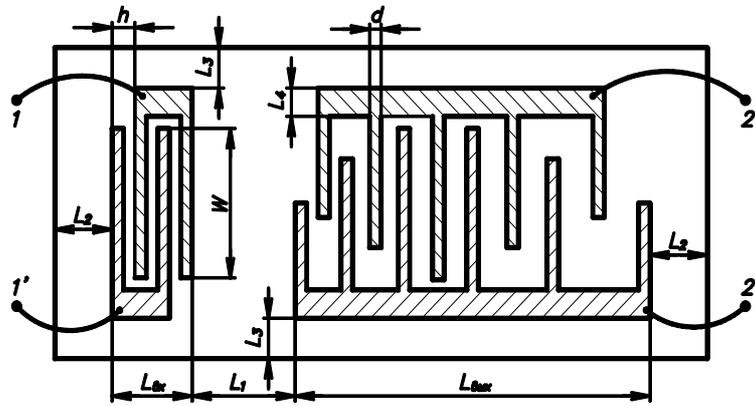


Т.И. ЧЕРНЫШОВА, Н.Г. ЧЕРНЫШОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ



◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

Т.И. ЧЕРНЫШОВА, Н.Г. ЧЕРНЫШОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНО- АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Издание второе, стереотипное

Рекомендовано УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебно-методического пособия для студентов специальностей 210201 и 210303 дневного и заочного отделений



Тамбов
Издательство ТГТУ
2008

УДК 621.382(075)
ББК 685.2я73-5
Ч-497

Рецензент

Доктор технических наук, профессор
кафедры «Автоматизированные системы и приборы» ТГТУ
А.А. Чуриков

Чернышова, Т.И.

Ч-497 Проектирование фильтров на поверхностно-акустических волнах : учебно-методическое пособие / Т.И. Чернышова, Н.Г. Чернышов. – 2-е изд., стер. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 48 с. – 50 экз.

Изложены основные этапы проектирования фильтров на поверхностно-акустических волнах. Приведена методика расчета фильтров, которая иллюстрируется примером.

Предназначено для курсового проектирования по дисциплине «Интегральные устройства радиоэлектроники» для студентов специальностей 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и 210303 «Бытовая радиоэлектронная аппаратура».

УДК 621.382(075)

ББК 685.2я73-5

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ГГТУ), 2008

Учебное издание

ЧЕРНЫШОВА Татьяна Ивановна,
ЧЕРНЫШОВ Николай Генрихович

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНО- АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Учебно-методическое пособие

Издание второе, стереотипное

Редактор О.М. Ярцева
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкova

Подписано в печать 3.10.2008.
Формат 60 × 84 / 16. 2,79 усл. печ. л.
Тираж 50 экз. Заказ № 436

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день акустоэлектроника является одним из активно развивающихся направлений функциональной электроники. Среди акустоэлектронных устройств широкое распространение получили устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Такие преимущества, как высокая надежность, малые масса и размеры, отсутствие энергопотребления, возможность выполнения различных операций обработки сигналов, реализация заданных технических характеристик, с высокой точностью обеспечивают широкое применение и массовую потребность в этих устройствах, и, прежде всего, рынком современных коммерческих средств связи.

Носителем информации в устройствах на ПАВ являются волны, у которых энергия упругих колебаний сосредоточена в тонком приповерхностном слое твердого тела. В качестве среды распространения используются пьезоэлектрические монокристаллы. Для преобразования электрических сигналов в акустические и обратно, а также для отражения и изменения траектории распространения акустических волн используются металлические структуры, нанесенные на поверхность пьезоэлектрической подложки. Возбуждение и прием акустических волн осуществляется с помощью входного и выходного преобразователей ПАВ, число электродов которых может быть различным (от единиц до нескольких тысяч).

Внешний вид устройства на ПАВ с одним встречно-штыревым преобразователем (ВШП) изображен на рис. 1. Отражательные структуры (ОС) ПАВ чаще представляют собой решетки металлических короткозамкнутых или разомкнутых электродов или систему вытравленных в подложке канавок. Доступность акустических волн на всем пути от входного до выходного преобразователя, способность отражаться от неоднородностей поверхности и взаимодействовать с электрическими и акустическими полями обеспечивают возможность построения различных устройств обработки сигналов.

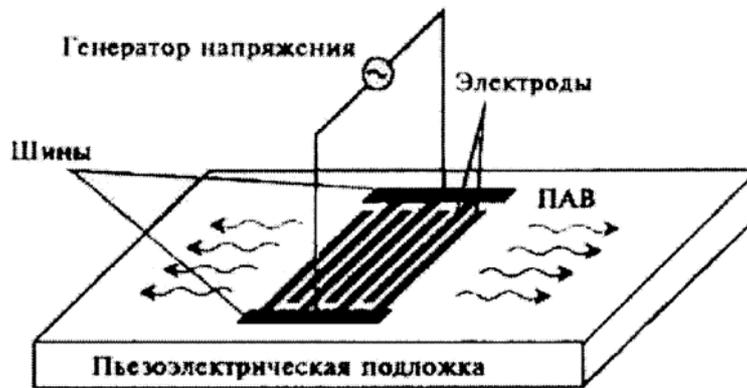


Рис. 1. Устройство на ПАВ

Характеристики устройств на ПАВ определяются свойствами материала подложки и его топологией, т.е. типом, количеством, взаимным расположением и геометрическими размерами преобразователей и отражателей ПАВ.

Топология устройства зависит не только от выполняемой операции обработки сигнала, но и от требуемых технических характеристик. Число различных вариантов топологий современных устройств на ПАВ исчисляется сотнями.

Устройства на ПАВ нашли применение в разнообразных радиоэлектронных системах, в частности в РЛС, в системах связи и радиовещания. Чаще всего такие устройства осуществляют процедуру линейной обработки сигналов, т.е. создают выходную реакцию, которая связана с входным сигналом с помощью заданного линейного соотношения. В теории систем такие устройства называют линейными фильтрами. Примерами служат линии задержки, полосовые фильтры, фильтры для корреляционной обработки сложных сигналов.

Фильтр на поверхностных акустических волнах (ПАВ) (рис. 2) является твердотельным функциональным устройством и представляет собой подложку из пьезоэлектрика 1, на поверхность которой методом фотолитографии наносятся системы токопроводящих элементов.

Одна из таких систем – излучающий преобразователь ПАВ 2 – подключается к источнику входного сигнала, другая – приемный преобразователь ПАВ 3 – к нагрузке.

Под действием высокочастотного электрического напряжения источника сигнала в зазорах между смежными электродами излучающего преобразователя возникает переменное электрическое поле, которое вследствие пьезоэффекта материала подложки вызывает механические колебания в ее поверхностном слое. Эти колебания распространяются в тонком приповерхностном слое подложки в направлениях, перпендикулярных электродам в виде поверхностных акустических волн.

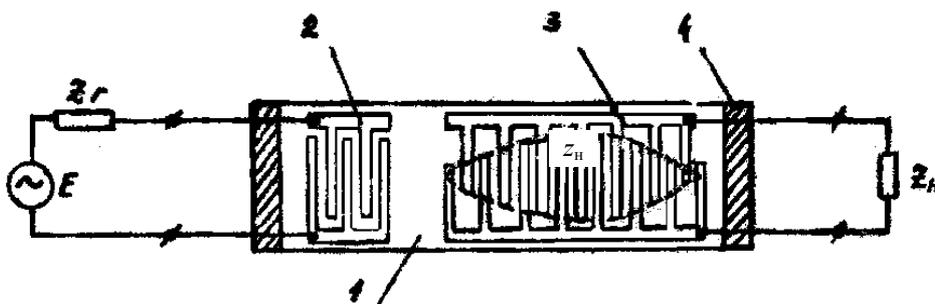


Рис. 2. Схема фильтра на поверхностных акустических волнах

Между смежными электродами приемного преобразователя вследствие обратного пьезоэффекта механические колебания ПАВ обуславливают появление электрического напряжения, которое и является выходным сигналом.

С целью устранения нежелательных отражений ПАВ от торцов подложки, а также с целью ослабления других типов акустических волн, которые могут быть возбуждены излучающим преобразователем ПАВ, все нерабочие грани и ее торцы покрываются специальным звукопоглощающим покрытием 4.

Для уменьшения вносимого затухания фильтра часто применяют специальные согласующие цепи, которые включаются между источником сигнала и излучающим преобразователем, а также между приемным преобразователем и нагрузкой (на рис. 2 согласующие цепи не показаны).

Подложка с преобразователями и согласующие цепи при необходимости помещаются в общий корпус, в качестве которого обычно используется один из унифицированных корпусов микросхем. Характеристики фильтра на ПАВ в основном определяются частотно-избирательными процессами преобразования электрического сигнала в акустические волны и обратно, т.е. зависят от топологии преобразователей ПАВ, а именно: от количества, геометрических размеров и взаимного расположения электродов в преобразователе, от протяженности зон перекрытия смежных электродов (протяженности зазоров), от очередности подсоединения электродов к общим суммирующим шинам. Применяя ту или иную топологию преобразователей, можно реализовать фильтры с самыми разнообразными характеристиками

По сравнению с другими типами фильтров, например, электрическими LC- или RC-типа, фильтры на ПАВ обладают следующими достоинствами:

- возможностью реализаций различных достаточно сложных по форме АЧХ и ФЧХ при высокой точности обеспечения заданных параметров;
- технологичностью изготовления, возможностью применения стандартных технологических процессов микроэлектроники;
- высокой стабильностью параметров в процессе эксплуатации и надежностью работы, объясняющиеся тем, что фильтр на ПАВ представляет собой монокристаллическое твердотельное устройство;
- хорошей сопрягаемостью с блоками микроэлектронной аппаратуры;
- малыми габаритами и весом.

К недостаткам фильтров на ПАВ относятся:

- повышенная стоимость, так как они строятся, как правило, на монокристаллической пьезоподложке;
- повышенный уровень вносимых потерь, так как их преобразователи обычно обладают двунаправленным излучением и приемом ПАВ, и поэтому менее одной четверти отдаваемой источником сигнала мощности достигает нагрузки.

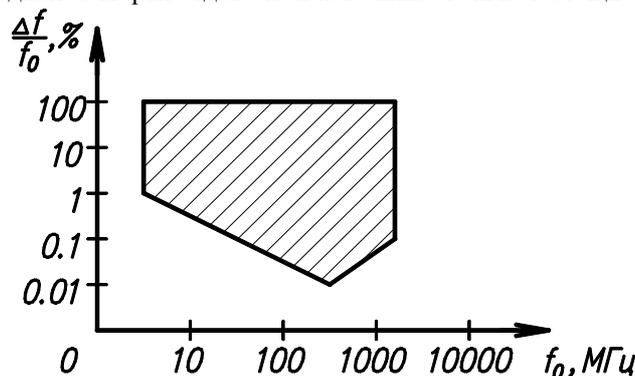


Рис. 3. Диапазон возможных параметров фильтров на ПАВ

Удачный набор достоинств фильтров на ПАВ в значительной мере компенсирует их недостатки, поэтому в настоящее время фильтры на ПАВ практически не имеют конкурентов в широком диапазоне частот.

На рис. 3 показан диапазон возможных параметров фильтров на ПАВ.

1. ЭТАПЫ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Основные этапы процесса проектирования фильтров ПАВ можно показать в виде схемы, представленной на рис. 4.

Первый этап содержит составление требований на фильтр ПАВ, которые чаще всего задаются в частотной области. Поэтому в первый этап включаются требования к параметрам АЧХ (отклонение от заданной формы в полосе частот $f_n < f < f_v$ и др.).

На первом этапе, кроме параметров АЧХ и ФЧХ, обычно задаются другие необходимые параметры, такие, как сопротивления генератора R_g и нагрузки R_n , между которыми будут работать фильтры, уровень сигнала $u_{вх}$, интервал рабочих температур, габариты, масса, стоимость и т.п. (в нашем случае не задаются).

На втором этапе производится выбор материала звукопровода, поскольку последним определяются основные параметры фильтра: средняя частота, вносимое затухание, затухание в полосе заграждения, уровень ложных сигналов, температурная и временная стабильность, стоимость и т.п. Требования к материалу звукопровода, одновременно отвечающему перечисленным параметрам, достаточно противоречивы, поэтому, прежде всего, необходимо определить, какой набор характеристик материала является решающим для реализации конкретного фильтра. Для типовых конструкций фильтров при выборе материала чаще ориентируются на величину вносимого затухания и температурную стабильность, но для фильтров с жесткими или специальными характеристиками критерии выбора сложнее.

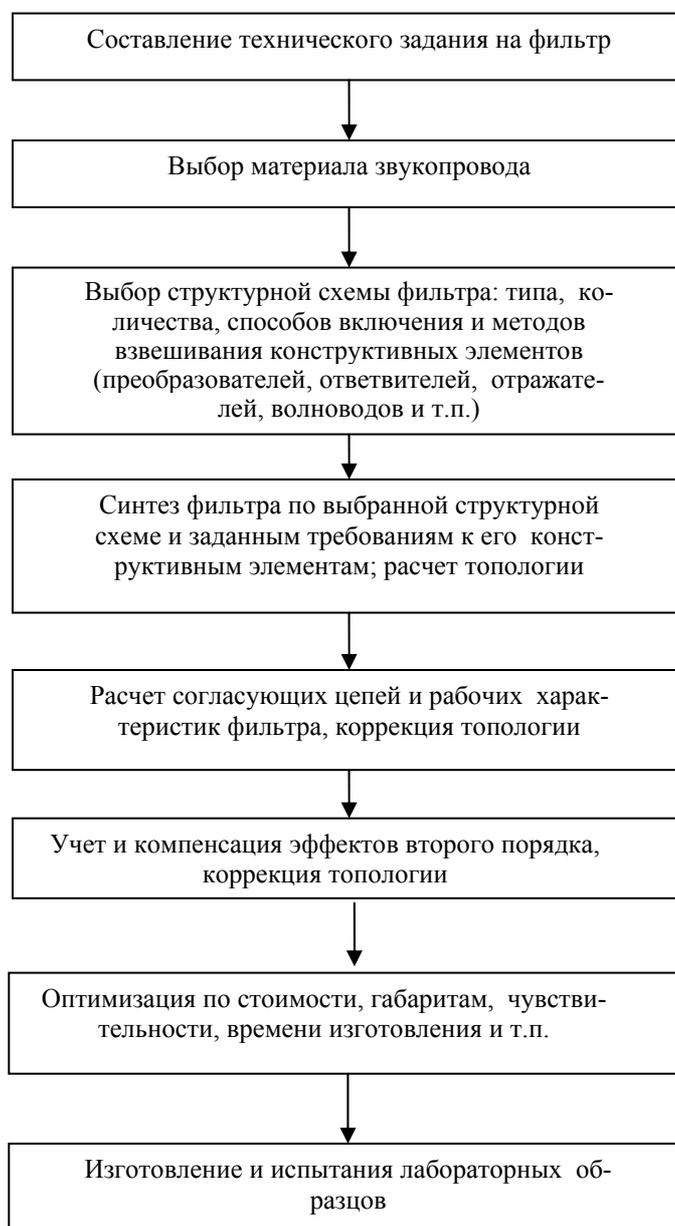


Рис. 4. Основные этапы процесса проектирования фильтров ПАВ

Результатом второго этапа должно быть нахождение основных характеристик материала звукопровода: скорости ПАВ, коэффициента электромеханической связи, угла отклонения потока энергии, коэффициента анизотропии, акустического сопротивления, температурных коэффициентов скорости и задержки, диэлектрической проницаемости.

На третьем этапе устанавливается структурная схема фильтра ПАВ. Как уже отмечалось, передаточные свойства фильтра ПАВ определяются, в основном, преобразователями. Поэтому в первую очередь необходимо выбрать типы и конструкции преобразователей, их количество, способ включения, а также методы взвешивания электродов преобразователей, от которых зависят предельные реализуемые параметры последних.

Кроме того, звукопровод как передаточная среда для акустического сигнала оказывает определенное влияние на избирательные свойства фильтра. Поскольку передаточная функция или импульсная характеристика фильтра в целом зависит от всех конструктивных элементов, входящих в его структурную схему, результатом третьего этапа должно быть составление технических требований на каждый из этих элементов.

После определения структурной схемы задача синтеза фильтра ПАВ, выполняемая на четвертом этапе, сводится к синтезу преобразователей и других конструктивных элементов по заданным параметрам. Поскольку на этом этапе оперируют с параметрами, определяемыми только собственными свойствами преобразователей без учета реальных нагрузок и эффектов второго порядка, то четвертый этап можно назвать синтезом по характеристическим параметрам. На этом этапе выбираются физико-математическая модель (или модели), описывающая работу преобразователей и других конструктивных элементов фильтра с необходимой для конкретного случая точностью, методы расчета частотных и временных характеристик, а также топологии конструктивных элементов и критерии близости рассчитанных характеристик к заданным.

Результатом решения первой задачи синтеза (аппроксимации) должно быть нахождение реализуемых передаточных функций и импульсных характеристик конструктивных элементов, удовлетворяющих заданным критериям близости. Результатом же решения второй задачи синтеза (реализации) должен быть расчет топологии конструктивных элементов и фильтра ПАВ в целом, отвечающих требованиям, заданным на первом и третьем этапах. Ввиду ограниченности объема здесь будут рассматриваться расчеты электрических характеристик и топологии только встречно-штыревых преобразователей ПАВ, наиболее часто используемых при проектировании фильтров.

Входное и выходное сопротивления фильтра ПАВ зависят от апертур входного и выходного ВШП, который совместно с контактными площадками и технологическими полями определяет ширину звукопровода. Требования же к габаритам звукопровода часто диктуются его стоимостью, типом корпуса, в котором будет размещен фильтр ПАВ и др. Поэтому обычно сопротивления фильтра ПАВ отличаются от сопротивления нагрузок, и на его входе и выходе используются активные или пассивные согласующие цепи. Основной целью пятого этапа является выбор типа согласующей цепи и расчет рабочих параметров фильтра при нагружении на реальные сопротивления.

Если согласующие цепи относительно широкополосны и их основная задача состоит в уменьшении вносимого затухания фильтра, то на этом этапе проектирования обычно достаточно лишь учесть их влияние на рабочую передаточную функцию фильтра ПАВ. При выходе рабочих параметров за пределы поля допуска возможна коррекция топологии преобразователей, составляющих фильтр. Поскольку влияние широкополосных согласующих цепей на форму АЧХ и ФЧХ фильтра мало, то коррекция топологии преобразователей в этом случае также будет сравнительно слабой и монотонной, что не скажется сильно на характере последующих коррекций, необходимых, например, для учета влияния эффектов второго порядка.

Если согласующие цепи сравнительно узкополосны и они вносят существенный вклад в формирование общей передаточной функции фильтра, то уже на этапе выбора структурной схемы заданную общую передаточную функцию фильтра следует разделить на составляющие передаточные функции преобразователей, других конструктивных элементов и согласующих цепей. В таком случае после расчета рабочих параметров на пятом этапе обычно требуется лишь сравнительно незначительная корректировка топологии преобразователей для удовлетворения требований к форме АЧХ и ФЧХ.

Пренебрежение влиянием согласующих цепей может привести к сильным искажениям формы АЧХ и ФЧХ и вызвать коренную перестройку фильтра.

Результатом пятого этапа проектирования должны быть электрические схемы входной и выходной согласующих цепей, расчет их элементов, частотных и временных характеристик, а также определение рабочих передаточных функций, импульсных характеристик, сопротивлений и расчет топологии всех конструктивных элементов и фильтра в целом, отвечающих заданным требованиям.

На частотные и временные характеристики фильтра ПАВ эффекты второго порядка оказывают существенное влияние, поэтому практически невозможно создание высококачественного устройства без учета и компенсации этих эффектов. Например, на пульсации АЧХ и ФЧХ в полосе пропускания влияют, в первую очередь, электромагнитная наводка, всевозможные отражения и паразитные ОАВ. Затухание же в полосе заграждения определяется в основном дифракцией ПАВ, электромагнитной наводкой, генерацией паразитных ОАВ, технологическими погрешностями. Коэффициент прямоугольности ухудшается вследствие дифракции и, особенно в широкополосных фильтрах, из-за генерации ОАВ. На режекции в заданных нулях АЧХ существенно сказываются технологические погрешности и др.

Характер эффектов второго порядка зависит в основном от материала звукопровода, конструкции преобразователей и режимов согласования. Поэтому учет эффектов второго порядка производится на шестом этапе после определения топологии фильтра и вида согласующих цепей.

Причины возникновения этих эффектов, методы расчета и способы их уменьшения весьма разнообразны и часто для различных эффектов противоречат друг другу. Поэтому уже на первом этапе проектирования необходимо выделить сравнительно узкий перечень параметров, наиболее важных для конкретного фильтра, например затухание в полосе заграждения, а на втором и третьем этапах определить пути (конструктивные или расчетно-аналитические) уменьшения искажений из-за каждого эффекта, влияющего на выделенные параметры, например дифракции, электромагнитной наводки и паразитных ОАВ. Кроме того, на третьем этапе следует выдирать конструкции преобразователей и других элементов в фильтрах, минимизирующих одни эффекты, например материалы звукопроводов с низким уровнем паразитных объемных мод или конструкции экранов, снижающих электромагнитную наводку. Тогда на рассматриваемом шестом этапе возможно уже независимо провести компенсацию влияния других эффектов, например, путем корректировки топологии преобразователей.

Если не принималось мер для уменьшения того или иного эффекта, на шестом этапе следует оценить степень его влияния на заданные параметры преобразователей и фильтра в целом.

Результатом проектирования на шестом этапе должно быть определение окончательной структурной схемы фильтра ПАВ, включая конструкции образующих его элементов и согласующие цепи: расчет рабочих параметров с учетом эффектов второго порядка и расчет топологии всех конструктивных элементов фильтра, в том числе топологии преобразователей, скорректированной для компенсации влияния некоторых из эффектов.

При необходимости в процессе проектирования может быть введен самостоятельный (седьмой) этап оптимизации конструкции фильтра по стоимости, габаритам, массе, чувствительности к технологическим погрешностям, времени изготовления фотошаблонов или выпуска документации и т.д. После этого можно изготавливать и испытывать лабораторный образец в качестве прототипа для дальнейших экспериментальных исследований и доработки фильтра (восьмой этап).

В последующих главах в основном рассматриваются задачи, введенные на первом – четвертом этапах.

2. ОБЗОР И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Основным конструктивным элементом любого акустоэлектронного устройства на ПАВ является преобразователь. Для возбуждения и приема ПАВ предложено множество способов, которые сводятся к созданию пространственно-периодической системы переменных упругих деформаций на поверхности твердого тела. Примеры основных конструкций ВШП приведены в табл. 1.

1. Основные конструкции ВШП для фильтров на ПАВ

Тип ВШП и способ взвешивания	Конструкция	Достоинства	Недостатки
1. Неаподизованный эквидистантный (без взвешивания)		Простота расчета	Плохая прямоугольность, большой уровень боковых лепестков

2. Неаподизованный с расщепленными электродами (без взвешивания)		Малый коэффициент отражения	Большая вероятность дефектов изготовления
3. Аподизованный эквидистантный (взвешивание изменением длины электродов)		Высокий коэффициент прямоугольности, полоса до 30 %	Искажение фазового фронта ПАВ и чувствительность к дифракции
4. Аподизованный с пассивными электродами вне зоны перекрытия электродов		Снижение фазовых искажений фронта	Искажение АЧХ из-за отражений от пассивных электродов, чувствительность к дифракции ПАВ
5. Аподизованный с расщепленными индивидуально взвешенными электродами		Малый коэффициент отражения, возможность реализации сложных АЧХ	Большая вероятность дефектов изготовления
6. Аподизованный с изломом электродов вне зоны перекрытия		Малый коэффициент отражения	Чувствительность к дифракции

Продолжение табл. 1

Тип ВШП и способ взвешивания	Конструкция	Достоинства	Недостатки
7. Аподизованный секционированный (изменение длины и периодическое прореживание электродов)		Малый коэффициент отражения	Ангармонические отклики в АЧХ
8. Аподизованный с металлизацией вне зоны перекрытия		Малый коэффициент отражения	Дисперсия ПАВ
9. Аподизованный с малым взвешиванием электродов		Уменьшение отражения и переотражения	Фазовые искажения фронта ПАВ
10. Со ступенчатым фронтом излучения		Возможность подавления объемных волн	Дифракция парциальных пучков
11. Однонаправленный (сдвиг двух половин ВШП на 90°)		Высокочастотность	Узкая полоса, большой уровень боковых лепестков
12. Модифицированный однонаправленный		Широкополосность	Верхняя граничная частота ниже в 2 раза
13. Со взвешиванием ширины электродов		Однородность звукового пучка по апертуре	Недостаточный выбор реализуемых АЧХ, большой уровень боковых лепестков
14. Со взвешиванием селективным удалением электродов		Снижение фазовых искажений фронта и дифракции	Увеличение уровня боковых лепестков при расстройке
15. Наклонный		Снижение акустических отражений	Высокие вносимые потери

Продолжение табл. 1

Тип ВШП и способ взвешивания	Конструкция	Достоинства	Недостатки
16. Эквидистантно-групповой (изменение периода)		Уменьшение дифракции	Большой уровень боковых лепестков

17. Неэквидистантный неаподизованный (взвешивание периода электродов вдоль направления распространения ПАВ)		Широкополосная дисперсия	Изрезанность фазовой характеристики, большой уровень боковых лепестков
18. Неэквидистантный аподизованный (изменение периода и длины электродов)		Возможность управления видом АЧХ	Дискретная изрезанность фазовой характеристики
19. Веерный неаподизованный (со взвешиванием периода электродов поперек направления распространения ПАВ)		Высокий коэффициент прямоугольности	Большой уровень боковых лепестков
20. Веерный аподизованный (изменение периода и длины электродов)		Высокий коэффициент прямоугольности	Большой уровень боковых лепестков
21. С емкостным взвешиванием		Отсутствие дифракции, малое взаимное влияние электродов	Необходимость подавления противозазного излучения
22. С последовательным взвешиванием электродов		Слабая чувствительность к замыканиям, снижение дифракции	Ангармонические отклики в АЧХ
23. Дифракционный		Малая чувствительность к разрывам электродов, повышение уровня допустимой мощности	Малая эффективность преобразования

Окончание табл. 1

Тип ВШП и способ взвешивания	Конструкция	Достоинства	Недостатки
24. С пьезоэлектрическим слоем		Возможность использования аморфных подложек, управления эффективностью	Дисперсия, усложнение технологии
25. С акустическим согласующим слоем		Уменьшение потерь преобразования	Усложнение технологии

Наиболее простым и эффективным является возбуждение и прием ПАВ с помощью ВШП, представляющего собой двухфазную решетку (табл. 1, преобразователь 1) и состоящего из двух гребенок тонкопленочных металлических электродов, вложенных друг в друга и расположенных на поверхности звукопровода. Каждая пара электродов такого преобразователя вследствие обратного пьезоэффекта возбуждает две полезные бегущие поверхностные волны, распространяющиеся во взаимно противоположных направлениях, и несколько паразитных, объемных мод, распространяющихся под углом к поверхности звукопровода. Суммарная ПАВ на выходе передающего ВШП является суперпозицией парциальных волн, амплитуды которых зависят от величины перекрытия излучающих пар электродов, а фазы определяются взаимным положением последних. Наибольшая интенсивность возбуждения ПАВ наблюдается при условии акустического синхронизма, когда период подводимого сигнала соответствует периоду решетки преобразователя. Изменяя топологию (число электродов, их пространственный период, длину, ширину и т.п.), можно варьировать частотные характеристики ВШП. Простота реализации разнообразных частотных характеристик ВШП и предопределила широкое его использование при построении фильтров ПАВ.

В простейшем эквидистантном ВШП, имеющем неизменный пространственный полупериод электродов $h_n = \lambda_0/2$ и постоянной длину электродов, парциальные волны складываются в фазе с одинаковой амплитудой. В результате АЧХ такого преобразователя, близкая к огибающей спектра прямоугольного радиоимпульса с частотой заполнения ω_0 , равной частоте акустического синхронизма ВШП, имеет вид $\sin x/x$ с уровнем ближайших боковых лепестков a_6 не лучше $-13,6$ дБ. С целью увеличения избирательности ВШП и реализаций разнообразных частотных характеристик предложено множество конструкций ВШП для весовой обработки амплитуд и фаз парциальных волн. Далеко не полный перечень конструкций ВШП, используемых в фильтрах ПАВ, приведен в табл. 1. Большое разнообразие методов взвешивания ВШП и их модификаций обусловлено в основном ограниченностью получаемых частотных характеристик и чувствительностью к эффектам второго порядка (отражениям, дифракции, искажению фазового фронта ПАВ и др.)

Наиболее просто взвешивание осуществляется в аподизованном ВШП (табл. 1, преобразователь 3), в котором варьирование амплитуд парциальных ПАВ производится изменением перекрытия (длины) соседних электродов в соответствии с заданной импульсной характеристикой. Этот вид взвешивания может рассматриваться как амплитудно-импульсная модуляция сигнала. Преимуществом метода является высокая разрешающая способность, поскольку взвешивание может произво-

даться непрерывно в широком диапазоне. Кроме того, это наиболее простой и легко воспроизводимый метод для регулирования каждого полупериода требуемой импульсной характеристики.

Одной из главных проблем, присущих методу взвешивания изменением длины электродов, является точное воспроизведение малых амплитуд, что требуется для реализации затухания в полосе заграждения свыше $a_{\text{тап}} = 50 \dots 60$ дБ. Это ограничение связано с действием эффекта дифракции пучка ПАВ от малых апертур. Искажения же амплитудного и фазового фронтов ПАВ в аподизованном ВШП практически исключают возможность использования двух подобных ВШП в одном фильтре с целью перемножения их передаточных функций и ослабления требований к каждому преобразователю. Обойти эту проблему позволяет применение второго ВШП со сравнительно плоским фронтом излучаемых ПАВ (например, преобразователи 1, 2, 11, 13, 14, 16, 17, 19, 21, 23 в табл. 1).

Поскольку полоса пропускания ВШП обратно пропорциональна числу его электродов, то в эквидистантном аподизованном ВШП сильно возрастают отражения от многоэлектродной структуры при полосах менее $\Delta f_3 / f_0 = 2 \dots 5$ %. Наоборот, при $\Delta f_3 / f_0 > 30$ % отражения малы, но нарушается непрерывность воспроизведения заданной импульсной характеристики, что также приводит к искажению АЧХ. Отражения можно снизить, применив структуры ВШП с расщепленными электродами, с изломом электродов вне зоны перекрытия или секционированные ВШП с периодическим прореживанием электродов (табл. 1, преобразователи, соответственно, 2, 6, 7). Однако из-за дополнительной дискретизации импульсной характеристики в АЧХ секционированных ВШП появляются ангармонические отклики, подавить которые до уровня (40...50) дБ относительно основного сложно. Переход на более высокие гармоники позволяет также уменьшить реализуемую полосу пропускания при одновременном снижении искажений из-за отражений.

С целью снижения потерь, обусловленных двунаправленностью получения ПАВ, используют однонаправленные ВШП (табл. 1, преобразователи 11, 12), одна из половин которого смещена на половину длины волны и служит отражателем для обратной ПАВ. Поскольку для повышения эффективности отражения требуется большое количество электродов, этот тип преобразователя является узкополосным.

Эффективность возбуждения ВШП зависит от ширины электродов, поэтому, изменяя ширину электродов вдоль направления распространения ПАВ (табл. 1, преобразователь 13), можно равномерно взвесить преобразователь в соответствии с заданной импульсной характеристикой. Этот метод взвешивания может рассматриваться как широтно-импульсная модуляция сигнала. Основным недостатком этого метода взвешивания является чувствительность к технологическим погрешностям и требование высокой разрешающей способности фотолитографии при изготовлении. Последнее обусловлено тем, что малые величины взвешивания реализуются при очень узких электродах. Это означает, что взвешивание изменением ширины может использоваться только в низкочастотных устройствах. Кроме того, диапазон взвешивания амплитуд парциальных волн очень мал и не превышает $2,5 : 1$, что существенно ограничивает класс реализуемых частотных характеристик.

Можно частично обойти указанные проблемы, используя ВШП с переменной шириной, работающие на пространственных гармониках, что позволяет осуществлять взвешивание не только амплитуд, но и фаз возбуждаемых ПАВ.

Взвешивание при селективном удалении электродов (табл. 1, преобразователь 14) осуществляется благодаря возникшему при этом перераспределению зарядов между электродами. Метод аналогичен комбинации время-импульсной и широтно-импульсной модуляции сигнала. Вследствие дополнительной дискретизации импульсной характеристики и интерференции волн от различных групп электродов в АЧХ преобразователя возникает ряд ангармонических откликов, имеющих уровень до $a_6 = (35 \dots 40)$ дБ вблизи полосы пропускания и увеличивающихся до $a_6 = (15 \dots 20)$ дБ при расстройке на 8 – 10 полос. Взвешивание селективным удалением электродов точнее аппроксимирует заданную импульсную характеристику при увеличении числа электродов. Поэтому метод лучше подходит для реализации узких полос пропускания.

Значительно расширить полосу пропускания по сравнению с эквидистантными ВШП возможно путем взвешивания пространственного периода электродов вдоль или поперек направления распространения ПАВ (табл. 1, преобразователи 16 – 20). Реализация заданных передаточных функций неэквидистантного ВШП со взвешиванием периода вдоль направления распространения ПАВ аналогична получению спектра сигнала с комбинацией частотной и широтно-импульсной модуляцией. Вследствие френелевских пульсаций АЧХ такого ВШП сильно изрезана. Кроме того, при несимметричном взвешивании ФЧХ преобразователя нелинейна и также пульсирует. Снизить пульсации АЧХ и ФЧХ возможно путем дополнительного амплитудного взвешивания (табл. 1, преобразователь 18), приводящего к ухудшению прямоуглольности. Реализация сравнительно узких полос пропускания (менее 5...10 %) с помощью неэквидистантных ВШП затруднена, так как при этом требуется высокая разрешающая способность технологического оборудования для обеспечения малых отличий соседних периодов.

В веерных ВШП со взвешиванием периода электродов поперек направления распространения все электроды наклонены на малый угол Θ , который равен нулю в центре и возрастает до $\Theta_{\text{макс}}$ на краях преобразователя. Вследствие расхождения пучка ПАВ, вызывающего провал в АЧХ, угол $\Theta_{\text{макс}}$ ограничен $3 \dots 5^\circ$. Веерные преобразователи позволяют реализовать взвешивание $\sin x/x$, что определяет высокую прямоуглольность их АЧХ. С целью увеличения избирательности возможно использование дополнительного слабого амплитудного взвешивания изменением длины электродов. К недостаткам веерных ВШП следует отнести увеличение отражений при полосах пропускания менее 3 %.

Обеспечить сравнительно плоский фронт излучаемой ПАВ при взвешивании амплитуд парциальных волн можно путем изменения напряжения, подаваемого на электроды. Наиболее просто изменять напряжение на излучающих электродах в основном ряду можно с помощью емкостного делителя, подобного аподизованному ВШП, но работающего на другой частоте. Перекрытие электродов в дополнительном ряду емкостного делителя полностью определяют потенциалы на нижнем электроде в основном ряду (табл. 1, преобразователь 21). Благодаря плоскому излучаемому фронту возможно использование в фильтре ПАВ двух ВШП с емкостным взвешиванием с целью повышения избирательности. Недостатком подобных ВШП является трудность реализации сложных форм АЧХ и ФЧХ.

Другим вариантом взвешивания по напряжению является деление каждого отвода, образованного парой противофазных электродов на несколько элементов (табл. 1, преобразователь 22). Элементы электрически связаны последовательно, обеспечивая деление напряжения на отводах. Когда расстояние между отводами большое, напряжение в зазоре пропорционально числу отрезков в отводе. Из этого следует, что может быть реализовано только дискретное множество амплитудных весовых функций. Метод последовательного взвешивания, по сравнению со взвешиванием селективным удалением электродов, позволяет более точно воспроизвести заданную импульсную характеристику, в частности, при малых амплитудах. Это позво-

ляет использовать в одном ВШП комбинацию последовательного взвешивания для реализации малых амплитуд и изменение длины электродов для больших амплитуд.

Применение тех или иных конструкций ВШП с различными методами взвешивания определяется кругом требований к параметрам фильтра ПАВ. Типичные параметры, реализуемые ВШП, наиболее часто используемых конструкций сведены в табл. III.

Представленные в табл. I и III сведения могут служить руководством при выборе типа ВШП для проектируемого фильтра ПАВ по конкретным требованиям.

3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФИЛЬТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

3.1. Конструирование и технология изготовления звукопроводов фильтров

Наиболее распространенная общая схема изготовления фильтров ПАВ включает в себя следующие основные технологические операции: изготовление пьезоэлектрического звукопровода, изготовление фотооригинала и фотошаблона, металлизация звукопровода, формирование встречно-штыревых структур преобразователей и контактных шин, монтаж, сборка и герметизация фильтра.

Основные параметры фильтров ПАВ: рабочая частота, полоса пропускания, вносимое затухание, температурная стабильность, искажения из-за эффектов второго порядка и т.п. – определяются, в первую очередь, характеристиками материала звукопровода. Поэтому для каждой конструкции выбор материала звукопровода необходимо проводить, исходя из конкретных заданных характеристик фильтра. Для звукопровода могут быть использованы как монокристаллические, так и поликристаллические (пьезокерамические) материалы. Монокристаллы отличаются совершенством структуры, обеспечивающей малые потери на распространение ПАВ (около 0,1...0,5 дБ/см на частотах до 2 ГГц). Кроме того, они стабильны во времени, при серийном изготовлении имеют высокую воспроизводимость параметров.

В фильтрах с полосой до $\Delta f_3 / f_0 = 2...5\%$ наиболее широко используется кварц SiO_2 различных срезов, так как малый коэффициент электромеханической связи позволяет получить низкий уровень отраженных сигналов даже при числе электродов более 200 – 300. Кроме того, кварц отличается высокой температурной стабильностью, и поэтому могут быть получены кристаллы, позволяющие создать звукопроводы длиной 100...200 мм.

Для звукопроводов фильтров с полосой до $\Delta f_3 / f_0 = 50...60\%$ применяется в основном ниобат лития LiNbO_3 , который благодаря большому коэффициенту электромеханической связи k_s позволяет уменьшить затухание в фильтре при числе электродов не более 10.

Из монокристаллических материалов к числу перспективных для использования в фильтрах ПАВ можно отнести танталат лития LiTaO_3 , германат висмута $\text{Bi}_2\text{GeO}_{20}$, парателлурид TeO_2 , селен Se, а также пленки окиси цинка ZnO и нитрида алюминия AlN на сапфире и некоторые другие. Танталат лития LiTaO_3 является пока единственным материалом, в котором высокая пьезоэлектрическая активность сочетается с хорошей термостабильностью. Поэтому LiTaO_3 в первую очередь представляет интерес для термостабильных фильтров. Германат висмута $\text{Bi}_2\text{GeO}_{20}$ является подходящим материалом для линий задержки на большие длительности из-за очень низкой скорости распространения ПАВ и для фильтров со сложной встречно-штыревой структурой благодаря относительно большим размерам выпускаемых кристаллов. Недостатком $\text{Bi}_2\text{GeO}_{20}$ является высокий ТКЗ. Сочетание низкой скорости и хорошей термостабильности парателлурида TeO_2 делает его перспективным материалом для малогабаритных термостабильных устройств на ПАВ. Интересным для использования в устройствах, управляемых светом, является селен Se, который наряду с высокими пьезоэлектрическими свойствами обладает полупроводниковыми свойствами и фотопроводимостью. Пленки окиси цинка ZnO и нитрида алюминия AlN на сапфире дают возможность использовать непьезоэлектрический материал (сапфир) как в качестве собственно звукопровода фильтра, так и подложки для формирования структуры усилительных каскадов, например, в частотно-избирательных микросборках на основе фильтров ПАВ. Благодаря высокой скорости ПАВ пленки AlN перспективны для высокочастотных фильтров.

Кроме монокристаллических пьезоэлектриков, для изготовления звукопроводов фильтров ПАВ могут найти применение поликристаллические материалы. Пьезокерамики почти на порядок дешевле монокристаллов, их свойства легко управляются путем изменения химического состава и введения модификаторов. Кроме того, из пьезокерамики возможно изготовление заготовок для звукопроводов различной конфигурации, в том числе и крупногабаритных.

Принципиальными недостатками пьезокерамик, по сравнению с монокристаллами, является значительное затухание распространяющихся ПАВ, резко увеличивающееся с частотой, и пористость поверхности, приводящая к замыканию электродов преобразователей фильтра после металлизации и фотолитографии. Оба эти недостатка объясняются зернистостью структуры пьезокерамик.

Технологический процесс изготовления звукопроводов фильтров ПАВ в случае использования монокристаллических материалов состоит из следующих основных операций: ориентировки кристаллов и распиловки, предварительной шлифовки заготовок по контуру и по плоскости, точной шлифовки по плоскости, полировки рабочей плоскости. Звукопроводы из пьезокерамики перед распиловкой или шлифовкой поляризуются. При необходимости на нерабочей плоскости звукопроводов выполняются скосы, насечки, канавки и т.д., а торцевые ребра звукопроводов закругляются по радиусу или на них также наносится насечки. Пазы, прорезы, насечки выполняются алмазными дисками с внешней режущей кромкой или ультразвуком.

После ориентировки монокристаллы распиливаются сначала на параллельные секции, положения главных плоскостей которых относительно кристаллографических осей определяются необходимым направлением среза. Затем секции разрезаются на заготовки по габаритам, соответствующим отдельным звукопроводам.

К качеству обработки рабочей поверхности звукопровода предъявляются высокие требования. Например, на ней должны отсутствовать царапины, сколы, раковины; чистота рабочей поверхности должна соответствовать классу $\nabla 13 - \nabla 14$ при неплоскостности не более 0,1...0,5 мкм. Эти требования объясняются рядом причин. Хорошая плоскостность поверхности обеспечивает плотное прилегание фотошаблона в процессе фотолитографии. Это, в свою очередь, позволяет повысить воспроизводимость мелких деталей структур фильтров. Качество поверхности звукопровода не только определяет разрешаю-

щую способность при формировании структур фильтров посредством фотолитографии, но и существенно влияет на затухания ПАВ, особенно в пьезокерамических материалах, имеющих пористую структуру.

Толщина звукопровода выбирается около $20\lambda_{\text{пов}}$ для уменьшения влияния объемных волн.

3.2. Очистка и металлизация звукопроводов

Независимо от выбранного метода последующего формирования встречно-штыревых структур преобразователей, на поверхность звукопроводов должно быть нанесено проводящее покрытие, к которому предъявляются требования минимального электрического сопротивления, высокой адгезии, однородности по структуре, составу, толщине, отсутствия проколов, наплывов, царапин и т.п., коррозионной стойкости, хорошей растворимости в травителе, технологичности, стабильности основных физико-химических свойств пленки от партии к партии и др. Дополнительными требованиями являются: малое различие акустических сопротивлений материала металлизации Z_m и звукопровода Z_z , низкая удельная плотность во избежание сильных отражений и слабые дисперсионные свойства.

Для получения хорошей адгезии и воспроизводимости электрофизических свойств нанесенных металлических пленок поверхность звукопровода должна быть хорошо очищена, причем способ очистки в большей степени зависит от метода последующей металлизации.

Процедуру очистки можно разделить на этапы предварительной и окончательной очистки. Способ предварительной очистки зависит от характера загрязнений и химических свойств подложки. Основными загрязнениями обычно являются следы масел, жира, отпечатки пальцев, пушинки, разнообразные пылевые частицы. Последовательность операций предварительной очистки может изменяться в широких пределах, а для окончательной, наоборот, должна оставаться неизменной. Химическая окончательная очистка предусматривает ультразвуковую мойку в горячей воде с растворенным в ней моющим средством, а затем длительное промывание в горячей воде наивысшей достижимой чистоты.

Наиболее широко при изготовлении фильтров ПАВ используются алюминий, серебро, золото, иногда медь с защитой никелем. Некоторые электрофизические, акустические и дисперсионные свойства материалов приведены в табл. П2. Учитывая, что алюминий дешев и позволяет получить сравнительно низкое сопротивление пленочных проводников, в фильтрах ПАВ как со звукопроводами из кварца, так и ниобата лития и пьезокерамики, наиболее часто используется алюминиевое покрытие. Медное или золотое покрытие с подслоем хрома хорошо сочетается с германатом висмута.

С целью получения хорошей электропроводности при незначительных дисперсионных искажениях и для надежности присоединения золотых проводников, например, методом сварки со сдвоенным электродом толщину пленки контактных шин следует выбирать в пределах 250...300 нм. Толщина электродов ВШП может быть уменьшена до 100...200 нм. Для улучшения адгезии алюминия целесообразно использовать подслоем ванадия толщиной 30 нм, что позволяет обойтись одним травителем и проводить только одноэтапную фотолитографию.

Для осаждения пленок из алюминия, меди, золота, серебра наиболее часто используется термовакuumное напыление. Применение электронно-лучевого испарения из тигля этих материалов, например алюминия, позволяет существенно улучшить адгезию к поверхности звукопровода и отказаться от адгезионного подслоя. Катодное и магнетронное распыление обычно используется для получения пленок тугоплавких металлов и диэлектриков. Химическое осаждение применяется, главным образом, для металлизации крупногабаритных звукопроводов длиной свыше 100...180 мм.

При термовакuumном напылении, например, алюминия на ниобат лития или кварц, очищенные звукопроводы сначала прогреваются при температуре $250 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 10 ± 1 мин для удаления мономолекулярных загрязнений, а также для снятия механических напряжений и выравнивания потенциального рельефа поверхности. Для большинства пьезокерамик недопустим перегрев выше $100...430^\circ\text{C}$.

После этого звукопроводы охлаждаются до температуры $130 \pm 10^\circ\text{C}$ с целью получения малого удельного сопротивления напыляемых слоев ванадия и алюминия и производится распыление указанных материалов.

3.3. Методы изготовления встречно-штыревых структур фильтров на поверхностно-акустических волнах

Технология изготовления структур фильтров ПАВ сводится к формированию заданной конфигурации металлических электродов и контактных шин. Для наиболее освоенного диапазона частот от 15 до 300 МГц ширина электродов колеблется от 2 до 50 мкм для одиночных штырей и от 1 до 25 мкм для расщепленных штырей; длина электродов составляет 3...10 мм, а общее количество электродов изменяется от 20 – 100 до 400 – 600. Число преобразователей, размещенных на одном звукопроводе, может достигать шести. Общее поле, занимаемое встречно-штыревыми структурами, составляет от $5 \times 15 \text{ мм}^2$ до $30 \times 100 \text{ мм}^2$.

При этом к качеству структур ВШП предъявляются весьма жесткие требования. Для большинства фильтров (особенно широкополосных) практически не допускаются обрывы электродов, наиболее опасные в области центрального лепестка встречно-штыревой структуры. Не допускаются замыкания электродов в зоне их взаимного перекрытия, вне этой зоны возможно наличие не более трех – пяти дефектов типа «островок», замыкающих три – пять электродов преобразователя.

Допуски на размеры контактных шин и площадок, а также на расстояние между отдельными преобразователями составляют 5...10 мкм, т.е. сравнимы с допусками на размеры элементов тонкопленочных ИМС. Несосность расположения встречно-штыревых структур относительно базовой кромки звукопровода или относительно друг друга допускается в пределах $\pm(5...20)^\circ$.

Допуски на размеры электродов ВШП почти на порядок жестче допусков на размеры элементов тонкопленочных ИМС. Как будет показано ниже, для получения затухания боковых лепестков АЧХ фильтра до $a_6 = (50...60)$ дБ заданную ширину электродов необходимо выдерживать с точностью не хуже $\pm(0,5...0,8)$ мкм, а длину электродов и их шаг, соответственно, не хуже $\pm(0,5...1,2)$ и $\pm(0,2...0,5)$ мкм.

Принципиально для формирования встречно-штыревых структур фильтров ПАВ, отвечающих перечисленным требованиям, можно использовать те же методы, что и для получения заданной конфигурации элементов ИМС по планарной технологии: фотолитографию (сзором, контактную, проекционную); голографию; лучевую обработку (пучком ионов, лучом

лазера, рентгеновским пучком, растровую и проекционную обработку электронным пучком) и т.д., основные характеристики которых приведены в табл. ПЗ. Кратко остановимся на достоинствах и недостатках перечисленных методов.

При изготовлении уникальных устройств обработки сигналов на ПАВ иногда используется механическая нарезка металлического покрытия, нанесенного непосредственно на звукопровод. Использование этого метода позволяет создавать структуры с рабочими полями до $100 \times 300 \text{ мм}^2$. Однако реализуемая при этом методе точность $\pm(2...4) \text{ мкм}$ явно недостаточна для качественных фильтров ПАВ.

Для изготовления устройств на ПАВ технически и экономически целесообразно использовать метод фотолитографии, иллюстрируемый на рис. 5. Подложку тщательно полируют для получения оптически плоской поверхности, а затем очищают от посторонних частиц и обезжиривают. После этого с помощью вакуумного испарения (рис. 5, а) наносят пленку алюминия толщиной $0,1...0,3 \text{ мкм}$. Для улучшения адгезии часто используют тонкий подслои хрома (подслой хрома обычно используют для золотых и медных пленок, для алюминиевых по соображениям простоты химического травления чаще используют подслои ванадия). На следующем этапе образец покрывают фоторезистом – раствором фоточувствительного полимера и вращают с большой скоростью, стремясь получить тонкий однородный слой. Затем фоторезист укрепляют термической сушкой и экспонируют в ультрафиолетовом излучении через фотошаблон (рис. 5, б). На фотошаблоне имеются непрозрачные области из фотоэмульсии или пленки хрома, соответствующие топологии металлизации изделия. В экспонированных областях фоторезиста происходят химические изменения, позволяющие впоследствии удалить их проявляющим раствором (рис. 5, в). Области металла, не защищенные фоторезистом, удаляют химическим травлением. Наконец, оставшийся фоторезист растворяют, оставляя на подложке металлический рисунок, соответствующий рисунку на фотошаблоне (рис. 5, г). С помощью этого процесса можно воспроизводить полоски

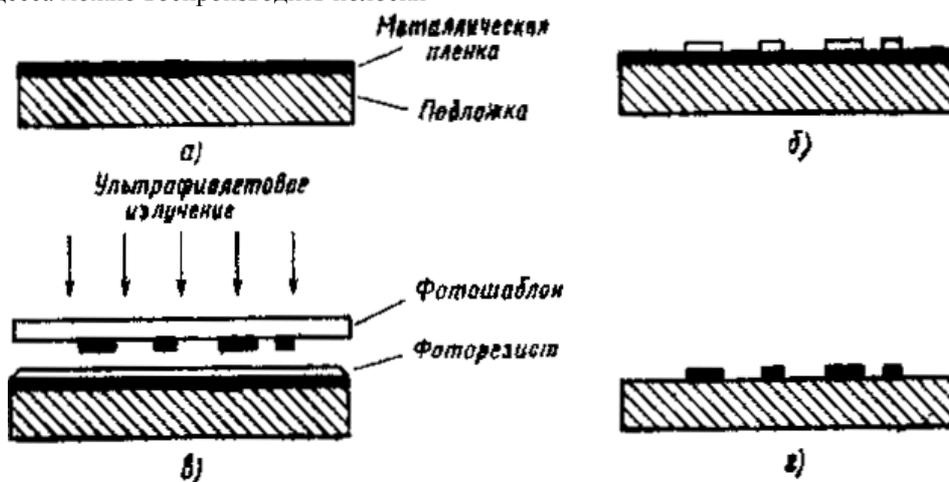


Рис. 5. Этапы изготовления фильтров на ПАВ методом фотолитографии

шириной до $0,5 \text{ мкм}$, что соответствует рабочей частоте ВШП около $1,5 \text{ ГГц}$. Наиболее ответственная стадия процесса – оптическая экспозиция, при которой фотошаблон должен плотно прилегать к образцу. Обычно для этой цели используют промышленные установки совмещения. Из-за анизотропии подложки часто требуется высокая точность углового совмещения фотошаблона и образца, обычно 1° и менее.

Известно, что основной причиной ограничения разрешающей способности фотолитографии являются дифракция светового луча, ошибки при оптической передаче изображения на звукопровод из-за сферической аберрации, астигматизма и др., а также ошибки при химических операциях проявления, травления и т.п., особенно при больших рабочих полях.

Для обеспечения необходимой разрешающей способности на большой площади в настоящее время разрабатываются голографические методы, позволяющие упростить процесс фотолитографии и избежать применения высокоразрешающих объективов. Достигнутое разрешение до 700 нм на большом поле и крайне низкий уровень искажений вполне удовлетворяют требованиям технологии изготовления высокочастотных устройств на ПАВ.

Применение для формирования микроизображения вместо светового луча сфокусированного до $0,01...1,0 \text{ мкм}$ пучка электронов, обладающего на несколько порядков меньшей длиной волны, позволяет избежать дифракции и получить существенно лучшее разрешение.

Основным преимуществом электронолитографии (помимо разрешающей способности) является возможность программного управления процессами формирования и отклонения электронного луча и визуализации с помощью электронного микроскопа. Это позволяет получать конфигурацию встречно-штыревых структур фильтров ПАВ непосредственно на звукопроводе, покрытом слоем электронорезиста или фоторезиста без использования фотошаблонов. Особенно важна гибкость электронно-лучевой технологии, легко перестраиваемой с одной конфигурации на другую, в производстве уникальных устройств обработки сигналов на ПАВ, имеющих три – пять преобразователей с общим количеством электродов до $5...6 \text{ тыс.}$

Основными недостатками растровой электронолитографии является ее ограниченность рабочих полей и низкая производительность, а проекционной – необходимость создания прецизионных шаблонов и фотокатодов.

Малая длина волны рентгеновского излучения (от $0,4$ до $4,4 \text{ нм}$) позволяет получить самую высокую разрешающую способность из всех известных методов литографии (до $0,05 \text{ мкм}$). В отличие от фото- и электронолитографии рентгенография менее критична к чистоте шаблона.

Основной сложностью при использовании рентгенолитографии является получение шаблонов, контрастных для рентгеновских лучей, например, изготавливаемых с применением золота, и сравнительно низкая производительность метода.

Таким образом, сравнение показывает, что голография, электронолитография и рентгенолитография, хотя и позволяют реализовать необходимую для большинства фильтров ПАВ разрешающую способность, но имеют малые рабочие поля. Наиболее вероятная область их применения – изготовление фильтров, резонаторов и линий задержки на ПАВ с рабочими частотами выше $500...800 \text{ МГц}$. Для изготовления устройств на ПАВ с рабочими частотами до $150...250 \text{ МГц}$ технически и экономически целесообразно применение контактной фотолитографии.

3.4. Технология изготовления фотошаблонов фильтров на поверхностно-акустических волнах

Исходя из приведенных выше требований к встречно-штыревым структурам фильтров ПАВ на частоты от 10 до 300 МГц, можно сформулировать и основные требования к качеству фотошаблонов, которые сводятся к следующим: общее число электродов в структуре фильтра до 500 – 600, типичное рабочее поле от 2×15 до 10×30 мм, точность позиционирования отдельных структур преобразователей относительно друг друга на общем шаблоне фильтра от ± 1 до ± 5 мкм, точность выполнения шага электродов в структурах не хуже 0,5 % длины волны, т.е. от $\pm 1,5$ до $\pm 0,05$ мкм, ширина b_n нерасщепленных электродов от 75 до 2,5 мкм, расщепленных – от 36 до 1,25 мкм при точности не хуже $\pm(5 \dots 8) \%$ от b_n , неровность края электродов менее 1 % от b_n , неплоскостность рабочей поверхности не хуже 0,05...0,1 мкм/мм во избежание дифракции светового луча при экспонировании, оптическая плотность непрозрачных участков не менее 2 ед., по денситометру МД-2, оптическая плотность вуали не более 0,05 ед. Кроме того, фотошаблоны должны иметь минимальное количество дефектов (царапин, пятен, ореолов, темных точек и т.п.), а также отвечать требованиям совмещаемости различных топологических рисунков всех входящих в комплект шаблонов.

В настоящее время можно выделить три основных метода изготовления фотошаблонов: трехступенчатый; двухступенчатый; одноступенчатый (рис. 6). Каждый из этих методов может иметь несколько технологических вариантов, определяющихся возможностями технологического оборудования. Трехступенчатый метод до настоящего времени имеет наибольшее применение, так как обеспечен технологическим оборудованием.

Изготовление оригинала, представляющего собой единичное увеличенное изображение модуля фотошаблона, производится на автоматических координатографах, обеспечивающих точность вырезания на майларовой пленке, соответственно, ± 50 и ± 25 мкм, что уже на первом этапе накладывает определенные ограничения на точность изготовления фотошаблонов.

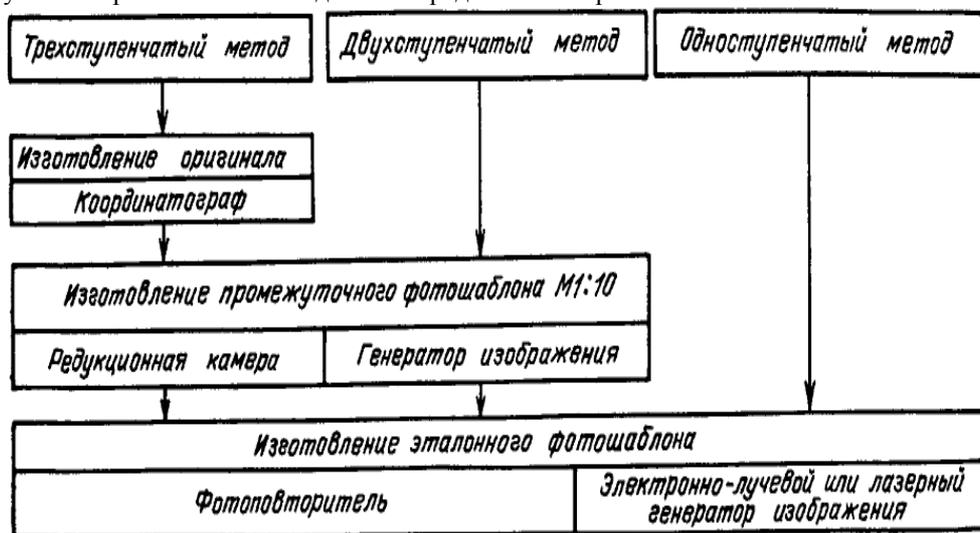


Рис. 6. Методы изготовления фотошаблонов

Второй этап трехступенчатого метода – изготовление промежуточного фотошаблона на редуционных камерах.

Для фильтров с допусками на размеры элементов ± 5 мкм этот этап может быть завершающим, так как мультипликация отдельных модулей может осуществляться на редуционных камерах с указанной выше точностью. Третий этап – изготовление эталонного фотошаблона методом мультипликации на фотоповторителях.

Основным недостатком трехступенчатого данного метода является большая трудоемкость, хотя он с успехом применяется при изготовлении фотошаблонов фильтров на частоты до 20...100 МГц.

Двухступенчатый метод исключает этап изготовления оригинала фотошаблона, а одноступенчатый – еще и этап изготовления промежуточного фотошаблона.

3.5. Монтаж фильтров на поверхностно-акустических волнах

После изготовления проводящей структуры фильтра ПАВ и контроля ее геометрических размеров обычно следуют операции предварительной проверки фильтра на функционирование, установки в корпус, приварки выводов, герметизации и окончательного контроля механических и электрических параметров.

Изготовленные подложки герметизируются в атмосфере инертного газа или в вакууме. Это предохраняет от влаги (которая может вызвать коррозию металла) и от отравления поверхности (которое приводит к затуханию поверхностных волн). Небольшие устройства помещают в стандартные корпуса, например фильтры ПАВ на частоты до 150 МГц и с длиной звукопроводов до 30...35 мм обычно размещают в металлостеклянные корпуса 153.15-1, 155.15-1, 157.29-1 (табл. П4) для тонкопленочных ИМС.

Размещение же крупногабаритных звукопроводов длиной более 50...60 мм производится в специальных корпусах, для которых указанные операции специфичны и здесь рассматриваться не будут.

Для уменьшения механических напряжений, которые влияют на характеристики устройства, подложки часто приклеивают эластичным клеем. Электрические соединения обычно выполняют золотой проволокой диаметром 25...40 мкм, применяя термокомпрессию или ультразвуковую сварку. В некоторых случаях, когда требуется термостабилизация, корпус размещают внутри термостата.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что перечисленные операции установки в корпус, монтажа и герметизации больших отличий от аналогичных процессов в производстве тонкопленочных ИМС не имеют (табл. П5). Исключением будет являться только ряд приведенных ниже рекомендаций по выбору клеев-поглотителей.

3.6. Рассеяние и поглощение поверхностных акустических волн

Как известно, обычные ВШП обладают двунаправленностью излучения, в результате чего возникают ПАВ, отраженные от краев звукопроводов. При наличии отраженных ПАВ в полосе пропускания фильтров появляются пульсации частотных характеристик, а во временной области возникают ложные сигналы.

Уменьшить уровень ПАВ, отраженных от краев звукопроводов, можно следующими способами: нанесением на торцы звукопроводов насечек; скашиванием или скруглением торцов; нанесением поглотителя акустических волн между ВШП и торцом; размещением между ВШП и торцом звукопровода фазовращающей полоски, перекрывающей половину акустического потока, и т.д.

Важнейшими свойствами поглотителей должны быть широкий диапазон рабочих температур, хорошая адгезия к поверхности пьезоэлектриков, механическая прочность, эластичность, водостойкость, долговечность. Кроме того, процесс нанесения поглотителя на звукопроводы должен быть технологичным.

По химическому составу поглотители можно разбить на три группы: неорганические, низкомолекулярные и высокомолекулярные органические. Неорганические поглотители имеют невысокие адгезионные и эластичные свойства, неводостойки (за исключением пленок металлов и их сплавов, которые обладают низкими поглощающими свойствами). Низкомолекулярные органические поглотители типа парафина и высокомолекулярные поглотители на основе полиэфиров (сополимеры) обладают невысокой термостабильностью и слабой адгезией.

Наиболее подходящей совокупностью свойств обладают полимерные материалы на основе компаунд-клеев. Но гораздо лучшими поглощающими свойствами обладают смеси полимеров с наполнителями в виде неорганических пигментов.

Составы некоторых смесей и результаты по поглощению ПАВ для различных пьезоэлектриков приведены в табл. П6.

Необходимо отметить, что наименьший уровень ложных сигналов, обусловленных объемными и отраженными поверхностными акустическими волнами, наблюдается при нанесении поглотителя не только на кромки рабочей поверхности звукопровода, но и на его нерабочую поверхность. В этом случае поглотитель должен обладать повышенной адгезией к материалам как звукопроводов, так и основания корпуса фильтра для обеспечения надежного механического закрепления звукопровода.

Приклеивание звукопроводов из ниобата лития, кварца, пьезокерамики, германата висмута к основаниям корпусов из кобальта осуществляется обычно клеями К-400, ВК-9, ЛН, ПДИ-Л, герметиком ВГО-1 и др.

4. СИНТЕЗ ФИЛЬТРА НА ПОВЕРХНОСТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ. РАСЧЕТ ТОПОЛОГИИ

Проектирование фильтра ПАВ производим по схеме, приведенной на рис. 4.

1. Исходными данными являются:

- центральная частота f_0 ;
- относительная полоса пропускания $\Delta f/f_0$;
- число лепестков импульсного отклика m ;
- функция аподизации $\omega(n)$.

2. Выбирается материал звукопровода и его класс обработки (табл. П7).

3. Выбирается структурная схема фильтра – тип конструкции входного и выходного преобразователей.

4. Производится синтез фильтра:

а) расчет топологии преобразователей.

Если преобразователь эквидистантный неаподизованный (рис. 7), то расчет топологии ведется по ниже приведенным формулам:

Определяем количество пар N электродов

$$N = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (1)$$

f_0 – центральная частота, а $\Delta f = f_b - f_n$, где f_b – верхняя граничная частота и f_n – нижняя граничная частота. Следует пояснить, что значения f_b и f_n вытекают из соотношения $\Delta f/f_0$.

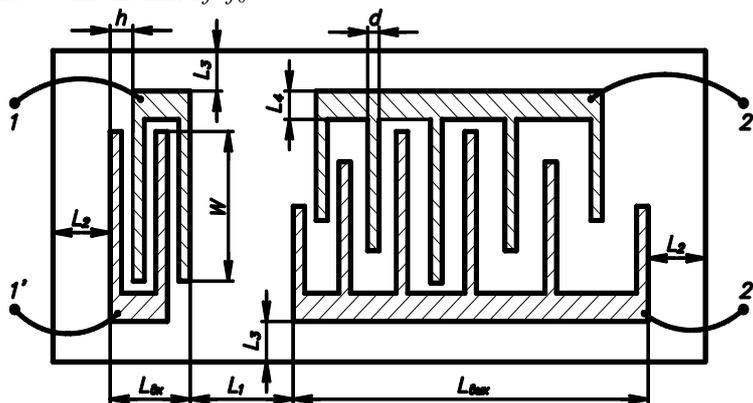


Рис. 7. Схема проектируемого фильтра на ПАВ

Определяем расстояние h между соседними электродами

$$h = \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{v}{f_0}$ – длина волны.

Рассчитываем толщину электродов по формуле

$$d = \frac{\lambda}{4}. \quad (3)$$

Находим апертуру (степень перекрытия) электродов

$$W = (10 \dots 200)\lambda. \quad (4)$$

Если ВШП неэквидистантный аподизованный (рис. 7), то для расчета топологии справедливы следующие формулы. Определяем количество пар N электродов

$$N = (m + 1) \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (5)$$

где m – число лепестков импульсного отклика.

Определяем расстояние h между соседними электродами по формуле

$$h(n) = v \frac{f_b t_3}{2\Delta f} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4n\Delta f}{f_b^2 t_3}} \right), \quad (6)$$

где $t_3 = \frac{L_1}{v}$ – время задержки, где $L_1 = 8 \dots 10$ мм – расстояние между преобразователями, $n = 1, 2, \dots, N$ – количество пар электродов.

Рассчитываем толщину электродов по формуле

$$d = \frac{\lambda}{4}. \quad (7)$$

Находим координаты краев электродов ВШП по оси Y

$$Y(n) = \frac{W_0}{2} [1 - (-1)^n \Phi(n)], \quad (8)$$

где W_0 – апертура входного преобразователя, $n = -N \dots +N$, а $\Phi(n)$ имеет вид

$$\Phi(n) = \frac{\sin\left(\frac{\pi n}{N+1}\right)}{\frac{\pi n}{N+1}} \omega(n), \quad (9)$$

где $\omega(n)$ – передаточная функция (функция аподизации).

При $n = 0$ длина электрода равна $(10 \dots 200)\lambda$. Конец этого электрода будет являться началом системы координат $Y(n)$;

б) определение габаритных размеров проектируемого фильтра.

Определяем длину звукопровода

$$L_d = L_{вх} + L_{вых} + L_1 + 2L_2, \quad (10)$$

где $L_{вх}$ – длина входного преобразователя; $L_{вых}$ – длина выходного преобразователя; $L_1 = 8 \dots 10$ мм – расстояние между преобразователями; $L_2 = 5 \dots 10$ мм – расстояние между крайним электродом преобразователя и торцевой гранью звукопровода.

Если преобразователь эквидистантный, то

$$L_{экв} = h \cdot (2N - 1) + d. \quad (11)$$

Если преобразователь неэквидистантный, то

$$L_{неэкв} = \sum_{n=1}^N (2h_n) + d. \quad (12)$$

Ширина звукопровода фильтра

$$L_{ш} = W_{вх} + 2(L_3 + L_4), \quad (13)$$

где $L_3 = 5 \dots 10$ мм – расстояние между общей шиной решетки преобразователя и продольной гранью звукопровода; $L_4 = 2d$ – ширина общей шины решетки преобразователя.

Толщина звукопровода выбирается около 20λ для уменьшения влияния объемных волн. В нашем случае толщина звукопровода составляет 1,5 мм.

5. Приводится описание конструкции проектируемого фильтра.

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА ФИЛЬТРА НА ПОВЕРХНОСТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

1. Исходные данные:

- центральная частота $f_0 = 150 \times 10^6$ Гц;
- относительная полоса пропускания $\Delta f/f_0 = 50$ %;
- число лепестков импульсного отклика $m = 4$;
- функция аподизации $\omega(n) = 0,04 + 0,96 \cdot \cos \left(\frac{\pi n}{2(N+1)} \right)$.

2. Материал звукопровода – ниобат лития LiNbO_3 , ориентация среза $41,5^\circ\text{X}$ со скоростью распространения волны $v = 4 \cdot 10^3$ м/с. Класс обработки звукопровода – $\nabla 13$.

3. Структурная схема фильтра – входной преобразователь эквидистантный неаподизованный, выходной – неэквидистантный аподизованный.

4. а) расчет топологии входного преобразователя (эквидистантного неаподизованного).

Определяем количество пар N электродов

$$N = \frac{f_0}{\Delta f},$$

f_0 – центральная частота, а $\Delta f = f_b - f_n$, где f_b – верхняя граничная частота (для нашего фильтра $f_b = 187,5 \cdot 10^6$ Гц) и f_n – нижняя граничная частота (в нашем случае $f_n = 112,5 \cdot 10^6$ Гц).

$$\Delta f = 187,5 \cdot 10^6 - 112,5 \cdot 10^6 = 75 \cdot 10^6 \text{ Гц};$$

$$N = \frac{150 \cdot 10^6}{75 \cdot 10^6} = 2 \text{ пары.}$$

Определяем расстояние h между соседними электродами

$$h = \frac{\lambda}{2},$$

где $\lambda = \frac{v}{f_0}$ – длина волны.

$$\lambda = \frac{v}{f_0} = \frac{4 \cdot 10^3}{150 \cdot 10^6} = 26,667 \cdot 10^{-6} = 26,667 \text{ мкм};$$

$$h = \frac{\lambda}{2} = \frac{26,667 \cdot 10^{-6}}{2} = 13,333 \cdot 10^{-6} = 13,333 \text{ мкм.}$$

Рассчитываем толщину электродов по формуле

$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{26,667 \cdot 10^{-6}}{4} = 6,667 \cdot 10^{-6} = 6,667 \text{ мкм.}$$

Находим апертуру электродов

$$W = (10 \dots 200) \lambda.$$

Для данного проектируемого фильтра выбираем

$$W = 20\lambda = 20 \cdot 26,667 \cdot 10^{-6} = 5,333 \cdot 10^{-4} = 533,3 \text{ мкм};$$

б) расчет топологии выходного преобразователя (неэквидистантного аподизованного).

Определяем количество пар N электродов

$$N = (m+1) \frac{f_0}{\Delta f},$$

где m – число лепестков импульсного отклика.

$$N = (4+1) \cdot \frac{150 \cdot 10^6}{75 \cdot 10^6} = 10 \text{ пар.}$$

Определяем расстояние h между соседними электродами по формуле

$$h(n) = v \frac{f_b t_3}{2\Delta f} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4n\Delta f}{f_b^2 t_3}} \right),$$

где $t_3 = \frac{L_1}{v}$ – время задержки, где $L_1 = 8 \dots 10$ мм – расстояние между преобразователями, $n = 1, 2, \dots, N$ – количество пар электродов.

$$t_3 = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^3} = 2,5 \cdot 10^{-6} = 2,5 \text{ мкс.}$$

Получаем, что

$$h(n) = 4 \cdot 10^3 \cdot \frac{187,5 \cdot 10^6 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 75 \cdot 10^6} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot n \cdot 75 \cdot 10^6}{(187,5 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6}}} \right].$$

Полученные значения запишем в таблицу:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h , мкм	21,4	42,7	64,2	85,6	107,1	128,7	150,2	171,8	193,5	215,2

Рассчитываем толщину электродов по формуле

$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{26,667 \cdot 10^{-6}}{4} = 6,667 \cdot 10^{-6} = 6,667 \text{ мкм.}$$

Находим координаты краев электродов ВШП по оси Y :

$$Y(n) = \frac{W_0}{2} [1 - (-1)^n \Phi(n)],$$

где W_0 – апертура входного преобразователя, $n = -N \dots +N$, а $\Phi(n)$ имеет вид

$$\Phi(n) = \frac{\sin\left(\frac{\pi n}{N+1}\right)}{\frac{\pi n}{N+1}} \omega(n),$$

где $\omega(n)$ – передаточная функция (функция аподизации).

В нашем случае $\omega(n) = 0,04 + 0,96 \cdot \cos\left(\frac{\pi n}{2(N+1)}\right)$. Следовательно,

$$\Phi(n) = \frac{\sin\left(\frac{\pi n}{10+1}\right)}{\frac{\pi n}{10+1}} \left[0,04 + 0,96 \cos\left(\frac{\pi n}{2(10+1)}\right) \right].$$

Получаем, что

$$Y(n) = \frac{5,333 \cdot 10^{-4}}{2} \left[1 - (-1)^n \frac{\sin\left(\frac{\pi n}{10+1}\right)}{\frac{\pi n}{10+1}} \left(0,04 + 0,96 \cos\left(\frac{\pi n}{2(10+1)}\right) \right) \right].$$

Полученные значения запишем в таблицу:

n	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	
$Y(n)$	262	284	228	335	164	408	87	482	24	527	
n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Y(n)$	0	527	24	428	87	408	164	335	228	284	262

При $n = 0$ длина электрода равна длине электрода входного неаподизованного ВШП. Конец этого электрода и будет являться началом системы координат $Y(n)$;

в) определение габаритных размеров проектируемого фильтра.

Определяем длину звукопровода

$$L_d = L_{\text{вх}} + L_{\text{вых}} + L_1 + 2L_2,$$

где $L_{\text{вх}} = h_{\text{вх}}(2N_{\text{вх}} - 1) + d_{\text{вх}}$ – длина входного преобразователя;

$$L_{\text{вых}} = \sum_{n=1}^N (2h_{\text{вых}n}) + d_{\text{вых}} - \text{длина выходного преобразователя};$$

$L_1 = 8 \dots 10$ мм – расстояние между преобразователями;

$L_2 = 5 \dots 10$ мм – расстояние между крайним электродом преобразователя и торцевой гранью звукопровода.

$$L_{\text{вх}} = 13,3 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot 10 - 1) + 6,6710^{-6} = 0,259 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$L_{\text{вых}} = \sum_{n=1}^{10} (2h_{\text{вых}n}) + 6,67 \cdot 10^{-6} = 2,368 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$L_{\text{д}} = 0,259 \cdot 10^{-3} + 2,368 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = \\ = 22,527 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 22,5 \text{ мм}.$$

Ширина звукопровода фильтра

$$L_{\text{ш}} = W_{\text{вх}} + 2(L_3 + L_4),$$

где $L_3 = 5 \dots 10$ мм – расстояние между общей шиной решетки преобразователя и продольной гранью звукопровода; $L_4 = 2d$ – ширина общей шины решетки преобразователя.

$$L_{\text{ш}} = 0,53 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot (5 \cdot 10^{-3} + 13,34 \cdot 10^{-6}) = 10,536 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 10,5 \text{ мм}.$$

Толщина звукопровода выбирается около 20λ для уменьшения влияния объемных волн. В нашем случае толщина звукопровода составляет 1,5 мм.

5. Описание конструкции проектируемого фильтра:

Фильтр содержит один входной преобразователь и один выходной. Входной преобразователь – эквидистантный неаподизованный широкополосный, число пар штырей – 2. Выходной преобразователь – неэквидистантный аподизованный с числом пар штырей – 10.

Материалом для звукопровода проектируемого фильтра на ПАВ является ниобат лития с ориентацией ZY. Класс обработки звукопровода – $\nabla 13$. Размеры подложки $22,5 \times 10,5 \times 1,5$ мм.

Материалом изготовления штырей преобразователей является алюминий А99 ГОСТ11069–64, по соображениям наименьшей стоимости. Для улучшения адгезии используется подслоя ванадия. Для защиты от воздействия окружающей среды элементы конструкции ВШП покрываются защитным материалом – фоторезист негативный ФН-11 ТУ6-14-631–71. В качестве материала для поглотителей используется эпоксидная смола ЭД-5 ГОСТ10587–75.

Проектируемый фильтр изготавливают по методу прямой контактной фотолитографии.

Для герметизации фильтра используется металлокерамический прямоугольный корпус из кобальта, со штырьковыми выводами типа 1210 (157.29-1), соответствующий по типоразмеру ГОСТ17467–79.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) является ярким примером рождения новой области техники. Работы в этой области начались в 1960-х гг., после того, как были оценены потенциальные возможности применения рэлеевских волн в радиоэлектронике и были выработаны основные концепции проектирования широкого ряда устройств. Одновременно развивались методы анализа таких устройств, что, в свою очередь, привело к совершенствованию приемов проектирования и улучшению параметров. В результате появился новый класс высококачественных радиоэлектронных компонентов с широкими возможностями применения, в некоторых случаях позволяющих выполнять совершенно новые процедуры обработки сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коледов, Л.А. Конструирование и технология микросхем / Л.А. Коледов. – М. : Высшая школа, 1984. – 231 с.
2. Орлов, В.С. Фильтры на поверхностных акустических волнах / В.С. Орлов, В.С. Бондаренко. – М. : Радио и связь, 1984. – 272 с.
3. РЫЧИНА, Т.А. УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТЫ / Т.А. РЫЧИНА, А.В. ЗЕЛЕНСКИЙ. – М. : РАДИО И СВЯЗЬ, 1989. – 352 с.
4. Свитенко, В.Н. Электрорадиоэлементы: курсовое проектирование : учебное пособие для вузов / В.Н. Свитенко. – М. : Высшая школа, 1987. – 207 с.
5. Фильтры на поверхностных акустических волнах (расчет, технология и применение) / под ред. Г. Метгьюза ; пер. с англ. под ред. В.Б. Акпамбетова. – М. : Радио и связь, 1981. – 472 с.

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

П1. Типичные параметры, реализуемые ВШП различных конструкций

Тип ВШП	$\Delta f/f_0^*$, %	δa^* , ±дБ	a^* гар, дБ	K_n^* , 40/3 дБ	a^* вн, дБ
Неаподизованный эквидистантный	1,0...50,0	0,1 ... 1,0	13,6	1,8	6...40
Неаподизованный с расщепленными электродами	1,0...50,0	0,05...0,2	13,6	1,8	6...40
Аподизованный эквидистантный	0,3...1,0	0,05...1,5	21,8...50	1,1...3,0	6...20
Аподизованный секционированный	0,5...10,0	0,05...0,2	21,8...40	1,8...3,0	6...15
С переменной шириной электродов	1,0...10,0	0,5 ... 2,0	13,6...30	2,5...3,5	6...20
С селективным удалением электродов	0,2...3,0	0,05...0,3	21,8...40	1,9...3,0	5...10
С емкостным взвешиванием	5...20	0,05...0,8	21,8...50	1,3...1,9	4...15
Веерный неаподизованный	3,0...30,0	0,2...1,0	13,6...21,3	1,15...2,0	10...20
Веерный аподизованный	3,0...25,0	0,2...1,0	13,6...35,0	1,5...2,5	10...22
Неэквидистантный аподизованный	10...50	0,2...1,0	21,8...35,0	1,1...2,5	6...20
Однонаправленный	0,2...5	0,1...0,5	13,6	1,8	0,5...6

П2. Акустические и дисперсионные свойства материалов

Материалы покрытия и звукопровода	Удельное электрическое сопротивление $\times 10^6$, Ом · см	Скорость ПАВ V , $\times 10^5$, см · с ⁻¹	Плотность ρ , г · см ⁻³	Акустическое сопротивление Z , $\times 10^6$, г · см ⁻² · с ⁻¹	Коэффициент дисперсии γ_d	Коэффициент отражения ψ
Алюминий	2,7	2,8	2,7	7,15	} -0,03	-0,07
Кварц	-	3,16	2,65	8,35		
Алюминий	2,7	2,8	2,7	7,15	} +0,06	-0,392
Ниобат лития	-	3,49	4,7	16,4		
Алюминий	2,7	2,8	2,7	7,15	} +0,08	-0,379
Германат висмута	-	1,72	9,23	15,9		
Серебро	1,63	1,44	10,5	15,2	} -0,52	0,28
Кварц	-	3,16	2,65	8,35		
Серебро	1,63	1,44	10,5	15,2	} -0,46	-0,036
Ниобат лития	-	3,16	4,7	16,4		
Серебро	1,63	1,44	10,5	15,2	} +0,05	-0,021
Германат висмута	-	3,49	9,63	15,9		
Золото	2,3	1,14	19,3	22,0	} -1,6	0,44
Кварц	-	3,16	2,65	8,35		
Золото	2,3	1,14	19,3	22,0	} -1,05	0,145

Ниобат лития	–	3,49	4,7	16,4	} – 0,12	0,16
Золото	2,3	1,14	19,3	22,0		
Германат висмута	–	1,72	9,63	15,9		
Медь	1,72	2,1	8,9	18,7	} –	0,0618
Германат висмута	–	1,72	9,63	16,6		

П3. Характеристики способов получения встречно-штыревых структур

Способ получения	Теоретический предел разрешающей способности, мкм	Достигнутые величины, мкм			Рабочее поле	Основные достоинства	Основные недостатки	Причины ограничения разрешающей способности
		Разрешающая способность	Точность	Воспроизводимость				
Механическая нарезка	2	10	2	3	50 × 200	Простота оборудования, большое рабочее поле	Низкие производительность и разрешающая способность	Механическая прочность резца и пленки материала
Механическая гравировка	10	30	5	5	50 × 100	То же	То же	То же
Контактная фотолитография	0,25	1	0,5	0,8	25 × 25	Высокая производительность, низкая стоимость, простота	Необходимость в фотошаблонах и их быстрый износ	Дифракция, точность совмещения
Контактная фотолитография с зазором	2	10	2	1	80 × 80	Высокая производительность, большой срок службы шаблонов	Недостаточное разрешение	Наличие зазора
Контактная фотолитография с гибким фотошаблоном	0,25	0,4	0,2	0,8	40 × 40	Низкий износ фотошаблонов, высокая точность передачи изображения, малые дефекты из-за пыли	Необходимость плотного контакта, невысокая воспроизводимость при мультипликации	Дифракция
Проекционная фотолитография с уменьшением	0,25	2 0,8	1 0,5	0,5 0,25	5 × 5 0,5 × 0,5	Высокая производительность, отсутствие износа фотошаблона	Недостаточное разрешение, ограниченное рабочее поле	Дифракция, оптическая интерференция
Растровая электронно-литография	0,01	0,1	0,1	0,1	0,5 × 0,5	Отсутствие фотошаблонов, возможность программирования	Низкая скорость сканирования, ограниченное рабочее поле	Диаметр пучка, рассеяние электронов в резисте

П4. Конструкции металлостеклянных корпусов

Тип корпуса	1203 (151.15-1)	1203 (151.15-2) ($h_{\max} = 4$ мм, $h_{\min} = 2,6$ мм); 151.15-3 ($h_{\max} = 3,2$ мм,	1203 (151.15-4) ($h_{\max} = 5$ мм, $h_{\min} = 3$ мм; 151.15-5 ($h_{\max} = 4$ мм, $h_{\min} =$
-------------	-----------------	--	--

		$h_{\min} = 2,15 \text{ мм}$	2,05 мм); 151.15-6 ($h_{\max} = 3,2 \text{ мм}$, $h_{\min} = 1,3 \text{ мм}$)
Конструкция корпуса			

Тип корпуса	1206 (153.15-1)	1207 (155.15-1)	1210 (157.29-1)
Конструкция корпуса			

П5. Конструктивно-технологические характеристики корпусов для герметизации гибридных ИМС

Условное обозначение корпуса	Вариант исполнения	Масса, г, не более	Размеры монтажной площадки, мм	Мощность рассеяния при температуре 20 °С, Вт	Метод герметизации корпуса
1203 (151.14-2,3)	МС	1,6	15,6 × 6,2	3,2	КС
1203 (151.15-1)	МС	2,0	17,0 × 8,3	1,6	АДС
1203 (151.15-2,3)	МС	1,6	15,6 × 6,2	3,3	КС, АДС
1203 (151.15-4,5,6)	МС	2,4	14,0 × 6,2	3,2	КС
1206 (153.15-1)	МС	2,8	17,0 × 15,3	2,0	АДС
1207 (155.15-1)	МС	6,5	16,8 × 22,5	2,5	КС

1210 (157.29-1)	МС	14,0	34,0 × 20,0	4,6	ЛС
-----------------	----	------	-------------	-----	----

Примечания. 1) МС – металлостеклянные корпуса; 2) для посадки платы в корпус используют клей холодного отверждения; 3) КС, АДС, ЛС – конденсаторная, аргонодуговая и лазерная сварка, соответственно.

П6. Поглощающие свойства материалов

Номер смеси	Основа	Пигмент	Пропорция	Коэффициент поглощения $K_{\text{пр}}$, дБ, при $b_{\text{п.п}} = 6$ мм и толщине $\tau_{\text{п.п}} = 0,5$ мм			
				LiNbO ₃	SiO ₂	Bi ₁₂ GeO ₂₀	ПКР-5
1	БФ-4	КЗ + С	1 : 2 : 0,5	21	14	4	21
2	К-411-02	КЗ	1 : 3,5	28	18	19	27
3	К-411-02	КЗ + С	1 : 2 : 0,1	32	–	23	34
4	ВМЛ-931	КЗ	1 : 2	15	–	10	16
5	К-411-02	КЗ + НК	1 : 2 : 0,5	26	21	12	30
6	ВМЛ-931	КЗ	1 : 3,5	11	34	4	22
7	К-411-02	КФ	1 : 1	17	30	26	19
8	К-411-02	ХК	1 : 2	24	16	27	23
9	К-411-02	ЖО	1 : 1	21	32	26	20
10	К-411-02	КСС	1 : 1,5	23	–	36	23
11	К-411-02	КСС	1 : 2,5	25	36	36	–
12	К-411-02	КСТ	1 : 2,5	9	31	37	18
13	ЭД-5	В	1 : 12	28	–	17	31
14	ЭД-5	В	1 : 15	29	–	19	34

Примечание. С – графит; В – вольфрам; КЗ – кобальт зеленый CoOnZnO; НК – никель карбонильный Ni(CO)₄; КСС – кобальт синий светлый CoOAl₂O₃; КСТ – кобальт синий темный CoOAl₂O₃; КФ – кобальт фиолетовый Co(PO₄)₂; ЖО – железоокисный пигмент Fe₂O₃Al₂O₃; ХК – хром кобальтовый CoOCr₂O₃.

П7. Физические свойства пьезоэлектрических монокристаллов

Материал	Ориентация	Скорость волны, V_f , км/с.	Коэффициент электро механической связи k^2_{ss} , %	Оптимальная полоса $\Delta f_s / f_0$, %	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r	Емкость пары электродов C_s , пФ/м	TKC · 10 ⁻⁶ , 1/°C α_r	TKЗ · 10 ⁻⁶ , 1/°C α_r
Кварц	YX	3,159	0,23	5,3	4,52	50	38	-24
	$yx1 / 42^\circ 45'$	3,158	0,16	4,6	4,55	50	14	0
	$yx1 / -20^\circ$	3,201	0,24	5,6	4,53	50	–	-35
Ниобат лития	YZ	3,488	5,04	24	50,2	464	-87	94
	XZ	3,483	4,8	24	–	–	–	93
	41,5°, X	4,000	5,78	28	67,2	619	-57	72
	$zyls / 16,5^\circ / 45^\circ$	3,503	5,62	27	–	–	-72	96
Танталат лития	ZY	3,329	1,21	11	47,9	669	-52	69
	YZ	3,230	0,68	9,5	47,9	669	-31	35
	YX	3,148	0,075	3,2	51	471	-33	49
Йодат лития	YX	2,258	5,6	–	–	–	2,6	0,7
Германат висмута	(001) [110]	1,681	1,4	14,5	43,6	404	–	115
	(111) [110]	1,708	1,69	15,0	43,6	404	-123	115
	(001) [110]	1,624	0,85	10,0	–	–	–	140
Силикат висмута	(001) [110]	1,66	1,3	–	–	–	–	118
	(111) [110]	1,69	1,83	–	–	–	–	118

П8. Виды функций аподизации, наиболее употребляемых в фильтрах на ПАВ

№ п/п	Функция аподизации
1	$1 + 2F_1 \cos\left(\frac{n\pi}{N+1}\right), F_1 = 0,4$

2	$\left(\frac{\sin x}{x}\right)^r, \quad x = \left(\frac{n\pi}{N+1}\right), \quad r = 1$
3	$\left(\frac{\sin x}{x}\right)^r, \quad x = \left(\frac{n\pi}{N+1}\right), \quad r = 2$
4	$\left(\frac{\sin x}{x}\right)^r, \quad x = \left(\frac{n\pi}{N+1}\right), \quad r = 3$
5	$\left[\cos\left(\frac{n\pi}{2(N+1)}\right)\right]^r, \quad r = 1$
6	$\left[\cos\left(\frac{n\pi}{2(N+1)}\right)\right]^r, \quad r = 2$
7	$\left[\cos\left(\frac{n\pi}{2(N+1)}\right)\right]^r, \quad r = 3$
8	$0,5\left[1 + \cos\left(\frac{n\pi}{N+1}\right)\right]^r, \quad r = 1$

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Этапы процесса проектирования фильтров на поверхностно-акустических волнах	6
2. Обзор и анализ основных конструкций встречно-штыревых преобразователей	11
3. Технология изготовления фильтров на поверхностно-акустических волнах	18
3.1. Конструирование и технология изготовления звукопроводов фильтров	18
3.2. Очистка и металлизация звукопроводов	20
3.3. Методы изготовления встречно-штыревых структур фильтров на поверхностно-акустических волнах	22
3.4. Технология изготовления фотошаблонов фильтров на поверхностно-акустических волнах	25
3.5. Монтаж фильтров на поверхностно-акустических волнах ..	26
3.6. Рассеяние и поглощение поверхностно-акустических волн	27
4. Синтез фильтра на поверхностно-акустических волнах. Расчет топологии	28
5. Пример расчета фильтра на поверхностно-акустических волнах	31
Заключение	35
Список литературы	36
Приложения	37