**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Ордена Трудового Красного Знамени

государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования  
**Московский Технический Университет Связи и Информатики**

Кафедра «Электроника»

**Учебно-методическое пособие по дисциплине**

**«Основы конструирования и технологии производства ЭС»**

для студентов направления 11.03.01 и 11.03.02

Москва, 2024

Учебно-методическое пособие по дисциплине

**Основы конструирования и технологии производства ЭС**

Авторы: Г.М. Аристархов,

О.В. Аринин,

В.Н. Каравашкина

Рецензент Т.Б. Асеева

# Лабораторная работа № 1ф

**УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА  
ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ**

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение влияния конструкторско-топологических параметров устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ) на его электрические характеристики:

а) выбор материала подложки;

б) выбор геометрии (топологии) тонкопленочных элементов частотно-избирательных фильтров и согласованных фильтров сложных сигналов.

2. Освоение методики проектирования пленочных элементов устройств на ПАВ при использовании технологии изготовления интегральных микросхем.

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Записать в отчете название и цель работы.

2. Изучить теоретическую часть описание лабораторной работы.

3. Произвести расчет, необходимый для проектирования частотно-избирательного фильтра (ЧИФ).

4. Начертить топологию ЧИФ

5. Ответить на контрольные вопросы (по заданию преподавателя).

ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ПАВ

1. Определить из табл.1 по начальной букве своей фамилии центральную частоту ‑ и ширину полосы пропускания ‑ для расчета ЧИФ на ПАВ, а также длину псевдослучайной последовательности (ПСП) ‑ для согласованного фильтра (СФ) сложного сигнала (СлС).

Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Первая буква фамилии | | | , МГц | , МГц |  |
| А | Л | Х | 10 | 1,2 | 50 |
| Б | М | Ц | 20 | 1,7 | 60 |
| В | Н | Ч | 30 | 2,1 | 70 |
| Г | О | Ш | 40 | 3,8 | 100 |
| Д | П | Щ | 50 | 12 | 120 |
| Е | Р | Э | 60 | 3,2 | 200 |
| Ж | С | Ю | 70 | 6 | 250 |
| З | Т | Я | 80 | 9,6 | 280 |
| И | У |  | 90 | 6,3 | 350 |
| К | Ф |  | 100 | 4,6 | 500 |

2. Выбрать по табл.3 оптимальный пьезоматериал для подложки.

3. Рассчитать топологические размеры выходного (узкополосного) встречно-штыревого преобразователя (ВШП) частотно-избирательного фильтра для радиоимпульса с прямоугольной огибающей: , , , , и др.; начертить конструкцию; при этом считаем, что выходное сопротивление ВШП – определяется по начальной букве фамилии из таблицы 2:

Таблица 2

|  |  |
| --- | --- |
| Первая буква фамилии | *,* Ом |
| А ‑ К | 75 |
| Л ‑ Ф | 150 |
| Х ‑ Я | 200 |

4. Рассчитать топологические размеры входного (широкополосного) ВШП, выбрав его полосу на 5–15% шире полосы выходного ВШП, причем большее число (т.е. 15%) берется при относительных полосах выходного ВШП более 10%, а меньшее число (т.е. 5%)– при более узкополосных выходных ВШП.

5. Рассчитать время задержки в линии задержки (ЛЗ) на ПАВ. Расстояние между входным и выходным ВШП, которое определяет время задержки, взять равным 20.

6. Начертить спроектированный частотно-избирательный фильтр (ЧИФ) на ПАВ, выбрав необходимый масштаб (размер чертежа должен быть примерно равен 150х100 мм).

7. Рассчитать расстояние между отводами электродов согласованного фильтра и общую длину получившейся линии.

8. Сделать общие выводы.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Обоснование выбора материала.
4. Чертеж топологии и результаты расчета ее параметров.
5. Расчет параметров согласованного фильтра.
6. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое ПАВ и за счет чего она образуется?

2. Что такое ПАВ устройства и для чего они применяются? Какова связь их электрических характеристик с топологическими размерами элементов конструкций?

3. Чем отличаются входной и выходной ВШП в частотно-избирательном фильтре и в согласованном фильтре сложного сигнала (СлС)?

4. Как строятся линии задержки на ПАВ? В каком соответствии находятся АЧХ согласованного фильтра, спектр обрабатываемого СлС и структура ВШП?

5. Что такое аподизация и для чего она применяется?

6. Чем определяется выбор материала подложки для устройства на ПАВ? Их основные характеристики.

7. Какие функции можно реализовать на ПАВ устройствах?

8. Что такое трансверсальный фильтр? Как его можно реализовать?

9. Как выполняются программируемые согласованные фильтра на ПАВ?

10. Что такое оптимальная полоса фильтра на ПАВ?

11. Как осуществляется перестройка фазы в согласованных фильтрах на ПАВ для фазоманипулированных сложных сигналов?

12. Какие параметры частотно-избирательного фильтра на ПАВ определяется апертура ВШП и количество электродов в отводе ВШП; чем достигается требуемое затухание за полосой пропускания ЧИФ и СФ?

13. Классификация устройств на ПАВ?

14. Преимущества и недостатки устройств на ПАВ?

1. Введение

Использование средств микроэлектроники – основа современного этапа развития всех отраслей радио- и электронного приборостроения. Изделия микроэлектроники дают возможность сократить трудоемкость изготовления продукции, уменьшить ее вес, габариты, улучшить эксплуатационные качества.

К изделиям микроэлектроники относятся:

* интегральные схемы (полупроводниковые, гибридные);
* устройства функциональной электроники (оптоэлектронные, ионные, тепловые, акустические и т.д.);
* микрокомпоненты (радиокомпоненты и радиодетали): бескорпусные транзисторы, диоды и конденсаторы, микроразъемы, индикаторы, кнопки, кабели, элементы конструкций, многослойные печатные платы и т.д.

При изготовлении этих изделий стремятся использовать стандартные технологические приемы микроэлектроники (фотолитографию, автоматическую проверку, неразрушающие методы контроля и т.д.).

В зависимости от технологических методов, положенных в основу реализации интегральных схем (ИС), различают полупроводниковые и гибридные ИС (ГИС). В настоящее время благодаря успехам технологии наибольшее развитие получили полупроводниковые ИС со степенью интеграции до десятков тысяч элементов в одном кристалле. Однако в ряде случаев оказывается целесообразным применение ГИС. Это объясняется следующим:

* пассивная часть ГИС изготавливается на отдельной подложке, что позволяет достигать высокого качества пассивных элементов, создавать прецизионные, высокоточные и СВЧ ИС;
* технология ГИС проста и требует меньших начальных затрат, что важно при создании нетиповых, нестандартных изделий;
* технологию ГИС можно рассматривать как перспективную для замены существующих методов многослойного печатного монтажа при размещении на подложках бескорпусных ИС, больших ИС (БИС) и других полупроводниковых компонентов.

В ряде случаев технология ГИС оказывается предпочтительнее для выполнения так называемых «мощных» или «силовых» ИС.

Функциональные компоненты не имеют физического подобия в общепринятых электрических цепях. Устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ), использующие пьезоэлектрические явления в твердом теле, представляются большой интерес, а проводимые исследования в этой области привели к созданию новых устройств функциональной электроники, представляющих собой специализированные ГИС.

2. Принципы работы устройств на ПАВ и условная классификация

Поверхностные акустические волны (ПАВ) – это упругие деформации в твердом теле, имеющие преимущественно продольную компоненту. Поперечная компонента, направленная вглубь твердого тела, мала. Поэтому ПАВ распространяются в приповерхностном слое, глубиной не более 3-4 длин волн.

Скорость ПАВ составляет 3-4 км/сек, т.е. на 4 порядка меньше скорости электромагнитной волны. Этим обусловлены габариты устройств на ПАВ, меньшие на 2-3 порядка по сравнению с электромагнитными аналогами.

Простейший прибор на ПАВ изображен на рис. 1. На полированную пьезоэлектрическую пластину (кварц, ниобат лития, германат висмута и т.д.) напылена в вакууме металлическая гребенчатая структура или иначе встречно-штыревые преобразователи (ВШП). Когда электрический сигнал прикладывается к входному ВШП, он деформирует поверхность пьезоэлектрического кристалла, создавая бегущие поверхностные акустические волны (ПАВ), аналогичные волнам на гладкой поверхности водоема от брошенного камня. Когда ПАВ достигает выходного преобразователя, то ее механическая энергия преобразуется снова в электрическую. Каждая пара соседних электродов ВШП подсоединена к шинам разной полярности, поэтому во входном ВШП каждая пара электродов действует как источник механического сигнала, а в выходном – как источник электрического сигнала.

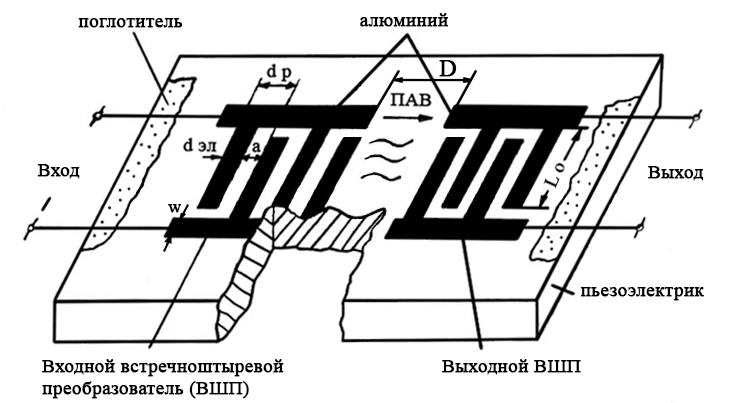
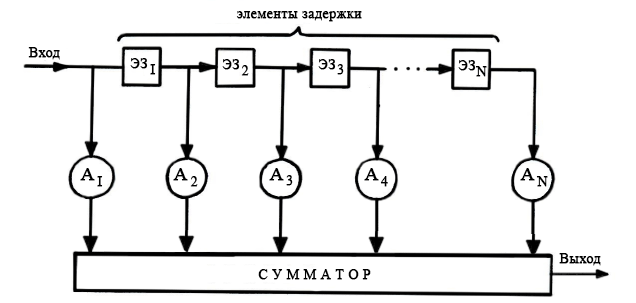


Рис. 1 Прибор на поверхностных акустических волнах (ПАВ)

Поскольку ПАВ распространяется от одной пары электродов к другой с конечной скоростью, сигнал повторно задерживается и суммируется, т.е. реализуется трансверсальный фильтр (рис. 2).

Амплитуда сигнала, снимаемого с каждой пары электродов, зависит от степени взаимного перекрытия электродов. Неравномерное перекрытие электродов называют аподизацией.

Применяя аподизацию, неэквидистатную (т.е. неравномерную) расстановку электродов ВШП, используя несколько ВШП можно получить самые разнообразные амплитудно-частотные характеристики устройств на ПАВ.



– весовые коэффициенты

Рис. 2. Трансверсальный фильтр

Устройства на ПАВ можно условно разделить на два класса: трансверсальные и резонаторные.

Трансверсальные устройства являются неминимально-фазовыми и позволяют при проектировании независимо задавать АЧХ и ФЧХ сложной формы, например, симметричную АЧХ и линейную фазу, или несимметричную АЧХ и нелинейную фазу.

К трансверсальным устройствам на ПАВ относятся: полосовые фильтры, взвешивающие фильтры, согласованные фильтры сложных сигналов (ЛЧМ, ФМ и ММС (Манипуляция с минимальным сдвигом)), линии задержки, дисперсионные линии задержки, дифференциаторы, частотные дискриминаторы, преобразователи Гильберта, трансформаторы, фазовращатели, аттенюаторы и т. д. [1]

Модель, описывающая в первом приближении трансверсальное устройство на ПАВ, близка к модели цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой (рис 2.).

Резонаторные устройства являются минимально-фазовыми и могут быть описаны в первом приближении на основе классической теории цепей.

К резонаторным устройствам относятся одно-входовые и двух-входовые резонаторы, полосовые лестничные (LDRF) и мостовые фильтры, полосовые фильтры на резонаторах с электрической или акустической связью (LCRF, TCRF), фильтры верхних и нижних частот, режекторные фильтры.

Импульсный отклик трансверсального ПАВ-фильтра совпадает с «пространственным образом» преобразователя. Примеры ПАВ-фильтры приведены на рис. 3.

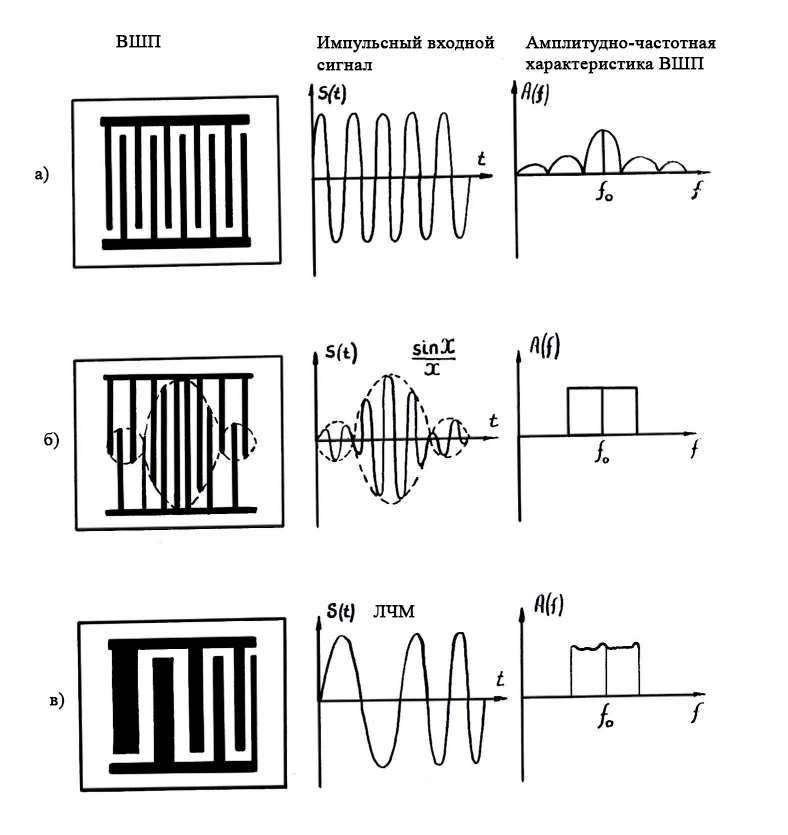


Рис. 3. Примеры ПАВ-фильтров (ЧИФ)

3. Преимущества и недостатки устройств на ПАВ   
и области их применения

Преимущества:

* чрезвычайно малые габариты (на 2-3 порядка по сравнению с электромагнитными аналогами);
* высокая температурная стабильность (0,5-1,0)⋅10-6 ед/°С для кварцевых подложек; (18-35)⋅10-6 ед/°С для танталат литиевых подложек; (50-90)⋅10-6 ед/°С для ниобат литиевых подложек;
* широкий диапазон рабочих частот (1,0 МГц – 10 ГГц);
* относительно малые вносимые потери 1,0-3,0 дБ при полосах пропускания 1-3 %;
* высокая надежность (50-100 тыс. часов), поскольку число соединений в них составляет 6-8 вместо нескольких сотен;
* высокая повторяемость параметров и низкая стоимость серийном производстве;
* отсутствие необходимости регулировки.

Недостатки:

* малая рассеиваемая мощность (типичная 15-50 мВт);
* высокие вносимые потери для трансверсальных устройств (10-20 дБ);
* чувствительность к электростатическому разряду;
* высокие требования к технологии при производстве
* высокие задержки прохождения сигнала.

Устройства на ПАВ находят самое широкое применение, например:

* Радиотелефоны и базовые станции систем связи стандартов GSM, AMPS, CD, IS-59, PHS, PCS, CDMA, W-CDMA, 3G, 4G и др., радиоудлинители стандартов DECT, WLAN и других (в 95% смартфонов используются 6-8 фильтров и резонаторов на ПАВ);
* мобильные системы связи (персональные и автомобильные радиостанции полиции, диспетчеров, военных);
* приемо-передатчики систем навигации GPS, GLONASS, GALILEO;
* устройства формирования и обработки сложных сигналов в РЛС дальнего и ближнего обнаружения; систем наведения на цель и сопровождения цели; управления воздушным движением;
* разведывательные приемники;
* бортовая и наземная аппаратура спутниковых систем связи;
* радиорелейные системы связи;
* системы телевидения, включая спутниковое и кабельное (канальные фильтры, фильтры для телевизоров, тюнеров, передатчиков, модуляторов);
* устройства дистанционного радиоуправления (замки, взрыватели и т.д.);
* устройства охраны, включая автомобильную сигнализацию;
* датчики давления, влаги, температуры, ускорения, парциального давления газов.

В 2008-2010 годах совокупный объем выпуска устройств на ПАВ в мире превысил 10 млрд.

4. Расчет элементов устройств на ПАВ

Резонансная частота ВШП связана с его геометрическими размерами и равна:

*,*

где – скорость распространения ПАВ, м/c; – период решетки ВШП, м. Ширина электродов обычно равна ‑ (см. рис. 1).

Отсюда видно, что верхняя граничная частота ПАВ определяется выбранным материалом пьезоэлектрика и разрешающей способностью получения зазора между электродами ВШП. В настоящее время изготовлены образцы с , равной единицам гигагерц.

Например, для – кварца – 3150 м/с и при = 1 мкм ≈ 1,5 ГГц. Минимальная частота ПАВ ограничена размерами пластин (кварц – 300 мм, ниобат лития – 150 мм) и равна единицам мегагерц.

Для ВШП с равномерной решеткой ширина полосы пропускания равна или в процентах , где – количество пар электродов.

Причем для каждого материала существует оптимальное и, следовательно, оптимальная , где – коэффициент электромеханической связи пьезоэлектрического кристалла, обеспечивающая минимальные вносимые потери.

Например, для – кварца – 20 и = 4%, а для ниобата лития – 4 и = 25% .

Коэффициент передачи устройств на ПАВ или его логарифмическая мера – вносимые потери – являются одним из основных параметров. В устройстве с одним входным и одним выходным ВШП минимальная величина вносимых потерь составляет 6 дБ. Физически это объясняется тем, что входной преобразователь излучает по направлению к выходному только половину мощности, а выходной, в силу взаимности, только половину принятой акустической мощности преобразует в электрический сигнал. Другая половина мощности вновь излучается в задерживающую среду. Для поглощения паразитных сигналов на концы звукопровода наносят поглощающий слой (см. рис. 1).

Для получения полосы преобразователя, более широкой по сравнению с оптимальной полосой, необходимо уменьшить число пар электродов, что естественно, приведет к увеличению вносимых потерь. На рис. 4 приведен график зависимости вносимых потерь от относительной полосы для не скольких пьезоэлектрических материалов.

После выбора пьезоэлектрического материала, среза и направления распространения ПАВ необходимо для обеспечения условий согласования сопротивлений уточнить длину электродов преобразователя.

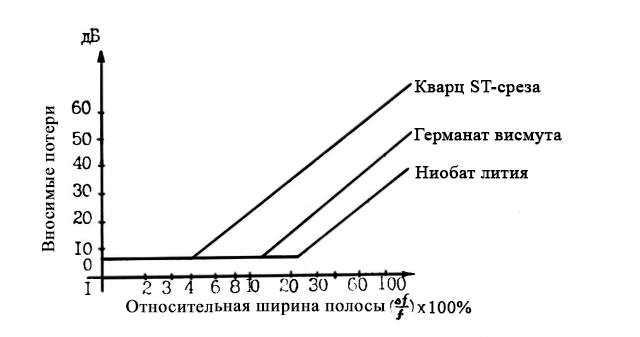


Рис. 4. Зависимость вносимых потерь на средней частоте от ширины полосы для различных материалов подложки

Для каждого материала существует число , равное количеству длин волн, укладывающихся в апертуре преобразователя; сопротивление излучения, т.е. выходное сопротивление ВШП измеряется в омах и будет равно:

Основные пьезоэлектрические материалы, используемые в устройствах на ПАВ, приведены в табл. 3.

5. Функциональные возможности ПАВ устройств

В настоящее время устройства на ПАВ применяются как полосовые фильтры в радиоприемниках, усилителях промежуточной частоты, синтезаторах частот, многоканальных приемках, где они заменяют кварцевые и многозвенные фильтры, требующие сложной методики подстройки.

Таблица 3

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Срез и направление распространения | Скорость ПАВ x103, м/с |  | , % |  |
| Ниобат лития | *Y* , *Z* | 3,48 | 4 | 24 | 108 |
| Ниобат лития | *Z* , *X* | 3,49 | 14 | 7 | 17 |
| Германат висмута | 001 , 110 | 1,68 | 8,5 | 12 | 90 |
| Германат висмута | 110 , 001 | 1,62 | 12 | 8,5 | 46 |
| Пьезокварц | *Y* , *X* | 3,26 | 19 | 5,3 | 53 |
| Пьезокварц *ST* | *Y+42̊* , *X* | 3,15 | 22 | 4,6 | 46 |
| Окись цинка (пленка) | *┴* , | 2,68 | 8 | 12 | 99 |
| Нитрид алюминия (пленка) | *X , Z* | 6,16 | 10 | 9,5 | 61 |

Фильтры на ПАВ изготавливаются по той же самой технологии, что и другие твердотельные приборы микроэлектроники, так что достичь низкой себестоимости и высокой воспроизводимости параметров нетрудно. После того, как фильтр разработан и изготовлен фотошаблон, характеристики изделий в процессе производства будут мало отличаться от партии к партии. В области частот от 30 до 500 МГц и при ширине полосы от 0,1 до 30% только фильтры на ПАВ одновременно удовлетворяют требованиям хорошей воспроизводимости, надежности, низкой стоимости, хорошей избирательности и малых размеров.

При построении полосовых фильтров на ПАВ обычно входной ВШП делают широкополосным, а выходной ВШП имеет заданную полосу, и амплитудно-частотная характеристика ПАВ-фильтра определяется только входным ВШП (см. рис. 5), хотя из принципа взаимности их можно поменять местами, что и делают при построении согласованных фильтров.

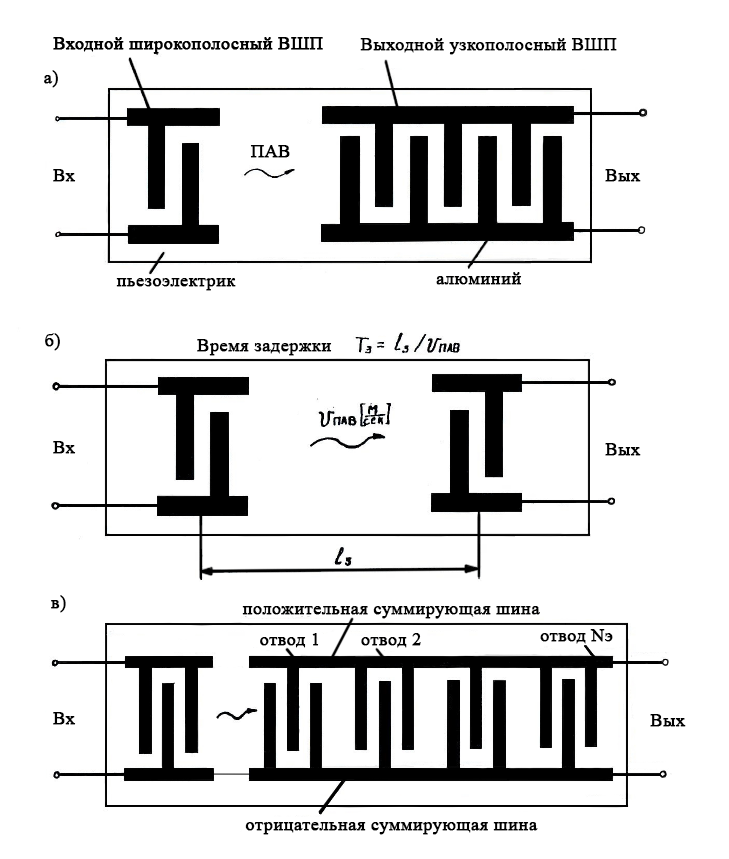


Рис. 5. Приборы на ПАВ: а) полосовой фильтр на ПАВ (ЧИФ); б) линия задержки на ПАВ; в) многоотводная линия задержки на ПАВ (СФ)

Вторым основным применением ПАВ являются линии задержки (ЛЗ). Они могут бить фиксированной задержкой (рис. 5б) и многоотводные (МЛЗ), имеющие несколько выходных ВШП, подключенных к суммирующим шинам (рис. 5в). Такие МЛЗ используются для обработки фазоманипулированных сигналов (ФМн), т.е. для согласованной фильтрации. Фаза отводов кодируется в соответствии со структурой обрабатываемого сигнала путем соответствующего соединения выходных ВШП с суммирующими шинами.

Развитие помехозащищенных систем передачи информации, РЛС, телеметрии поставило задачу обработки ФМн сложных сигналов (СлС) с большим количеством символов, т.е. , и с изменяющейся в процессе работы структурой кода фазовой манипуляции. Такую задачу решают согласованные фильтры на ПАВ. В них выходные ВШП соединяются с суммирующими шинами через переключающие диоды. Это позволяет управлять фазой каждого из отводов электродов путем подачи на диоды соответствующих положительных либо отрицательных управляющих сигналов.

Такие фильтры в литературе получили название программируемых, т.к. они путем электронной перестройки способны в зависимости от программы, которая задает соответствующее смещение на коммутирующих диодах, обрабатывать ФМн СлС различной кодовой структуры.

Существуют два основных типа программируемых согласованных фильтров (ПСФ) на ПАВ. На рис. 6 приведена схема ПС, в которой к обеим выводящим суммирующим шинам двухфазного ВШП подключены двухпозиционные переключатели, позволяющие при включении их по мостовой схеме устанавливать фазу каждого из отводов на или . На рис. 6б приведена электрическая схема звена такого ПСФ.

Для уменьшения потерь в ПСФ необходимо выполнять условия

и ,

где *R* – сопротивление цепи смещения, – прямое сопротивление диода, – емкость запертого диода, – частота. Например, при = 2 кОм, = 10 Ом, = 0,6 пФ потери составляют 0,1 дБ; повышение до 200 Ом приводит к возрастанию потерь до 0,8 дБ.

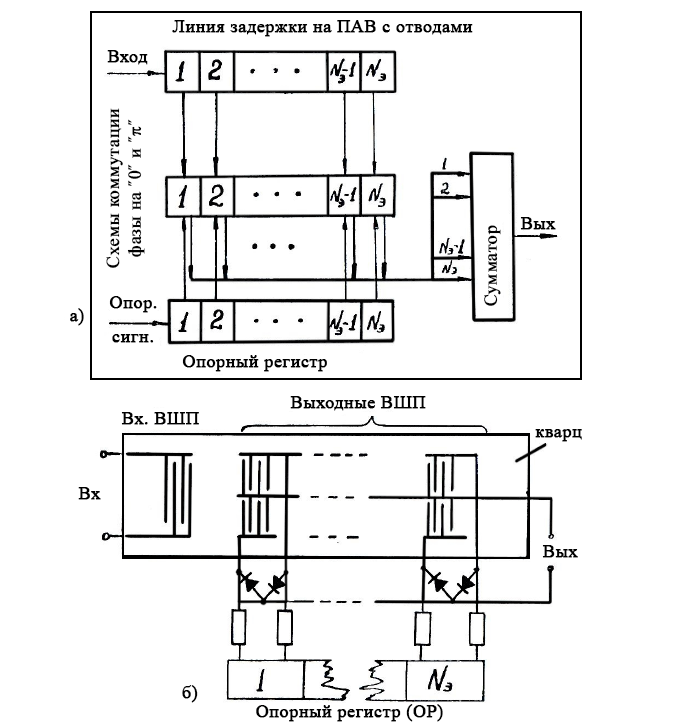


Рис. 6. Схема электронно-перестраиваемого, т.е. программируемого согласованного фильтра (ПСФ) на ПАВ; б) конструкция ПСФ на ПАВ

Для управления коммутирующими цепями (подачи соответствующего напряжения смущения на коммутирующие диоды) применяют опорный регистр сдвига (ОР) на триггерах, в который записана кодовая последовательность, в соответствии с которой произведена манипуляция фазы СлС в передающем устройстве.

При смене структуры кода в опорный регистр сдвига записывается другая последовательность.

Конструктивно ПСФ может быть выполнен в двух основных вариантах: гибридном (рис. 7) и монолитном (рис. 8). В гибридном варианте многоотводная ЛЗ (МЛЗ) на ПАВ напылена на пластине пьезоэлектрика (например, кварце), которая приклеена к диэлектрической подложке.

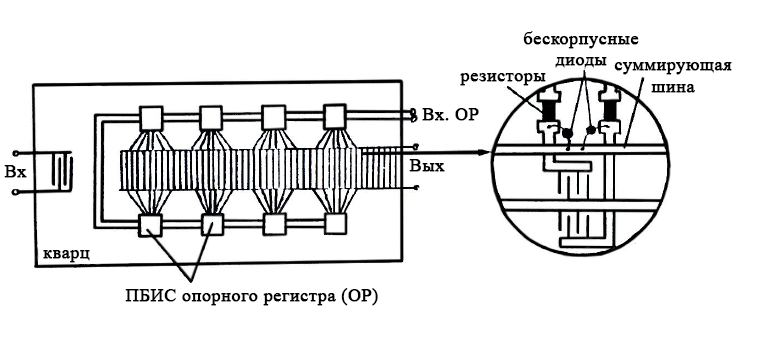


Рис. 7. Структурная схема гибридной конструкции программируемого СФ ФМн сложного сигнала

Кроме того, на ней размещены компоненты и элементы коммутирующей части схемы: бескорпусные диоды, тонкопленочные резисторы и полупроводниковые интегральные схемы для ОР сдвига.

Монолитный вариант (см. рис. 8) ПСФ выполняется на сапфировой подложке с выращенными двумя эпитаксиальными слоями: пьезоэлектрического слоя и слоя кремния. На пьезоэлектрическом слое (нитриде алюминия *AlN*) путем напыления алюминия изготавливается МЛЗ, а в слое кремния выполняется вся коммутирующая часть ПСФ.

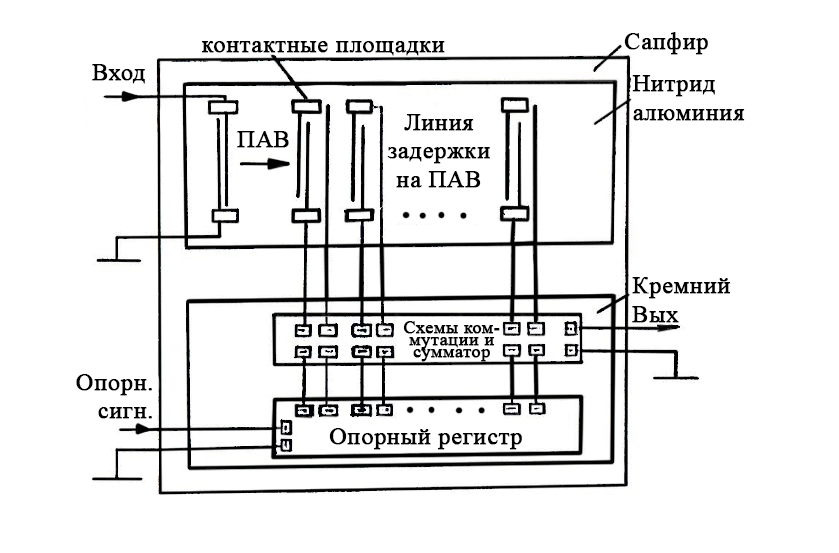


Рис. 8. Монолитная конструкция ПСФ ФМн сложного сигнала

6. Изготовление ВШП

Для металлизации звукопровода в качестве основного проводящего металла обычно используют алюминий толщиной 0,1-0,2 мкм, а для лучшей адгезии алюминия к звукопроводу применяют подслой металла, имеющего хорошую адгезию.

Например, для кварца применяют подслой ванадия. Толщина подслоя 0,01-0,02 мкм. Пленки металла наносятся вакуумным напылением. После напыления металлической пленки на звукопровод последний покрывают слоем фоторезиста и экспонируют через фотошаблон; производят проявление, а затем травление металлической пленки.

7. Пример расчета частотно-избирательного фильтра

Рассчитать частотно-избирательный фильтр с параметрами = 100 МГц; = 5,3 МГц; = 100 Ом.

1. Определяем относительную полосу пропускания

2. Из табл. 3 находим, что оптимальным материалом является пьезокварц со срезом *Y+42̊* , c направлением распространения – X,   
имеющий м/с, =19, = 5,3%, = 53.

3. Определим :

4. Период решетки:

5. Ширина электродов:

6. Определим длину электродов:

7. Количество пар электродов во входном ВШП:

8. Расстояние между входным и выходным ВШП:

9. Ширина суммирующих шин:

10. Расчет времени задержки:

8. Пример расчета согласованного фильтра ФМн СлС на ПАВ

Задание. Рассчитать СФ для ФНм СлС с = 127; то есть в СФ необходимо иметь 127 отводов электродов с теми же размерами, что и в п. 6.

1. Длительность элементарного импульса ФМн СлС:

2. Расстояние между отводами электродов согласованного фильтра:

3. Общая длина всех отводов электродов ВШП:

Литература

1. Речицкий В.И. Акусто-электронные радиокомпоненты. Элементы и устройства на поверхностных акустических волнах. – М.: Советское радио, 1980. – 262 с.

2. Варакин Л.В. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

3. Аристархов Г.М., Гуляев Ю.В., Дмитриев И.Н., Зайченко К.В., и др., Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства. // Под ред. акад. Ю.В. Гуляева, М: изд. «Радиотехника», 2020. -504с.