нормованої ширини хвиеводу $G = d/h$.

По мірі збільшення G дисперсійна характеристика фазової швидкості ПАХ у хвилеводі приближається до характеристики фазової швидкості хвилі на безмежній плівковій структурі (крива 1). Однак, при цьому зменшується інтервал можливих значень нормованої товщини плівки, при яких буде забезпечуватися одномодовий режим поширення ПАХ у хвилеводі.

Приймаючи для першої антисиметричної моди ($m=1$) граничне значення фазової швидкості ПАХ $V = V_R$, із рівняння (2.3) отримаємо умови для забезпечення поширення у хвилеводі фундаментальної моди поверхневих акустичних хвиль:

$$G_{кр} \leq \left\{ \frac{4h}{\lambda} \sqrt{\exp \left[2,824 \left(\frac{h}{\lambda} \right) - 3,622 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 \right] - 1} \right\}^{-1}; \quad (2.4)$$

$$2d_{кр} \leq \lambda \left\{ 2 \sqrt{\exp \left[2,824 \left(\frac{h}{\lambda} \right) - 3,622 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 \right] - 1} \right\}^{-1}. \quad (2.5)$$

На рис.2.4 представлено залежності для $G_{кр}$ та $2d_{кр}$ від нормованої товщини плівки h/λ при різних значеннях довжини ПАХ.

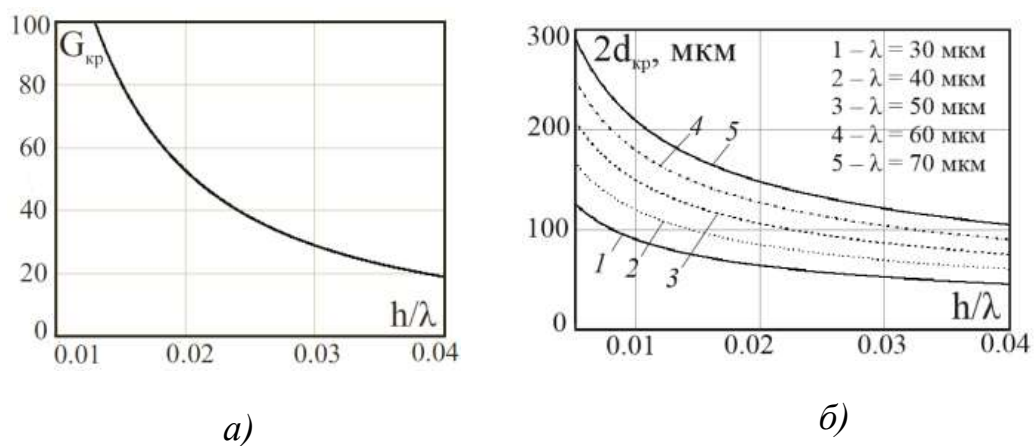


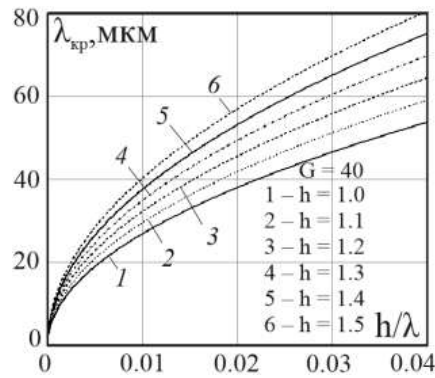
Рис. 2.4. Залежності критичних значень параметрів $G_{кр}$ (а) та $2d_{кр}$ (б) від нормованої товщини плівки h/λ

Із рівняння (2.3) також отримуємо співвідношення для критичних значень довжини ПАХ $\lambda_{кр}$ та частоти $f_{кр}$:

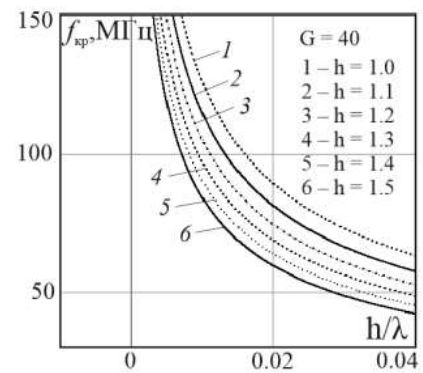
$$\lambda_{кр} \geq 4Gh \sqrt{\exp \left[2,824 \left(\frac{h}{\lambda} \right) - 3,622 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 \right] - 1}; \quad (2.6)$$

$$f_{кр} \leq V_R \left\{ 4Gh \sqrt{\exp \left[2,824 \left(\frac{h}{\lambda} \right) - 3,622 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 \right] - 1} \right\}^{-1}. \quad (2.7)$$

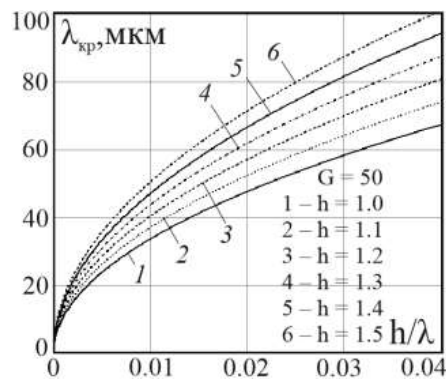
Ці залежності представлено на рис.6 для різних конструктивних параметрів хвилеводу.



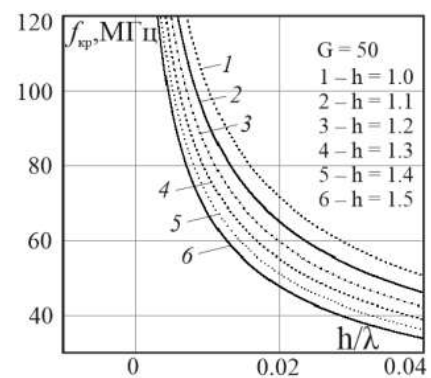
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.5. Залежності критичних значень довжини хвилі $\lambda_{кр}$ та частоти $f_{кр}$ від нормованої товщини плівки h/λ

Із рис. 2.4 та 2.5 випливає, що зменшення параметра G дозволяє розширювати область значень h/λ , при яких забезпечується одномодовий режим поширення ПАХ. При цьому вища мода коливань виникає на більш високих частотах.

При проектуванні ВП на ПАХ на основі хвильовідних структур необхідно також забезпечити ефективне збудження поверхневих акустичних хвиль у хвильоводі, для чого були досліджені методи передачі максимальної акустичної потужності від джерела у хвильовід і від хвильоводу у навантаження. Задачу узгодження апертури ЗШП з апертурою хвильоводу в пристроях на поверхневих акустичних хвилях виконують концентратори ПАХ: малоапертурний ЗШП; рупорний концентратор; ЗШП концентричної форми; призматичний концентратор; багатосмушковий відгалужувач.

При створенні лінійних, а особливо кутових переміщень, в широкому динамічному діапазоні необхідно забезпечувати надійний захист від прямого проходження сигналу від вхідного ЗШП на рухомий приймач ПАХ. Тому, у ВП лінійних та кутових переміщень з використанням хвильоводів на базі плівкової структури $ZnO-SiO_{2пл.}$ доцільно застосувати рупорний концентратор ПАХ (рис.2.6), який є продовженням хвильоводу і виготовляється з ним в одному технологічному процесі.

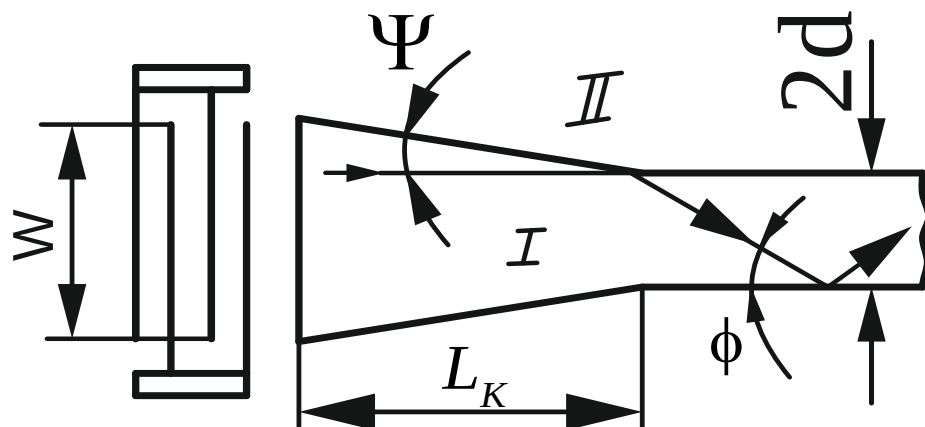


Рис. 2.6. Геометрія рупорного концентратора ПАХ

Для розрахунку рупорного концентратора застосовується оптична аналогія. Акустична хвиля, що падає на стінку рупора під кутом ψ , після відбиття попадає у хвилевід під кутом ϕ . Критичний кут повного внутрішнього відбиття акустичного пучка визначається співвідношенням:

$$\phi_{kp} = \arccos(V/V_{II}), \quad (2.8)$$

де V та V_{II} – відповідно фазові швидкості ПАХ в області хвилеводу і підкладки.

При $\phi \leq \phi_{kp}$ відбувається повне внутрішнє відбиття пучка у хвилеводі. Із геометрії випливає, що $\phi = 2\psi$, то під кутами $\phi < \phi_{kp}$ у хвилевід попадуть лише промені, які здійснюють лише одне відбиття у рупорі.

Довжина рупорного концентратора L_k визначається із його геометрії:

$$L_k = 0,5(W - 2d) \operatorname{ctg} \psi. \quad (2.9)$$

Використовуючи співвідношення (2.8) для критичного значення кута повного внутрішнього відбиття акустичного пучка від бічних стінок хвилеводу ϕ_{kp} та розраховані залежності (рис. 2.2) для фазової швидкості у хвилеводі, можна отримати залежності ϕ_{kp} від нормованої товщини плівки ZnO h/λ , що у подальшому дозволяє отримати, використовуючи формулу (2.9), залежність критичного значення апертури зустрічно-штирового перетворювача від довжини концентратора L_k та параметрів хвилеводу G та h :

$$W_{kp} = 2L_k \operatorname{tg}(0,5\phi_{kp}) + 2hG. \quad (2.10)$$

На рис.2.7 і 2.8 представлено результати розрахунків критичних значень кута ϕ_{kp} та апертури зустрічно-штирового перетворювача W_{kp} від нормованої товщини плівки h/λ при фазовій швидкості ПАХ на необмеженій поверхні підкладки SiO_{2nl} . $V_{II} = 3400$ м/с та залежностей для фазової швидкості у хвилеводі V , представлених на рис.2.3 (криві 2...5) [10].

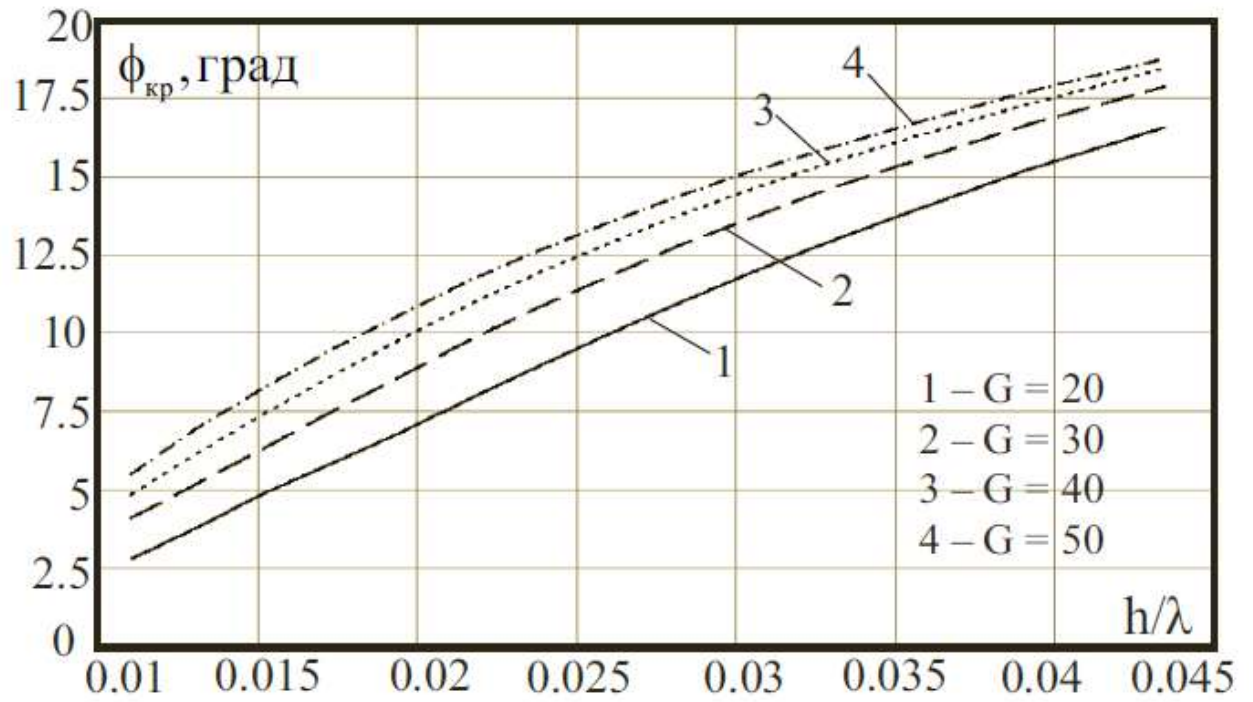


Рис.2.7. Залежності критичного кута $\phi_{кр}$ від нормованої товщини плівки h/λ

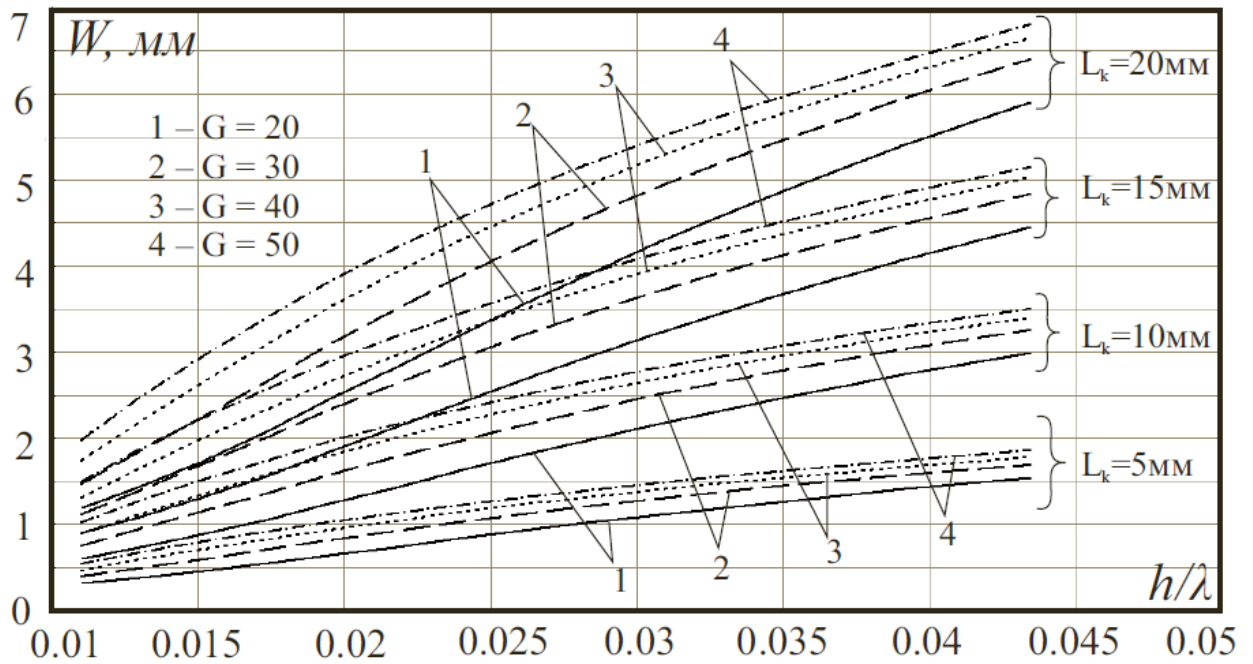


Рис. 2.8. Залежності критичного значення апертури ЗШП $W_{кр}$ від нормованої товщини плівки h/λ .

2.2 Моделювання пов'язаних плівкових ПАХ-хвильоводів

На рис. 2.9 зображено схему двох слабо пов'язаних ПАХ хвильоводів на підкладці. Зв'язок між ними описується коефіцієнтом розподілу k , який характеризує розподіл енергії сигналу при переході ПАХ з першого хвильоводу в другий. Коефіцієнт розподілу залежить від відстані між хвильоводами ($2c$) [5-6] і ця відстань має бути меншою або дорівнювати відстані від А до В. Відстань від А до В називається довжиною зв'язку (довжиною муфти).

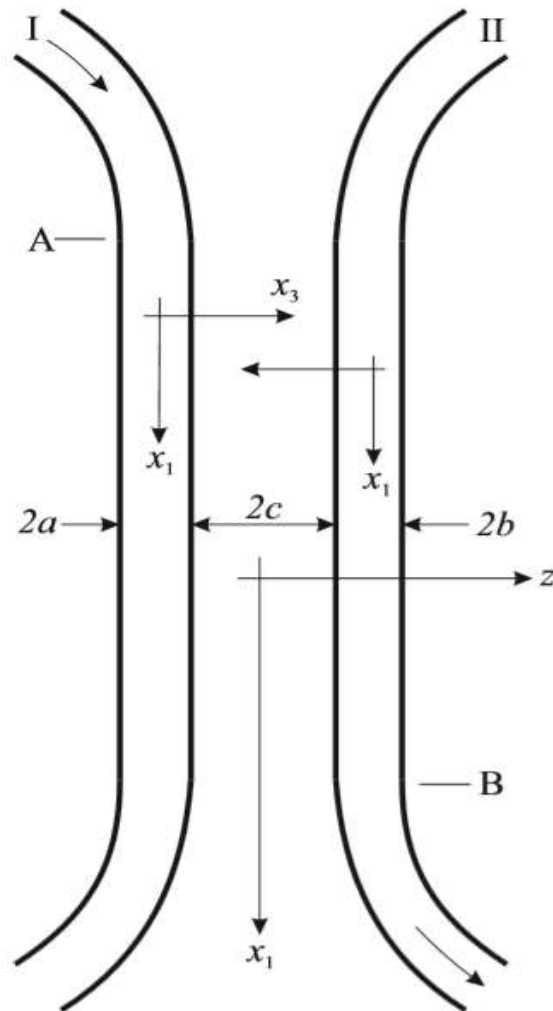


Рис.2.9. Схема двох слабо пов'язаних ПАХ хвильоводів на підкладці

Якщо, зв'язок між двома хвильоводами слабкий то зв'язок між ними можна описати через суму нижчих симетричних і антисиметричних мод по відношенню до центральної лінії між двома смужками. У цих умовах ми можемо написати

$$\begin{aligned} w &\approx w^a + w^A, & z < 0, \\ w &\approx w^a - w^A, & z > 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

де w^a і w^A є рішення, які, відповідно, симетричні і антисиметричні по відношенню до центральної лінії між смугами.

Очевидно w^a і w^A , відповідно, пропорційні $\cos(h\eta z)$ і $\sin(h\eta z)$ в залежності від області між смугами.

Ми можемо написати:

$$\begin{aligned} w &\approx F(x_3)[\cos \xi_a(x_1 - Vt) + \cos \xi_A(x_1 - Vt)]; & x_3 < d + c; \\ w &\approx F(y)[\cos \xi_a(x_1 - Vt) - \cos \xi_A(x_1 - Vt)]; & y < d + c, \end{aligned} \quad (2.12)$$

де F представляє собою функціональну залежність по відношенню до центральної лінії кожної смужки обох симетричних і антисиметричних мод по відношенню до центральної лінії між смугами; ξ_A та ξ_a – коефіцієнти зв'язку між хвильоводами. Оскільки коефіцієнти зв'язку малі і $\xi_A \approx \xi_a \approx \xi$, то згідно тригонометричних тотожностей рівняння (2.12) може бути представлено:

$$\begin{aligned} w &= 2F(x_3)\cos[(\xi_A - \xi_a)/2](x_1 - Vt)\cos[(\xi_A + \xi_a)/2](x_1 - Vt), \\ x_3 &< d + c; \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} y &= 2F(y)\sin[(\xi_A - \xi_a)/2](x_1 - Vt)\sin[(\xi_A + \xi_a)/2](x_1 - Vt), \\ y &< d + c. \end{aligned}$$

Формули (2.13) ясно показують, що поширення ПАХ відбувається в напрямку хвильоводів і повне коливання відбувається за довжину λ_c , де

$$\lambda_c = 4\pi / (\xi_A - \xi_a) \quad (2.14)$$

Рівняння (2.13) також показує, що фази хвиль в двох хвилеводах відрізняються на $\pi/2$ в кожній точці.

Крім того, як наслідок слабкого зв'язку, ми маємо:

$$\xi_a = \xi - \Delta; \quad \xi_A = \xi + \Delta, \quad (2.15)$$

де Δ - величина малої зміни хвильового числа від одного з хвилеводів від нижчого симетричного або антисиметричного режимів двох хвилевідних структур з тією ж фазовою швидкістю.

З (2.14), (2.15) і відношення між ними знаходимо, що довжина зв'язку L_C дорівнює:

$$L_c = [\xi \pi \exp(2\eta c) / m V_\delta^2 \eta_1 \cos^2(\bar{\eta} d)] \{ [m(V^2 - V_\delta^2) / \eta] \cos(2\bar{\eta} d) + \bar{m}(V^2 - \bar{V}_\delta^2)(d + \sin(2\bar{\eta} d) / 2\bar{\eta}) \}, \quad (2.16)$$

де

$$\begin{aligned} \bar{\eta} &= \xi \sqrt{[(V^2 / \bar{V}_\delta^2) - 1]}; \\ \eta &= \xi \sqrt{[1 - (V^2 / \bar{V}_\delta^2)]}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Вираз для L_C в (2.16) можна представити в безрозмірному вигляді:

$$\begin{aligned} L_c / 2h &= \pi q_\delta r_m \exp(xs) \cdot \\ &\cdot [(q^2 - \bar{q}_\delta^2 / (q_\delta^2 - q^2)^{1/2}] \cdot \\ &\cdot [G / \cos^2(\bar{x}G)], \end{aligned} \quad (2.18)$$

де $G = d/h$ - нормована ширина хвилеводу; $q = V / V_\delta$; $q_\delta = V_\delta / V$.

Розрахунки довжини ділянки зв'язку можна записати в дещо іншій і, можливо, більш прозорій формі [9]:

$$\begin{aligned} L_c / 2h &= (\pi / r_m) \exp(\bar{x}s) q_\delta^2 (1 / \psi) \cdot \\ &\cdot (x / \bar{x}) [xG / \cos^2(xG)], \end{aligned} \quad (2.19)$$

де $s = c / h$.

Розрахунки довжини ділянки зв'язку $L_c / 2h$ проведені для плівкового хвилеводу на базі п'єзоелектричної плівки ZnO на підкладці із плавленого кварцу SiO₂пл при ширині хвилеводу $2d = 200$ мкм, висоті $h = 1$ мкм та швидкості поверхневої акустичної хвилі $V = 3400$ м/с (рис. 2.3).

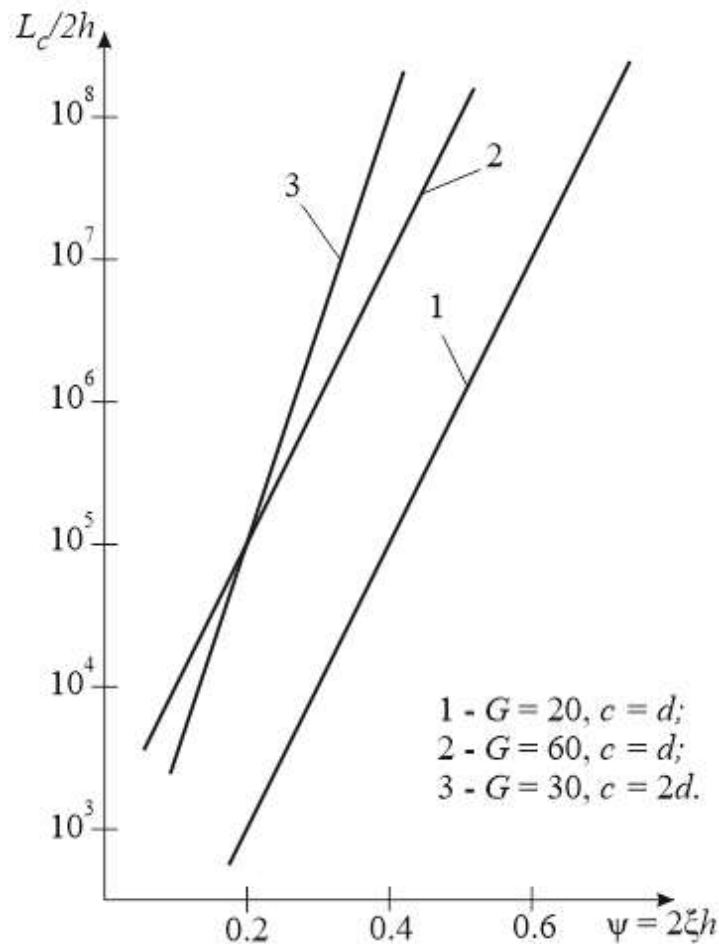


Рис. 2.10. Залежності довжини ділянки зв'язку двох слабо пов'язаних хвилеводів від хвильового числа

Причиною такої поведінки є те, що сила зв'язку між сусідніми хвилеводами з фіксованою відстанню один від одного помітно зменшується зі зменшенням довжини хвилі. Така поведінка може поставити серйозні обмеження на використання двох слабо пов'язаних хвилеводів в практичних пристроях[11].

2.2. Моделювання кільцевого ПАХ-резонатора

На рис. 2.11 зображена топологічна модель смугового фільтра, яка містить кільцевий ПАХ-резонатор та два ПАХ-хвильоводи, що пов'язані з кільцевим резонатором у протилежних точках [5]. Зв'язок між резонатором та хвильоводами описується коефіцієнтами розподілу, які характеризують розподіл енергії сигналу у спрямованому відгалужувачі, утвореному в місці зближення кільцевого резонатора і хвильоводів.

Вхідним є плече 1, вихідним – плече 4, плечі 2 і 3 працюють на узгоджене навантаження. Коефіцієнти розподілу в площинах $0-0'$ і $I-I'$ позначимо відповідно k_1 і k_2 . Вони залежать від відстані між КР і пов'язаними з ним хвильоводами. Кільцевий резонатор характеризується параметрами: α – погонні інтегральні втрати; l – ефективна довжина резонатора, причому $l = \pi(r + R)$, де r і R – відповідно внутрішній і зовнішній радіус кільцевого резонатора.

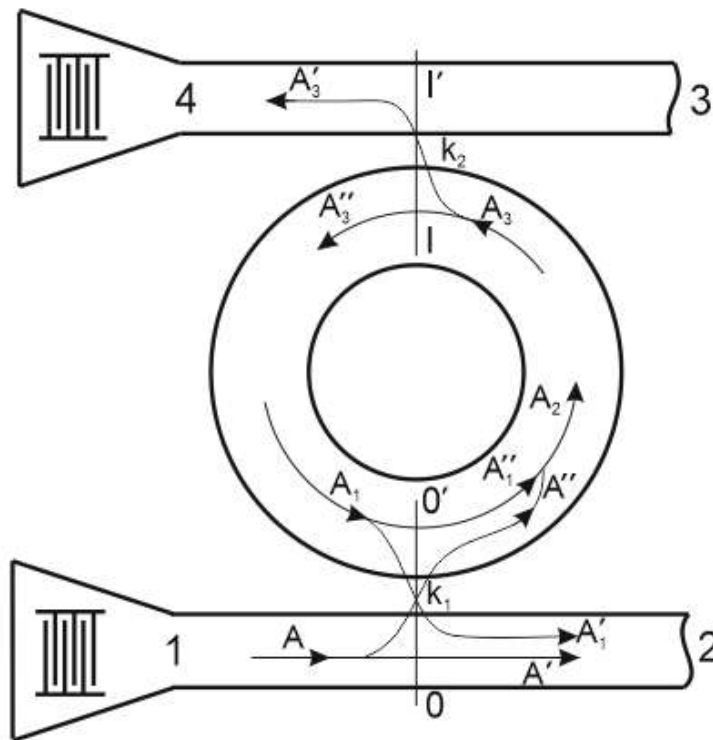


Рис. 2.11. Топологічна модель смугового фільтра на основі кільцевого ПАХ-резонатора

Розглянемо випадок, коли вихідні плечі пристрою працюють на узгоджене навантаження. Нехай через плече 1 до площини 0–0' надходить хвиля A з амплітудою, що дорівнює одиниці. Амплітуди всіх хвиль, що циркулюють у фільтрі, нормуються по відношенню до амплітуди хвилі A , початкову фазу хвилі A вважаємо рівною нулю.

Тоді вираз для хвилі A в площині 0–0' має вигляд $A = \sin \omega t$. При проходженні хвилею A площини 0–0' вона поділяється на хвилю A' , що поступає в напрямку плеча 2, і хвилю A'' , що відгалужується в резонатор. В площині 0–0' хвиля $A'' = k_1 \sin \omega t$ якщо вважати фазовий зсув при переході з хвилеводу в КР незначним. З іншого боку, до площини 0–0' в стаціонарному режимі по кільцевому резонатору поширюється хвиля $A_1 = A_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)$. Пройшовши площину 0–0', хвиля A_1 , розділяється на хвилі A_1' і A_1'' , що йдуть відповідно в напрямку плеча 2 і по кільцевому резонатору. Їх амплітуди визначаються з співвідношень:

$$(A_{m1})^2 = (A_{m1}')^2 + (A_{m1}'')^2; \quad (2.20)$$

$$A_{m1}' = k_1 A_{m1}. \quad (2.21)$$

Із (2.20) та (2.21) знаходимо $A_{m1}'' = A_{m1} \sqrt{1 - k_1^2}$, а фаза хвилі з амплітудою A_{m1}'' дорівнює φ_1 , (вважаємо фазовий зсув при переході з КР у хвилевід незначним).

Таким чином, по кільцевому резонатору вправо від 0–0' поширюється хвиля A_2 , що є сумою двох хвиль A_1' і A_1'' . У площині 0–0' вона описується виразом $A_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2)$, де A_{m2} і φ_2 визначаються з формул додавання двох гармонічних коливань:

$$A_{m2} = \sqrt{A_{m1}^2(1 - k_1^2) + k_1^2 + 2A_{m1}(1 - k_1^2)^{1/2} k_1 \cos \varphi_1}; \quad (2.12)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{(A_{m1} \sqrt{1 - k_1^2} \sin \varphi_1)}{A_{m1} \sqrt{1 - k_1^2} \cos \varphi_1 - k_1}. \quad (2.13)$$

Вираз для хвилі A_2 в площині I–I' з урахуванням втрат у резонаторі і фазових набігань матиме вигляд:

$$A_3 = A_{m3} \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right) \sin\left(\omega t + \varphi_2 - \frac{\omega \beta l}{V} \frac{1}{2}\right), \quad (2.24)$$

де $\beta = V/V_B$ – коефіцієнт уповільнення хвилі у резонаторі; V – швидкість ПАХ на підкладці; V_B – швидкість ПАХ у резонаторі; l – ефективна довжина кільцевого резонатора.

У площині I–I' хвиля A_3 ділиться на дві хвилі A_3' і A_3'' з амплітудами:

$$A_{m3}' = k_2 A_{m3} = k_2 A_{m3} \exp(-\alpha l / 2), \quad (2.25)$$

де $A_{m3} \exp(-\alpha l / 2)$ – амплітуда хвилі A_2 з урахуванням втрат на половині довжини кільцевого резонатора, тобто

$$A_{m3} = A_{m3} \sqrt{1 - k_2^2} = A_{m2} \sqrt{1 - k_2^2} \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right). \quad (2.26)$$

Тоді співвідношення для хвилі A_3'' має вигляд:

$$A_3'' = E_{m2} \sqrt{1 - k_2^2} \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right) \sin\left(\omega t + \varphi_2 - \frac{\omega \beta l}{2V}\right). \quad (2.27)$$

Хвиля A_3'' продовжує поширюватися у напрямку до площини 0–0' і з урахуванням втрат і фазових набігань описується виразом:

$$\begin{aligned} A_3'' \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right) \sin\left(\omega t + \varphi_2 - \frac{\omega \beta l}{2V}\right) = \\ = A_{m2} \sqrt{1 - k_2^2} \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right) \sin\left(\omega t + \varphi_2 - \frac{\omega \beta l}{2V}\right) \end{aligned} \quad (2.28)$$

У стаціонарному режимі хвиля A_3'' в площині 0–0' представляє собою хвилю:

$$A_1'' = A_{m1} \sin(\omega t + \phi_2) = A_{m2} \sqrt{1 - k_2^2} \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right) \sin\left(\omega t + \phi_2 - \frac{\omega \beta l}{2V}\right) \quad (2.29)$$

Прирівнюючи амплітуди і фази лівої і правої частин останньої рівності з урахуванням (2.22) і (2.23), при $k_1 = k_2 = k$ отримуємо систему рівнянь, з яких можна визначити A_{m1} і ϕ_1 :

$$A_{m1} = \sqrt{A_{m1}^2(1-k^2) + k^2 + 2A_{m1}\sqrt{1-k^2}k \cos \phi_1 \cdot \exp(-\alpha l)\sqrt{1-k^2}} \quad (2.30)$$

$$\phi_1 = \frac{\arctg(A_{m1}\sqrt{1-k^2} \sin \phi_1}{\left(A_{m1}\sqrt{1-k^2} \cos \phi_1 + k_1\right) - \frac{\omega \beta l}{2V}}$$

Система рівнянь (2.30) розв'язується методом послідовних наближень.

Розрахунки фільтра на основі кільцевого резонатора проводилися при коефіцієнті уповільнення $\beta = 1,03$, ефективній довжині КР $l = 0,05$ м при різних значеннях коефіцієнтів ділення k і згасання α . Результати розрахунку перехідного затухання L_{14} між плечима 1 і 4 фільтра при різних значеннях втрат в резонаторі αl і фіксованому коефіцієнті розподілу $k = k_1 = k_2 = 0,5$ представлено на рис. 2.12.

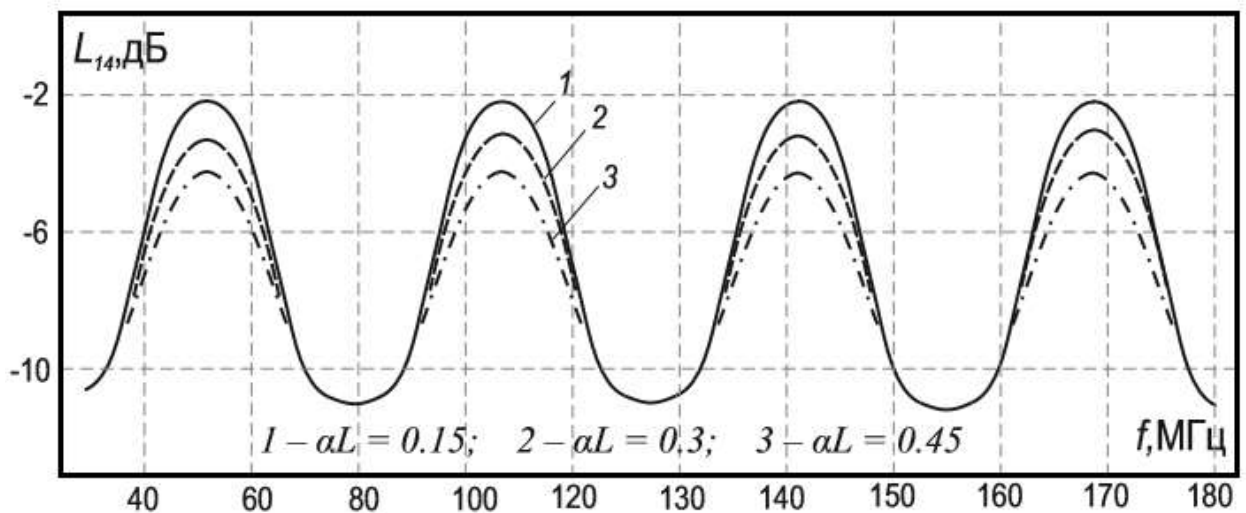


Рис. 2.12. Амплітудно-частотна характеристика кільцевого резонатора при різних параметрах αL .

Залежність L_{14} має вигляд періодичної функції частоти f з різко вираженими максимумами. Такі характеристики властиві гребінчастим фільтрам. Отриманий результат можна пояснити тим, що досліджувана конструкція подана в вигляді лінійного ланцюга з затримкою і зворотним зв'язком. Як видно, зі зменшенням втрат значно знижується загасання у смузі пропускання фільтра, в той час як в смузі загородження його рівень залишається практично незмінним і визначається в основному значенням k .

Характеристики L_{14} фільтра для різних коефіцієнтів розподілу k при фіксованих втратах $\alpha l = 0,3$ зображені на рис. 2.13.

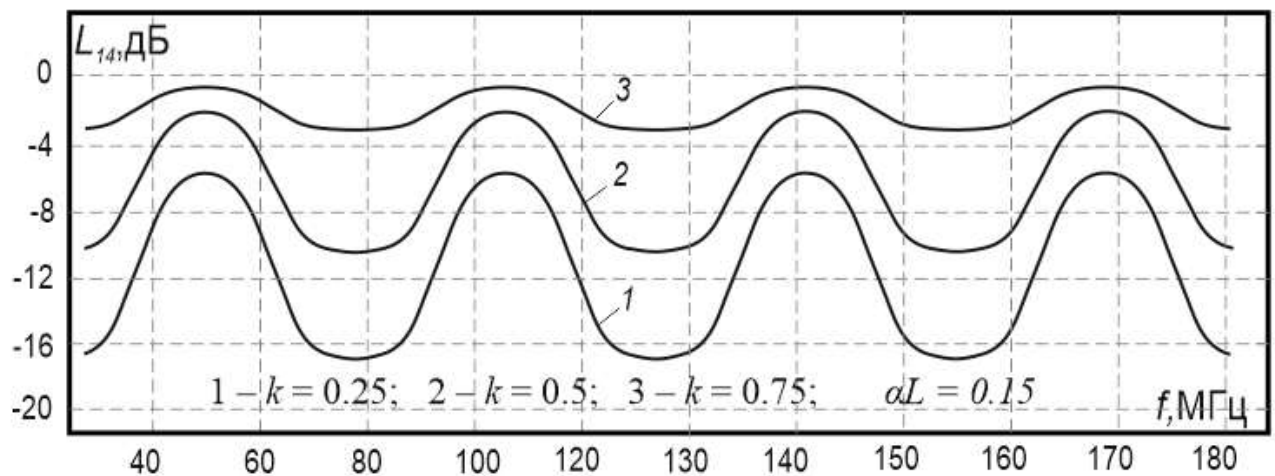


Рис. 2.13. Амплітудно-частотна характеристика кільцевого ПАХ-резонатора при різних втратах.

Як випливає з приведених графіків, зі зменшенням k збільшується перепад між значеннями загасання в смугах пропускання і загородження, що свідчить про зростання добротності кільцевого резонатора. Однак вся характеристика переміщається в область більших значень загасання, що необхідно враховувати при проектуванні фільтрів.

Можливість застосування фільтра для зсуву фази в частотних дискримінаторах систем автопідстроювання частоти показано на рис. 2.14.

На ньому з точністю до постійної складової $2\pi n$ представлено фазочастотні характеристики для одної із резонансних частот для різних значень k і αl . В області резонансної частоти характеристики мають максимальну крутизну. Зниження втрат у фільтрі і зменшення k , що ведуть до збільшення добротності кільцевого резонатора, викликають її подальше підвищення. Описану конструкцію фільтра допустимо застосовувати також у схемах побудови стабілізованих ПАХ-генераторів шляхом вибору необхідних значень k і α .

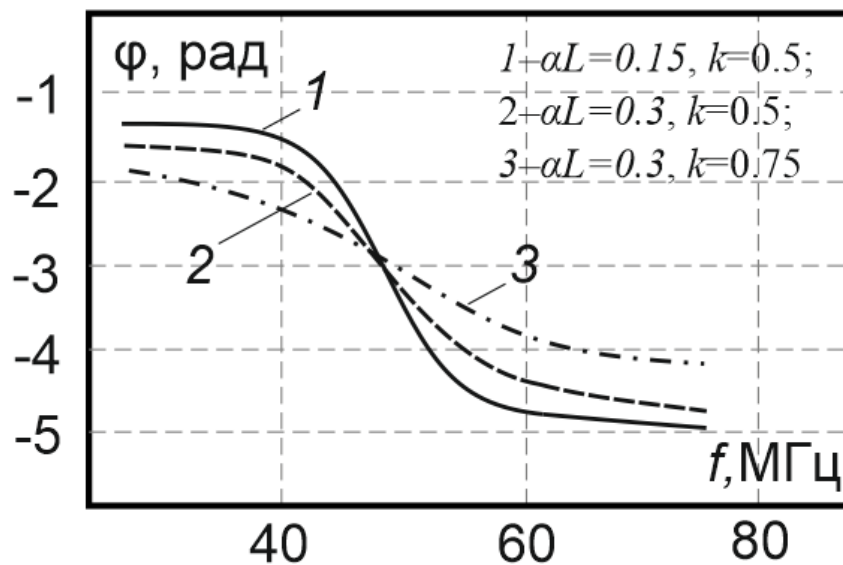


Рис. 2.14. Фазочастотні характеристики ПАХ-резонатора

Як видно з графіків, зі зменшенням k збільшується перепад між значеннями загасання в смугах пропускання і загородження, що свідчить про зростання добротності кільцевого резонатора. Однак вся характеристика переміщається в область більших значень загасання, що необхідно враховувати при проектуванні фільтрів[12].

Висновки

Переваги ПАХ-пристроїв обумовлено їх малою вагою і габаритами, температурною стабільністю, придатністю мікроелектронної технології для їх виготовлення. Оскільки центральна частота і форма частотної характеристики визначаються топологією, вони не вимагають складних налаштувань в апаратурі і мають довготривалий час безперебійного функціонування.

Використання експериментальної залежності фазової швидкості ПАХ в необмеженій плівковій структурі $ZnO-SiO_{2nl}$ та її апроксимація дозволили здійснити відповідні перетворення дисперсійного рівняння плівкового ПАХ-хвилеводу, а параметри рупорного концентратора та вхідного (вихідного) ЗШП пов'язати з параметрами хвилеводу. В результаті чисельних розрахунків отримано ряд графіків, які можуть бути використані при розробці пристроїв на ПАХ на базі хвилевідних плівкових структур.

Використання отриманих залежностей довжини зв'язку двох слабо пов'язаних хвилеводів від хвильового числа можуть бути використані при розробці пристроїв на ПАХ на базі хвилевідних плівкових структур.

В результаті чисельних розрахунків отримано ряд графіків, які можуть бути використані при проектуванні фільтрів на основі кільцевих резонаторів ПАХ.

3 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Особливості конструювання і виготовлення АРК

Розвиток елементної бази акусторадіоелектронних компонентів (АРК) показує, що перші експериментальні розробки виявлені у промисловому застосуванні за проміжок не більш, як десять років. Це зумовлено тим, що АРК властиві унікальні функціональні можливості, а також технологічна загальність процесу виготовлення АРК і ІС. Накопичений промисловістю досвід виготовлення ІС і розвитий парк технологічного обслуговування дозволив у порівняно короткі строки організувати виготовлення АРК. Однак, далеко не завжди ця спадкоємність вирішувала насущні проблеми виготовлення АРК. По мірі вдосконалення і появи нових функціональних і конструктивних модифікацій АРК виникли нові, специфічні вимоги до технологічного процесу. Разом з тим виробництво АРК пов'язано з виготовленням звукопроводів – операцією, що різко відрізняється від виготовлення підкладок ІС. Спробуємо більш детально розглянути структуру технологічного процесу виготовлення АРК, а саме його специфічні відмінності від широко відомої планарної технології ІС.

В процесі конструювання АРК однією і з головних проблем є мінімізація прямого проходження електричного сигналу. Особливо складана електромагнітна розв'язка вхідного і вихідного перетворювачів в смугових фільтрах на ПАХ, де відстань між ними, зазвичай, не перевищує 2 – 5 мм. Це накладає ряд серйозних обмежень на етапі конструювання корпусу для АРК. Виключення паразитного каналу зв'язку між перетворювачами, що створюється об'ємними хвилями, також зумовлює ряд спеціальних заходів, зокрема, рифлювання зворотної поверхні

звукопроводу[13].

Етапами створення АРК є: виготовлення звукопроводу, перетворювачів і інших елементів АРК; додаткові операції, пов'язані із зменшенням другорядних акустичних ефектів, конструкції корпусів АРК, контроль готових виробів.

Зустрічно-штирові перетворювачі, крім ПАХ, збуджують також і об'ємні акустичні хвилі, які відбиваючись від нижньої і верхньої поверхонь 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 $5 \div 15$ довжин хвиль ПАХ, глибина дорівнює половині кроку. На високих частотах (понад 100 МГц) для ефективного розсіювання об'ємних хвиль досить прошліфувати зворотну сторону підкладки грубим шліфувальним порошком.

Зустрічно-штирові структури ПАХ-пристроїв виготовляються з тонкої плівки алюмінію, нанесеної на поверхню підкладки вакуумними методами. Вибір алюмінію як матеріалу електродів обумовлений наступним: низьким питомим опором; невеликою питомою масою у порівнянні з іншими металами; освоєною технологією нанесення плівки; малою вартістю алюмінію і технологічністю процесу його нанесення; стійкістю алюмінію до впливу навколишнього середовища. Алюміній є відносно легкоплавким металом, тому для нанесення плівки можна було б використовувати метод термічного випаровування у вакуумі. Але проблема полягає в тому, що такі плівки будуть мати значні забруднення матеріалом тигля. Тому найчастіше використовуються наступні два вакуумних методи формування плівок: електронно-променеве нанесення з водоохолоджуваного тигля; магнетронне нанесення.

Адгезія плівки алюмінію до поверхні підкладки недостатня. Тому в якості адгезійного підшару використовується ванадій. Вибір ванадію обумовлений задовільними адгезійними властивостями, відносною легкістю випаровування і можливістю одночасного чи роздільного травлення з алюмінієм.

При формуванні плівок ванадію і алюмінію електронно-променевим випаровуванням потрібно забезпечити високий вакуум і відносно велику швидкість нанесення, тому що завдяки хімічній активності при підвищених парціальних тисках кисню й азоту відбувається інтенсивне утворення окислів і нітридів. Оптимальні результати для ванадію досягаються при швидкості нанесення не меншій 3 нм/с і робочому вакуумі не гірше 10^{-3} Па з обов'язковим застосуванням пасток, охолоджуваних рідким азотом. Для забезпечення задовільної адгезії плівки алюмінію товщина підшару ванадію повинна бути $10 \div 30$ нм. Оптимальна температура підкладки при нанесенні алюмінію складає 120 ± 10 °С, нагрівати її потрібно дуже повільно – не більше 2 °С/хв., швидкість осадження 10 нм/с. Товщина плівки алюмінію коливається в межах $0,08 \div 0,5$ мкм у залежності від робочої частоти пристрою на ПАХ.

При магнетронному нанесенні плівок ванадію і алюмінію вимоги до залишкового тиску у вакуумній камері й умов нагрівання підкладок – аналогічні. Процес нанесення ванадію здійснюється з відповідної мішені при тиску на рівні $0,2 \div 0,3$ Па при струмі приблизно 1 А протягом 30 с. За таких умов формується плівка товщиною 20 нм з опором 400 Ом/□. Відразу ж формується переведенням позиції на алюмінієву мішень плівка алюмінію товщиною до 0,4 мкм при струмі приблизно 3 А протягом 20 хвилин.

Для одержання достатньої адгезії і відтворюваності електрофізичних властивостей нанесених металевих плівок поверхня звукопроводу повинна бути добре очищена. Процедура очищення можна розділити на етапи попереднього й остаточного очищення. Процес очищення, наприклад ніобату

літію, можна проводити за наступною схемою: знежирення в трихлоретилені, швидкість знежирення збільшується при температурі кипіння (10 хв.); промивання в ацетоні або в етиловому спирті (10 хв.); відмивання в кислотному або в лужному розчині, підкладки варто витримувати в киплячому розчині 15 хв.; відмивання в проточній деіонізованій воді $30 \div 40$ хв. (питомий опір води $10 \div 18$ МОм); сушіння пластин у центрифугі з обдувом очищеним азотом, що знаходиться в обезпиленому скафандрі.

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 $1,5 \div 2$ см над його поверхнею протягом 45 ± 15 с[14].

Основною найскладнішою операцією при виготовленні пристроїв на ПАХ є формування електродних структур. Робочі параметри виготовлених пристроїв характеризуються такими характеристиками літографічного процесу як роздільна здатність, точність, щільність дефектів та ін. Для формування зустрічно-штирових структур ПАХ-пристроїв, що відповідають перерахованим вимогам, можна використовувати ті ж методи, що і для отримання заданої конфігурації елементів ІМС за планарною технологією: фотолітографію (із зазором, контактну, проекційну); голографію; променеву обробку (пучком іонів, променем лазера, рентгенівським пучком, растрову і проекційну обробку електронним пучком) і т.д. Порівняння показують, що електроннографія і рентгенографія хоча і забезпечують необхідну для більшості пристроїв роздільну здатність, але мають малі робочі поля, а також складніше і дорожче обладнання. Для масового виробництва технічно й економічно вигідне застосування контактної або проекційної фотолітографії.

Проблема реалізації характеристик пристроїв на ПАХ пов'язана з надійністю фотолітографічних методів, що забезпечують високу роздільну

здатність, мінімальний розкид параметрів, точність суміщення, 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 обриви електродів, найбільш небезпечні в області центрального пелюстка зустрічно-штирової структури. Не допускаються замикання електродів у зоні їхнього взаємного перекриття, поза зоною можлива наявність не більш $3 \div 5$ 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, які 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[15].

3.2 Технологічний процес виготовлення звукопроводу

Технологічний процес виготовлення пристроїв на ПАХ можна представити у вигляді таких основних етапів: виготовлення п'єзоелектричного звукопроводу, виготовлення фотошаблону, металізація звукопроводу, формування зустрічно-штирових перетворювачів і контактних шин, монтаж та герметизація, дослідження параметрів пристрою.

Виготовлення звукопроводу включає наступні основні операції: орієнтація кристалу, різання, шліфування, полірування і очищення. Для формування електродних структур виконуються операції очищення,

нанесення тонкої плівки металу і фотолітографії. Складання пристроїв включає нанесення акустичного поглинача, приклеювання звукопроводу до корпусу, монтаж електричних виводів і герметизацію. Усі приведені вище технологічні операції виготовлення ПАХ-пристроїв використовуються в технології виготовлення інтегральних мікросхем. Однак, застосування п'єзоелектричних монокристалів та специфіка ПАХ-пристроїв поставили ряд вимог до відомих технологічних процесів. Так, ПАХ-пристрої вимагають точнішої орієнтації підкладки та високої роздільної здатності при виготовленні елементів на великих площах. Для найбільш освоєного діапазону частот від 10 до 400 МГц ширина штирів коливається від 2 до 100 мкм, а загальна кількість їх змінюється від $10 \div 100$ до $400 \div 600$. Число перетворювачів, розміщених на одній підкладці, може досягати шести. Загальне поле, займане зустрічно-штировими структурами, складає від $5 \times 15 \text{ мм}^2$ до $30 \times 100 \text{ мм}^2$. При цьому довжина штиря повинна бути не менше $(40 \div 200) \lambda$, 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 ПАХ-пристроїв у порівнянні з технологією виготовлення інтегральних схем, топологія ПАХ-пристроїв в основному одношарова і тому виключаються складні процеси суміщення шарів, відсутні процеси дифузії, іонної імплантації і т.п.

Основними причинами виходу з ладу в процесі експлуатації ПАХ-пристроїв 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 звукопроводу.

Особливе місце у виготовленні ПАХ-пристроїв займає виготовлення й обробка звукопроводу. Технологічний процес виготовлення п'єзоелектричного звукопроводу включає наступні операції: орієнтація кристалу; різання на заготовки для звукопроводів; загальне шліфування заготовки і шліфування її робочої площини (поверхні); полірування робочої площини; вихідний контроль.

Вирощені у штучних умовах були монокристали юстируються (орієнтується відносно кристалографічних осей) рентгенометричним або оптичним способом. Менш точний оптичний спосіб може використовуватися на етапі попереднього юстирування; при цьому забезпечується точність юстирування $\approx 1^\circ$. Точність рентгенометричного способу юстирування $\approx 1'$. Шліфуються зазвичай всі поверхні звукопроводу, причому для неробочих поверхонь обмежуються грубим шліфуванням. Перед доводкою робочої поверхні проводять, якщо це передбачено, рифлювання протилежної робочої поверхні звукопроводу для розсіювання об'ємних хвиль.

Доводка робочої поверхні складає етапи грубого і тонкого шліфування полірування. До шліфованої поверхні пред'являються наступні вимоги: відсутність виламаних ділянок, подряпин, висока плоскість поверхні. За допомогою полірування чистота робочої поверхні звукопроводу доводиться до $\nabla 14$ при неплоскостності сторін не більше 0,1 мкм. Всі механічні операції по виготовленню звукопроводу досить специфічні для різних матеріалів – кварцю, ніобатлітію, германат вісмуту, п'єзокераміки і т. д. Наприклад, для полірування кварцю застосовують поліри, а для германат вісмуту, п'єзокераміки, ніобат літію – алмазний порошок [9].

Високі вимоги до якості обробки робочої поверхні звукопроводу АРК пояснюються рядом причин. Хороша плоскостність забезпечує тісне прилягання фотошаблону в процесі фотолітографії. Це, в свою чергу, дозволяє збільшити відтворюваність дрібних деталей структури елементів

АРК. Якість робочої поверхні звукопроводу суттєво впливає на згасання поверхневої акустичної хвилі. Відмітимо, що збільшення вимог до якості звукопроводу сприяє подорожчання його, ускладненню операції шліфування і полірування поверхні [9].

Шершавість і забрудненість поверхні – основні причини підвищеного згасання поверхневої акустичної хвилі. Поряд із цим виникають відбиття хвилі від неоднорідностей на поверхні звукопроводу, що спотворюють основні електричні характеристики АРК. Забруднення поверхні, в свою чергу, веде до збільшення затухання. Контроль на електронному мікроскопі при збільшенні 15 000 разів дозволяє оцінити стан поверхні звукопроводу, що призначений для роботи на частотах до 1 – 2 ГГц. При цьому допустимі дефекти поверхні, що мають вигляд подряпин чи тріщин з шириною не більше $0,1\lambda_a$. На робочих частотах нижче 1 ГГц допускаються наявності подряпин чи тріщин приблизно 0,1 мкм.

Незалежно від вибраного методу послідовної фотолітографії на поверхню звукопроводу повинно бути нанесено провідникове покриття. Металізація робочої поверхні звукопроводу проводиться частіш за все шляхом вакуумного напилення. До металевої плівки пред'являються такі вимоги: найменша товщина (0,1 – 0,5 мкм), рівномірність шару, висока електрична провідність, мінімум мікро дефектів (подряпин, непокритих ділянок) і т. д [12].

Найбільш поширені матеріали, що використовуються для металізації робочої поверхні звукопроводу – алюміній і золото. Зустрічно-штирові перетворювачі, що виготовлені із алюмінію із підшаром ванадію, вдало працюють за звукопроводах із кварцю, ніобат літію, горячо-пресованої п'єзокераміки. Мідне або золоте покриття із адгезионним підшаром (призначені для збільшення “зчіплювання” алюмінієвої плівки з поверхнею

звукопроводу) хрому добре поєднуються із германатом вісмуту. Метал можна осаджуватидекількома способами: 1) випаровуванням металу з нагрітої проволки чи тиглю; 2) випаровуванням металу з тиглю, що розігрітий за допомогою електронного променя; 3) високочастотним розпиленням. При виборі технології осадження враховують товщину плівки, що потрібна, допустиму степінь нагріву підкладки, витрати матеріалу, направленість і рівномірність потоку матеріалу при розпиленні.

3.3 Процес фотолітографії

Процес, у результаті якого утворюється рельєф (зображення) заданої форми у металевих плівках або діелектричних матеріалів, називають літографією. В основі цього процесу лежать властивості деяких високомолекулярних з'єднань, що дозволяють формувати під дією світла стійкий до травлення рельєф. Таким чином, нанесені на поверхню підкладки тонкі плівки цих з'єднань, що отримали назву фоторезисторів, можуть після засвічування (експонування) сформувати захисний шар. У випадку негативного фоторезиста у процесі проявлення видаляється неекспонований (незасвічений) полімер. У випадку ж позитивного фоторезиста проявляючий розчин видаляє експонований полімер. Фоторезист, що залишився після проявлення служить для отримання зображення на покриваючій підкладку (звукопровід) провідниковій плівці або безпосередньо на поверхні звукопроводу.

Процес фотолітографії, що використовується для виготовлення АРК, складається з таких операцій: нанесення на звукопровід тонкого шару фоторезисту; експонування фоторезисту через фотошаблон; проявлення зображення на фоторезисті; отримання зображення елементів АРК на поверхні звукопроводу.

Нанесення фоторезисту на звукопровід виконується різними способами: пульверизацією, центрифугуванням і витягуванням. Якість кінцевого зображення на звукопроводі багато в чому залежить від якості фоторезистивної плівки у процесі фотолітографії. Дефекти плівки (нерівномірна товщина затікання по краях підкладки, непокриті ділянки) призводять до появи на кінцевому зображенні нечіткості краю, розривів і замикання електродів перетворювачів. У зв'язку з цим до операції нанесення фот резистора пред'являються такі вимоги: висока чистота навколишнього середовища, відсутність домі шків і механічних забруднень у розчині фоторезисту, рівномірність товщини плівки фоторезисту по всій поверхні звукопроводу.

При виготовленні інтегральних схем найбільш поширений метод центрифугування. Підкладка встановлюється на диск центрифуги, на її поверхню наноситься необхідна кількість фоторезисту і центрифуга приводиться у дію. Розтікання фоторезисту відбувається під дією центр обіжної сили. Товщина отриманої плівки фоторезисту визначається швидкістю обертання, часом центрифугування і в'язкістю фоторезисту.

У процесі виготовлення АРК форма звукопроводу характеризується суттєвою нерівністю сторін; розтікання фоторезисту при цьому відбувається нерівномірно, товщина шару виходить неоднаковою у різних місцях робочої поверхні. При експонуванні і проявленні це призводить до спотворення зображення. Метод, що полягає в зануренні звукопроводу у фоторезист з подальшим „витягуванням”, дозволяє підвищити рівномірність шару. Поряд із цим метод витягування дозволяє наносити фоторезист на звукопровід великої довжини з крихких металів, центрифугування яких важко здійснити.

Експонування та фоторезист потрібного зображення відбувається за допомогою маски або фотошаблону, на якому воно заздалегідь формується

(позитивне чи негативне, в залежності від резистора, що використовується).

Формування зображення на фотошаблоні не відноситься до операцій безпосередньо до фотолітографії. Під формуванням або генерацією зображення розуміється організація малюнку (структури) елементів АРК (наприклад, перетворювачів лінії затримки або фільтру) на поверхні проміжного або кінцевого фотошаблону. Проміжний фотошаблон може застосовувати при проекційному друкуванні, кінцевий – при контактній. Таким чином, кінцевою ціллю генерації зображення є переніс структури елементів АРК на поверхню звукопроводу, що покрита фоторезистом.

Основний метод виготовлення фотошаблону – метод послідовного зменшення. Викреслюючи оригінал фотошаблону (рис.3.1), що потім зменшується за один або декілька етапів. Загальне зменшення складає зазвичай 100 – 500 разів, таким чином електрод перетворювачів шириною 8 – 10 мкм в оригіналі має ширину в 1,000 – 2,000 мм, що легко реалізується[9].

Викреслювання зображення здійснюється координатографом, що вирізує на нанесеній на прозору основу непрозорої плівки контур / зображення. Після видалення обмежуючих замкнутих контуром ділянок на плівці виходить зображення, що відповідає у багато разів збільшеному негативному зображенню структури АРК.

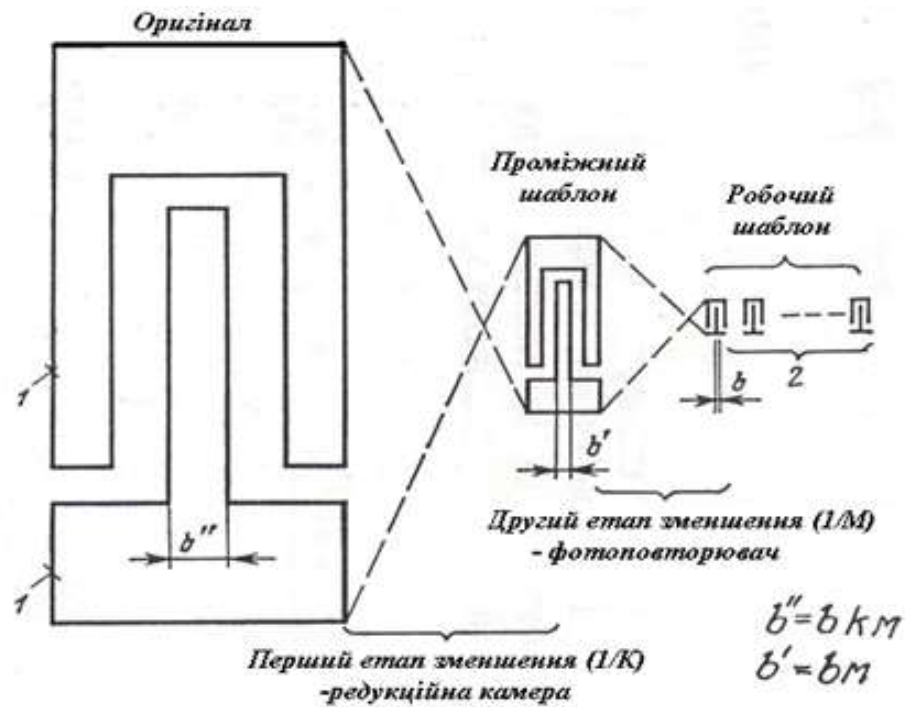


Рис. 3.1. Виготовлення фотошаблону методом послідовного зменшення

Робоче поле координатографу дозволяє викреслювати первинний оригінал із розмірами до 1000×1000 мм. Мінімальний розмір елементу $\approx 0,2 \div 0,5$ мм, точність положення $\approx 0,01$ мм. Більший розвиток отримали автоматичні координатографи з програмним управлінням, наприклад ЕМ-703, „Kartimat”, MicroPlotter, Graphomat і т. д. У комплекті із електронно-обчислювальною машиною програмний координатограф дозволяє автоматизувати всі операції, що існують між видачею вихідних даних на конструкцію АРК і отриманням сигналу фотошаблону.

Проміжний фотошаблон виготовляють, презнявши його із викресленого на координатографі оригіналу (поряд із варіантом технологічного циклу виготовлення проміжного шаблону, що включає викреслювання оригіналу і презняття його на редукційній камері). Існує і інший варіант, що використовує процес фотонабору.

Розглянемо спочатку перший варіант. Різні редукційні камери при одноразовому презніманні забезпечують зменшення зображення первинного

оригіналу у 5 – 60 разів. Точність контролю розмірів зображення складає для більшості камер 0,002 – 0,003 мм. Більшість камер мають можливість переміщення фотопластины у площині зображення з точністю 0,001 – 0,005 мм. Таким чином є можливість мультиплікування зображення безпосередньо на редуційній камері (наприклад, ЕМ-513).

Другим варіантом виготовлення проміжного фотошаблону є фотонабір. Практично операція фотонабору зводиться до формування зображення безпосередньо у розмірах проміжного фотошаблону. Все зображення при цьому розбивається на елементарні прямокутники з різними розмірами та орієнтацією. У фотонабірній установці, іншими словами – генераторі зображення (наприклад, ЕМ-519, ЕМ-549) є набірна діафрагма, що розміщена у предметній площині об'єктиву. Світловий потік від лампи-спалаху через конденсорну систему лінз падає на набірну щільову діафрагму. Ширина щілини діафрагми, довжина щілини і кут її розвороту змінюється за допомогою трьох керуючих електродвигунів, що приводять до руху двох рухомих пластин діафрагми. Дві інші пластини при цьому залишаються нерухомими. Розмір вікна діафрагми (ЕМ-519) може змінюватися від 0,25 до 12,7 мм. Вся діафрагма може розвертатися на кут 90° . Для цього використовується кроковий двигун із дискретом кроку $0,05^\circ$. Світловий потік, що пройшов діафрагму, фокусується високодозволяючим об'єктивом на фотопластині, що розміщена на координатному столі. Координатний стіл за допомогою двох сервоелектричних двигунів переміщуються по осям x і y . Таким чином, світлова пляма, що відповідає вибраній діафрагмі, проектується із зменшенням у потрібне місце на фотопластині.

Операція фотонабору найбільш трудомістка, її першим етапом є розділення зображення на складові елементи. Але при виготовленні АРК, де основним і найбільш повторюваним елементом є зустрічно-штировий

перетворювач, операція розділення зображення суттєво спрощується.

Традиційний метод послідовного зменшення (рис.3.1) зумовлює два-три етапи перезнімання первинного оригіналу. У процесі перезнімання, як уже зазначалося, реалізується два-три етапи зменшення. Другий етап може бути поєднаний із мультиплікаційним зображенням. При цьому вже у процесі перезняття отримують кінцевий (робочий) фотошаблон (як і у прикладі із багатовідвідною ЛЗ). Такий шлях отримання робочого шаблону застосовується у випадку невисоких вимог до зображення: мінімальний розмір елементу 5 – 7 мкм, точність положення елементу 2 – 5 мкм. В експериментальних низькочастотних пристроях названі параметри фотошаблону допустимі.

Прецизійні (використовуються для виготовлення високочастотних пристроїв) фотошаблони проходять ще один обов'язковий етап зменшення, що здійснюється за допомогою вторинного перезняття. Пристрої, що виконують вторинне перезняття, отримали назву фотоповторювачів або мультиплікаторів.

Застосований до фотошаблонів АРК процес мультиплікування будується трохи по-іншому ніж для ІС. Структура АРК має на увазі розміщення на фотошаблоні різних зображень, що відповідають перетворювачам, сумувальним шинам, відбиваючим структурам, акустичним хвилеводам та іншим елементам АРК. Як вже зазначалося, для подальшої реалізації потрібної структури на звукопроводі створюється або комплект робочих шаблонів, або один складний шаблон, що містить повне зображення всієї структури. На шаблони комплексу наносяться мітки для подальшого поєднання[14].

Експонуванню зображення з фотошаблону, на покрити фоторезистом поверхню звукопроводу, передую операція поєднання. Якщо шаблон один,

мається на увазі поєднання зображення яке вже на ньому нанесено із відповідною ділянкою робочої поверхні звукопроводу; при використанні комплекту шаблонів необхідно забезпечити сумісну просторову орієнтацію парціальних шаблонів для отримання структури зображення.

У процесі експонування тіньове зображення з шаблону 1 (рис.3.2) проєкціюється на шар 2 фоторезисту. Засвічені ділянки фоторезисту після проявлення набувають стійкості до травників. У результаті травлення на

металізованій (у загальному випадку) поверхні звукопроводу 4 залишається рельєфна структура фоторезисту 3, негативна чи позитивна по відношенню до потрібної структури перетворювачів. При експонуванні фотошаблон або знаходиться у безпосередньому контакті з підкладкою, або зображення з фотошаблону проєктується на підкладку за допомогою оптичної системи. У зв'язку з цим розрізняють два методи експонування: контактне і проєкційне друкування.

Проєкційне друкування застосовується до виготовлення АРК, мається на увазі безпосереднє експонування зображення на поверхню звукопроводу, що покритий фото чутливим шаром. При проєкційному друкуванні частіш за все для переносу зображення застосовується оптична система з відповідним зменшенням. Методом проєкційного друкування можуть виготовлятися як самі акустичні пристрої, так і фотошаблони для подальшого контактного друкування.

Контактне друкування здійснюється шляхом експонування зображення з фотошаблону, що знаходиться у безпосередньому контакті із звукопроводом (копіювання зображення).

Після експонування фоторезисту проводиться проявлення, при якому, в залежності від резистора, що застосовується (негативного чи позитивного), видаляються експоновані або неекспоновані його ділянки.

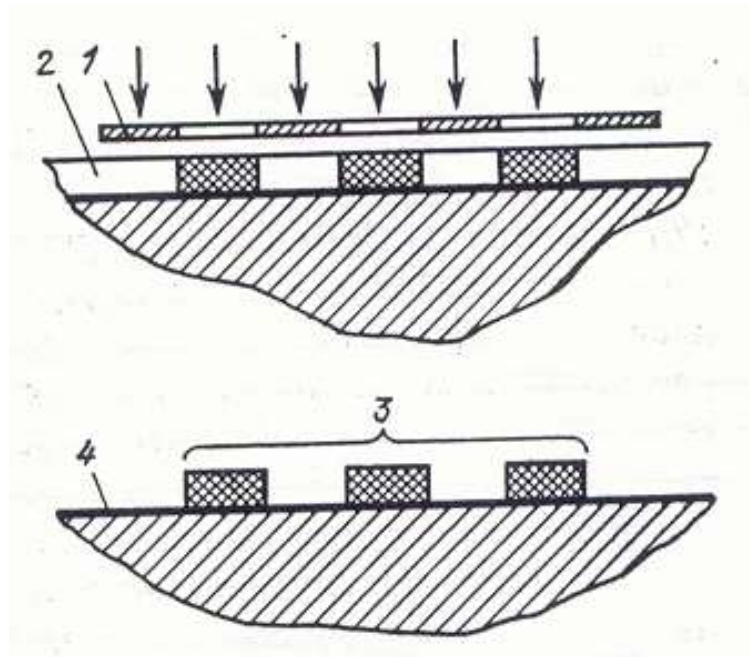


Рис. 3.2. Експонування і проявка зображення

Отриманий у результаті цієї операції на поверхні підкладки (звукопроводу) рельєф відповідає потрібній структурі АРК.

У процесі виготовлення АРК частіш за все потрібно отримати провідникову структуру на поверхні діелектричного звукопроводу. Існує два варіанти. В одному із них результат досягається вакуумним напиленням металевої плівки (1 рис.3.3) на резистивний рельєф 2 із послідуочим видаленням резисту. При цьому провідникова структура утворюється на місцях, вільних від резисту після проявлення (негативна структура). Якість отриманої таким шляхом провідникової структури багато в чому залежить від профілю резистивного рельєфу. На рис.3.3 зображені зрізи рельєфу резисту (3÷5), що відповідає структурі зустрічно-штирового перетворювача. Прямокутний зріз 3 і трапецевидний 4 (являється результатом травлення резисту при фотолітографії) дозволяє отримати хорошу провідникову структуру з рівними краями. Це пояснюється тим, що при видаленні резисту з ділянок 2, плівка 1, що лежить на його поверхні має слабкий контакт з

плівкою 6 на вільній поверхні. При оплавлених краях резистивного рельєфу 5 цей контакт досить сильний і ускладнює відділення резисту і покриваючої його плівки, що призводить до сильної порізаності країв металізованих ділянок.

У іншому відомому методі необхідний малюнок отримують хімічним травленням металу через захисний шар фоторезисту. На підкладку 1 (рис. 3.4) осаджується плівка металу 2, поверх якої підкладка покривається шаром фоторезисту, що утворює у процесі фотолітографії захисний рельєф 3, який відповідає потрібній структурі зображення. Трапецевидна форма зрізу (профіль) резистивного рельєфу утворюється через розходження світлового потоку при експонуванні і підтравка при проявленні. Оптимальним у даному випадку являється прямокутний зріз рельєфу, що дозволяє відтворювати провідникову структуру з фотошаблону без спотворень. У результаті травлення металева плівка залишається лише на ділянках, що захищені фоторезистом, після видалення якого на підкладці (звукопроводі) залишається лише провідникова структура 4. Хімічне травлення дозволяє отримати лінії шириною 4 – 5 мкм, що пояснюється складністю контролю швидкості травлення.

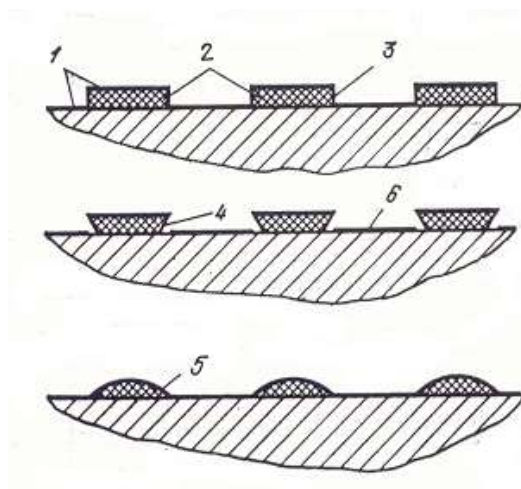


Рис. 3.3. Отримання провідникової структури напленням

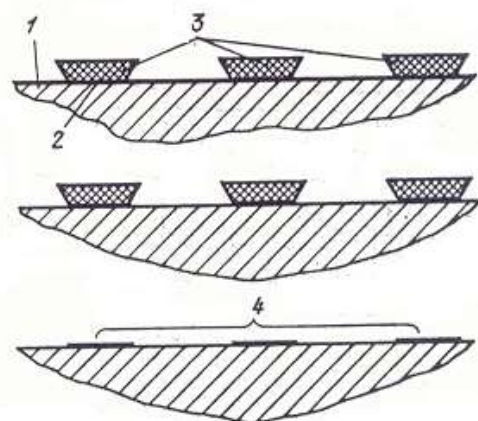


Рис. 3.4. Отримання провідникової структури травленням

Травлення іонним променем (пучком) дозволяє звести це значення до $1 - 2$ мкм, хоча при цьому виникає небезпека неконтрольованого підтравлення власне звукопроводу.

Промивання підкладки з отриманим на ній провідниковим рельєфом завершує цей етап виготовлення АРК. Потім слідують операції попереднього контролю, встановлення у корпус, приварювання виводів і кінцевого контролю механічних і електричних параметрів[14].

3.4 Основні питання конструювання і виготовлення АРК

Сукупність акустичного звукопроводу і розміщеного на ньому перетворювачів ПАХ представляють собою практично закінчений акустичний блок, який реалізує задану функціональну операцію. Перед установкою акустичного блоку в корпус, частіш за все проводять попередній контроль його параметрів. Така перевірка може передувати навіть операції приварювання виводів – в цьому випадку підключення зовнішніх ланцюгів поводять у спеціальних контактних пристроях.

Попередній контроль параметрів. Основна задача цієї операції – перевірка працездатності АРК. Найбільш поширеною причиною браку у процесі фотолітографії – закорочування сусідніх протифазних електродів 1 (рис.3.5) перетворювачів. На робочих частотах АРК приблизно 100 МГц і вище, відстань b між протифазними електродами складає $5 - 10$ мкм, що значно збільшує можливість виникнення закорочування у процесі фотолітографії через локальні дефекти резистивного шару і зумовлених ними провідникових ділянок (перемичок) 2, сумірні з відстанню між електродами.

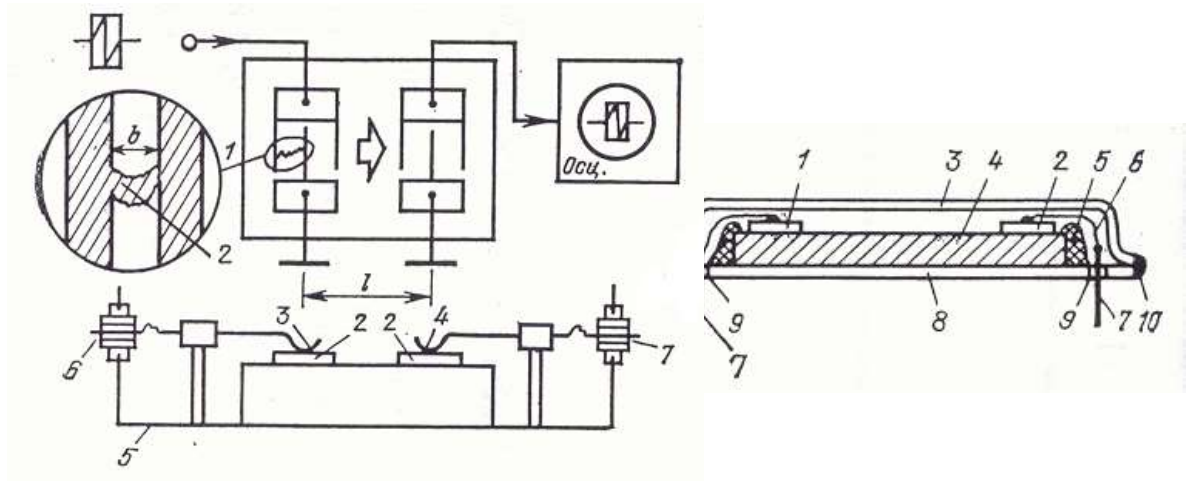


Рис. 3.5. Попередній контроль АРК Рис. 3.6.Герметичний корпус АРК

Наявність закорочування контролюється візуально (під мікроскопом) чи замірянням опору між протилежними сумірними шинами перетворювача. Перемички видаляють підрізанням чи пропалюванням. Підрізання може здійснюватися за допомогою скрайбінування або із застосуванням променя лазера, що випаровує провідниковий шар. При масовому виробництві простіше здійснювати операцію пропалювання перемичок. На перетворювач подається постійна або змінна напруга; по мірі її збільшення контролюється струм через перемичку. Із збільшенням напруги, що подається, виникає спочатку зростання струму через перемичку, яка нагрівається і вигорає. У цей момент струм падає до нуля і напруга знімається. Такий спосіб може призвести до вигорання зв'язаних із перемичкою електродів, однак у багатоелектродних перетворювачах це досить несуттєво позначається на загальних параметрах АРК.

У склад операцій попереднього контролю блоку АРК може входити вимірювання затримки сигналу. Відхилення затримки від розрахункових значень частіш за все викликано неправильною орієнтацією звукопроводу відносно кристалографічних осей і відповідною зміною швидкості ПАХ. Інша причина – помилки при виготовленні фотошаблону, що призводять до

відхилення просторового кроку перетворювачів і від заданого значення. У цих випадках попереднє вимірювання затримки сигналу в АРК дає можливість внести потрібні корективи у передуючий йому технологічний процес.

Попереднє вимірювання АЧХ проводиться зазвичай при ітераційному підбиранні параметрів смугових фільтрів на ПАХ. У цьому випадку немає сенсу встановлювати фільтр у корпус на кожному із етапів ітерації, тому обмежуються попередньою оцінкою АЧХ (а іноді і імпульсного відгуку).

Контактний пристрій для попереднього вимірювання параметрів АРК являє собою жорстку основу 5 (рис. 3.5), на якому закріплюється звукопровід. До контактних площадок перетворювачів 2 підводяться пружинні контакти 3, 4, що встановлені на шарнірних основах, які забезпечують їм вільне переміщення. Контактні з'єднання між роз'ємами або прохідними ізоляторами 6, 7, що розміщені на стінках корпусу. Одною із головних вимог до контактної пристрою є забезпечення надійного взаємного експанування його вхідних і вихідних ланцюгів і власне перетворювачів ПАХ [14].

Встановлення АРК у корпус. До корпусів АРК пред'являється ряд конструктивних вимог, які особливо часто застосовуються до двох специфічних груп АРК. До першої з них відносять елементи, розміри яких дозволяють використовувати стандартні корпуси, що застосовуються для інтегральних і гібридних схем. Це, перш за все, смугові фільтри ($3\Delta f/f_0 \geq 1 \div 5\%$), резонатори ЛЗ із невеликою затримкою (до декількох мікросекунд).

Поряд із герметичністю і достатнім числом виводів корпусу ІС (рис. 3.6) забезпечує відносно непогане взаємне екранування перетворювачів 1, 2 за рахунок розміщення провідникової кришки 3 корпусу безпосередньо над робочою поверхнею звукопроводу. Після встановлення звукопроводу 4 на його торець наносять поглинаюче покриття 5 і розварюють виводи. Частіш за

все для цього використовують золоті провідники 6, які приварюються дифузійним зварюванням між контактами площадки перетворювачів і відповідними виводами 7, котрі закріплені на основі корпусу 8 у прохідних ізоляторах 9. Кінцева операція – зварювання кришки 3 і основи 8 корпусу по периметру 10.

Операції роззварювання виводів і герметизації, що застосовуються до стандартних корпусів ІС реалізуються за допомогою вже існуючої бази технологічного устаткування. При відповідній уніфікації розмірів звукопроводів питання забезпечення корпусами „маломірних” АРК першої групи можна вважати практично вирішеним. Деякі труднощі пов’язані з тим, що відносно велика частина використовуваних звукопроводів іноді не дозволяють застосовувати стандартні кришки 3 і потребують їх доробки. У цьому випадку можуть враховуватися і вимоги щодо додаткового екранування, яке виникає через дуже близьку відстань між перетворювачами.

Значно гірше йдуть справи з корпусами відносно „великих” пристроїв на ПАХ, зокрема ЛЗ. Уніфікація корпусів ускладнена широким діапазоном розмірів використовуваних звукопроводів, технології, числа відводів і т.д. У зв’язку із цим виникає велика кількість модифікацій корпусів, що особливо стосується АРК спеціального призначення, котрі випускаються малими серіями [13].

Узагальнимо вимоги до корпусу АРК. Перш за все необхідно відносно вільно закріпити звукопровід, що виключає виникнення яких-небудь внутрішніх наруг. Вони можуть призвести або до руйнування звукопроводу у процесі транспортування чи експлуатації, або до появи акустичних ефектів (наприклад, відбиття ПАХ), які спотворюють електричні характеристики пристроїв. Кріплення звукопроводу також повинно забезпечувати свободу його температурних деформацій. В той же час більшість АРК працює у пересувній апаратурі, що піддається ударам і вібраціям у широкому діапазоні

частот. Звісно, динамічна система „звукопровід – виводи – корпус” не повинна, по можливості, поступатися за механічними характеристиками іншим інтегральним пристроям того ж класу.

Також дуже важливо врахувати необхідність взаємного екранування перетворювачів. Причому, це питання розглядається значно ширше: поряд із незатриманими паразитними сигналами, що зумовлені електромагнітними наведеннями, в імпульсному відгуку АРК присутні затримані сигнали, зумовлені поширенням об’ємних хвиль.

Розглянемо зв’язану систему з двох перетворювачів ПАХ 2,3 (рис. 3.7,а), встановлених на п’єзоелектричному звукопроводі 1. При подачі на вхідний перетворювач 2 радіоімпульсу з частотою, яка дорівнює частоті його акустичного синхронізму, імпульсний відгук $A(t)$ (рис.3.7,б), що спостерігається на вхідному перетворювачі, буде мати, як мінімум, три сигнали з різною затримкою. Перший із них (4) викликаний прямим проходженням електричного сигналу між вхідним і вихідним перетворювачами через повітряний зазор і через товщину звукопроводу. Другий сигнал (5) являє собою основний затриманий сигнал, зумовлений одноразовим проходженням ПАХ ділянки довжиною L між вхідним і вихідним перетворювачами, його затримка складає $T = L / v_a$.

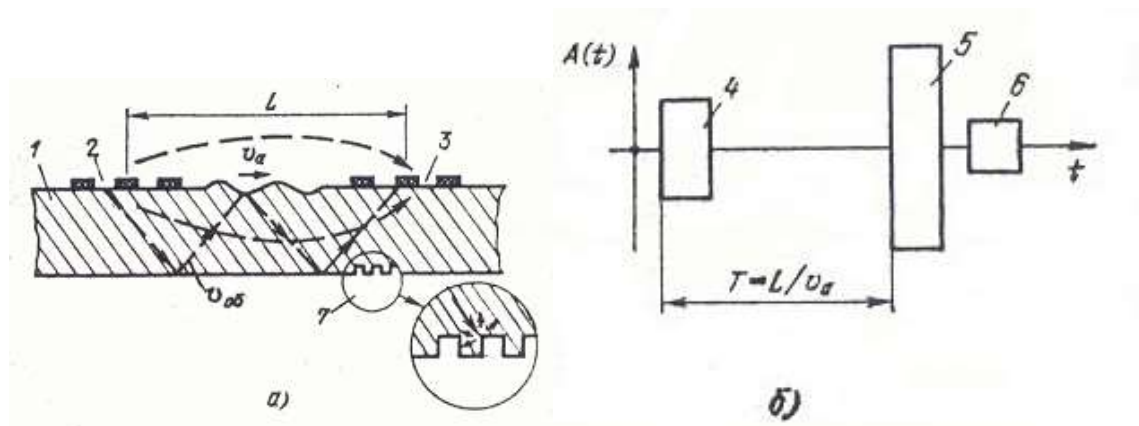


Рис. 3.7. Паразитні сигнали в АРК

Третій сигнал (6) зумовлений об'ємною акустичною хвилею, яка збуджується зустрічно-штировими перетворювачами поряд із корисною, поверхневою хвилею. У загальному випадку швидкість об'ємної акустичної хвилі трохи вища поверхневої, але шлях її поширення зазвичай більший за рахунок багаторазових перевідбивачів і затримка сигналу 6 зазвичай перевищує затримку корисного сигналу[16].

Таким чином, у імпульсному відгуку АРК вони суттєво різняться, що полегшує аналіз і врахування сигналу 6 при розрахунку АРК.

Для зменшення рівня сигналу, зумовленого об'ємними хвилями, застосовують рифлення тильної сторони звукопроводу. Об'ємна хвиля, яка падає на рифлену поверхню, відбивається практично в усіх напрямках; таким чином, до вихідного перетворювача вона доходить сильно ослабленою.

Пряме проходження сигналу через повітряний зазор усувається за допомогою провідникових екранів 1 (рис.3.8), які перекривають практично весь простір, обмежений звукопроводом, стінками корпусу і кришкою.

Додатково використовують заземлену металізацію 2 поверхні звукопроводу в зоні екрану. Пряме проходження сигналу через товщину звукопроводу усувається введенням пазу 3, при цьому поверхня пазу 4 і вся тильна сторона звукопроводу зазвичай металізуються і надійно з'єднуються з корпусом АРК[16].

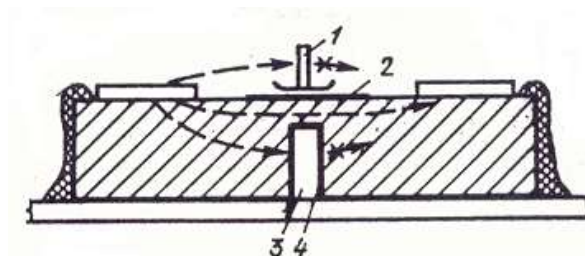


Рис. 3.8. Екранування прямого проходження сигналу

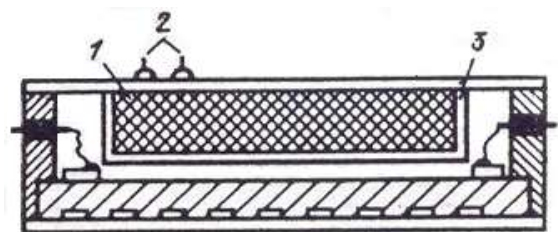


Рис. 3.9. Термостатизування АРК

Для забезпечення параметрів у заданому діапазоні температур цілий ряд АРК потребує термостатування. Перш за все це відноситься до МЛД і ДЛЗ для узгоджених фільтрів складних сигналів.

У залежності від вимог до стабільності параметрів точність термостатування задається у межах від одиниць до сотих долей °С. При термостатуванні з відносно невисокою точністю застосовують нагрівачі, суміщені з корпусом АРК (рис. 3.9). Частіш за все нагрівач 1 встановлюється на кришці корпусу; його виводи 2 підключаються до пристрою живлення. Корпус нагрівача 3 встановлюється у безпосередній близькості від робочої поверхні звукопроводу і, одночасно, може виконувати роль екрану між перетворювачами[17].

Відома залежність затухання ПАХ від забруднення робочої поверхні звукопроводу. Наявність провідникових включень, що відповідають кроку протифазних електродів, може викликати їх закорочування, т. е. призвести до виходу із ладу пристрою в цілому. У зв'язку з цим корпус, як мінімум, повинен забезпечувати пилозахищеність звукопроводу. Провідникове покриття, з якого сформовані перетворювачі, має дуже малу товщину і швидко руйнуються у результаті ерозії. Це зумовлює також вимоги вологозахищеності корпусу. Більшість використовуваних у наш час корпусів задовольняють перелічені вимоги і забезпечують безвідмовну роботу АРК на протязі багатьох років. У ряді випадків і для АРК великих розмірів застосовують герметичні корпуси, іноді наповнені інертним газом. Суттєвий недолік таких АРК – низька ремонтоздатність[18].

Приварювання провідників між контактними площадками перетворювачів і контактними площадками корпусу здійснюється за допомогою стандартного устаткування, яке використовується при виготовленні

ІС. У ряді випадків первинний контроль електричних параметрів АРК

роблять до зварювання кришки або кінцевого збирання корпусу. Це дає можливість оперативно усунути дефекти, що виникли через забруднення поверхні, закорочування електродів і т. д.

Кінцевий контроль параметрів АРК. Зміна традиційних електричних параметрів для різних функціональних модифікацій АРК мало чим відрізняється від відповідних операцій з їх функціональними аналогами інших фізичних реалізацій. Точне вимірювання АЧХ проводиться зазвичай у неузгодженому режимі, так як погоджувальні ланцюги трохи спотворюють форму АЧХ і не дозволяють провести презиційне вимірювання, необхідне для порівняльної характеристики із розрахунковими даними. У цьому випадку вимірювання істотно ускладнюється порівняно великим згасанням сигналу в АРК (30 – 70 дБ).

Акустичним пристроям властиві, як відомо, тільки специфічні вторинні ефекти, пов'язані з перевідбиттям ПАХ в електродних структурах перетворювачів. Рівень помилкових сигналів, зумовлених перетворювачами, складає в основному – $30 \div -60$ дБ по відношенню до основного сигналу. Таким чином, динамічний діапазон апаратури для презиційного вимірювання імпульсного відгуку повинен бути не менше $60 \div 80$ дБ. Це, мабуть, найбільш серйозні перешкоди на шляху метрологічного забезпечення АРК.

Кліматичні і механічні випробування АРК нічим не відрізняються від відповідних процедур з іншими елементами радіоелектронних пристроїв. Стійкість параметрів АРК до кліматичної і механічної дії залежить, в основному, від конструкції корпусу і не поступається відповідним характеристикам інших елементних ансамблів.

Рівень опрацювання питань виготовлення АРК гарантує надійне виробництво з високим виходом річних виробів і хорошою відтворюваністю параметрів. Все це дозволяє сподіватися на подальше розширення використання техніки ПАХ і постійне вдосконалення її функціональних

можливостей[19].

Висновки

Приведені основні етапи конструювання і виготовлення АРК. Розглянуті їх загальні особливості. З'ясовано, що традиційні функціональні модифікації АРК, із врахуванням постійного прогресу технологічної і матеріальної бази, можуть в найближчі п'ять – десять років успішно конкурувати з іншими реалізаціями аналогової і цифрової техніки. Вже сьогодні велику зацікавленість у надійних і малогабаритних датчиках температури і тиску мають такі важливі галузі, як авіаційна і легка промисловість. А ПАХ-датчики, разом з мікропроцесорами, застосовуються для оперативного контролю і керування режимом роботи автомобільних двигунів, що значно підвищує ресурс їх роботи. Інші модифікації ПАХ-датчиків знайшли застосування у портативних вимірюваннях напруженості електричних полів, інших пристроях і системах медичної діагностики.

Рівень опрацювання питань виготовлення АРК гарантує надійне виробництво з високим виходом річних виробів і хорошою відтворюваністю параметрів. Все це дозволяє сподіватися на подальше розширення використання техніки ПАХ і постійне вдосконалення її функціональних можливостей

ВИСНОВКИ

1. На сьогоднішній день пристрої на ПАХ широко застосовуються при створенні електронних систем обробки інформації і вимірювальної техніки: лінії затримки, фільтри, генератори, сенсори фізичних величин.

Технологія пристроїв ПАХ в значній мірі базується на прогресивних прийомах, що застосовуються у виробництві виробів мікроелектроніки із застосуванням процесів фотолітографії, групових процесів планарної обробки підкладок і т. д. Це створює передумови для масового виробництва високоякісних перетворювачів.

Пристрої на поверхневих акустичних хвилях надзвичайно універсальні, комерційний потенціал яких постійно зростає. Вони конкурентноздатні за ціною, міцні, чутливі та надійні.

Більшість переваг ПАХ-пристроїв обумовлено безпосередньо їх фізичною структурою: малою вагою і габаритами; лінійної (або визначається вимогами) фазою; фактором форми, що наближається до одиниці (дуже висока прямоугільність); температурною стабільністю. Оскільки центральна частота і форма частотної характеристики визначаються топологією, вони не вимагають складної настройки в апаратурі і немає необхідності турбуватися за них в процесі експлуатації. Технологія виготовлення, сумісна з напівпровідниковим виробництвом, дозволяє випускати їх в великому обсязі з високою відтворюваністю.

Основною перевагою ПАХ є доступність хвильового фронту, що дозволяє знімати сигнал і управляти розповсюдженням хвилі в будь-яких точках звукопровода, а також управляти характеристиками цих пристроїв і створювати численні пристрої з різними функціями.

2. Переваги ПАХ-пристроїв обумовлено їх малою вагою і габаритами, температурною стабільністю, придатністю мікроелектронної технології для їх виготовлення. Оскільки центральна частота і форма частотної

характеристики визначаються топологією, вони не вимагають складних налаштувань в апаратурі і мають довготривалий час безперебійного функціонування.

Використання експериментальної залежності фазової швидкості ПАХ в необмеженій плівковій структурі $ZnO-SiO_{2nl}$ та її апроксимація дозволили здійснити відповідні перетворення дисперсійного рівняння плівкового ПАХ-хвилеводу, а параметри рупорного концентратора та вхідного (вихідного) ЗШП пов'язати з параметрами хвилеводу. В результаті чисельних розрахунків отримано ряд графіків, які можуть бути використані при розробці пристроїв на ПАХ на базі хвилевідних плівкових структур.

Використання отриманих залежностей довжини зв'язку двох слабо пов'язаних хвилеводів від хвильового числа можуть бути використані при розробці пристроїв на ПАХ на базі хвилевідних плівкових структур.

В результаті чисельних розрахунків отримано ряд графіків, які можуть бути використані при проектуванні фільтрів на основі кільцевих резонаторів ПАХ.

3. Приведені основні етапи конструювання і виготовлення АРК. Розглянуті їх загальні особливості. З'ясовано, що традиційні функціональні модифікації АРК, із врахуванням постійного прогресу технологічної і матеріальної бази, можуть в найближчі п'ять – десять років успішно конкурувати з іншими реалізаціями аналогової і цифрової техніки. Вже сьогодні велику зацікавленість у надійних і малогабаритних датчиках температури і тиску мають такі важливі галузі, як авіаційна і легка промисловість. А ПАХ-датчики, разом з мікропроцесорами, застосовуються для оперативного контролю і керування режимом роботи автомобільних двигунів, що значно підвищує ресурс їх роботи. Інші модифікації ПАХ-датчиків знайшли застосування у портативних вимірюваннях напруженості електричних полів, інших пристроях і системах медичної діагностики.

Рівень опрацювання питань виготовлення АРК гарантує надійне виробництво з високим виходом річних виробів і хорошою відтворюваністю параметрів. Все це дозволяє сподіватися на подальше розширення використання техніки ПАХ і постійне вдосконалення її функціональних можливостей

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tiersten H.F. Elastic Surface Waves Luided by Thin Films, J.Appl. Phys. – 1969. – v.40, № 2. -P. 770-789.
2. Поверхностные акустические волны / Под ред. А.Олинера; пер. с англ.; под ред. И.С.Реза. –М.:Мир, 1981. - 392 с.
3. 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.
4. Микросистемотехника. Инновационное направление развития электроники, В. Шубарцев, Журнал Электроника 2010.
5. 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.
6. Coldren L.A., Schmidt R.V. Acoustic surface wave $\Delta V/V$ waveguides on anisotropic substrates. – Applied Physics Letters, 1973, vol. 22, № 10. – P.482-483.
7. Речицкий В.И. Акустоэлектронные радиокомпоненты: элементы и устройства на поверхностных акустических волнах. – М. : Сов.Радио, 1987. – 264 с.
8. CHIPINFO // URL: <http://www.chipinfo.ru/literature/>
9. Багдасарян А.С. «Устройства на поверхностных акустических волнах в системах и средствах связи», Инженерная микроэлектроника, 8(71), с.33-39, 2002.
10. Плешка Т.Є., Жовнір М.Ф. П'єзоелектричні хвилеводи для вимірювальних перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях / X-a

науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки» – 2016, 6с.

11. Плешка Т.Є., Жовнір М.Ф., «Математична модель пов'язаних ПАХ-хвилеводів» 12-та конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки», - 2018, 3с.

12. M.F.Zhovnir, L. D. Pysarenko, T.E. Pleshka, «Comb filter based on saw-resonator of running wave» - XIII INTERNATIONAL CONFERENCE “ELECTRONICS AND APPLIED PHYSICS”, p. 213-214.

13. Багдасарян А.С., Синицына Т.В. / Селективные акустоэлектронные приборы на основе однонаправленных структур поверхностных акустических волн"/ монография, изд.АИН им.А.М.Прохорова, М. 2004

14. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 287 с.

15. Поляков П.Ф., Хорунжий В.А., Поляков В.П. Акустоэлектроника. Физико-технологические основы и применение. – Харьков: ООО «Компания СМІТ», 2007. – т.2. – 552 с.

16. Гуляев Ю.В. «Акустоэлектроника – Российский приоритет». Радиоэлектроника и управление», 2-3, с.55-61, 2002.

17. Устройства интегральной электроники, В.Ф. Дмитриев, Акустоэлектроника, Основы теории, расчета и проектирования, Учебное пособие, Санкт Петербург 2006, С.52 – 63.

18. Разработка технологии изготовления активных приборов на ПАВ, Лучинин В. В., 1988. С.5 – 23.

19. А. С. Бугаев, В. Ф. Дмитриев, С. В. Кулаков Устройства на поверхностных акустических волнах – М., 2009.