

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

С.М. Шандаров  
Б.Н. Буримов  
А.С. Акрестина

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА НА ПАВ**

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов технических направлений подготовки

Томск 2024

УДК 535:53(075.8)  
ББК 22.34я73  
Ш201

**Шандаров, Станислав Михайлович**

Ш201 Исследование полосового фильтра на ПАВ: Методические указания к лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки / С.М. Шандаров, Н.И. Буримов, А.С. Акрестина. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 12 с.

Представлены методические указания к лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки. Цель данной работы: исследование частотных характеристик полосового фильтра на поверхностных акустических волнах с торцевыми пьезопреобразователями.

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 05-24 от 08.05.2024 г.

УДК 535:53(075.8)  
ББК 22.34я73

© Шандаров С.М., Буримов Н.И.,  
Акрестина А.С. 2024

© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2024

## Содержание

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть.....	4
2.1. Полосовые фильтры на ПАВ.....	4
2.2. Торцевой пьезопреобразователь.....	7
3. Экспериментальная часть.....	10
3.1. Измерение частотных характеристик.....	10
3.2. Экспериментальное задание.....	11
4. Контрольные вопросы.....	11
5. Содержание отчета.....	11
6. Список рекомендуемой литературы.....	11

## 1. ВВЕДЕНИЕ

**Цель работы:** Исследование частотных характеристик полосового фильтра (ПФ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) с торцевым пьезопреобразователем (ТПП).

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Полосовые фильтры на ПАВ

Устройства на ПАВ не только в состоянии эффективно выполнять отдельные уникальные операции по обработке сигналов, но и служить основой для многофункциональных подсистем: согласованной фильтрации, обработки сигналов в реальном масштабе времени, Фурье – процессоров и т.п. В этом перечне особое место принадлежит полосовым фильтрам ПАВ, что обусловлено, в первую очередь, широким разнообразием реализуемых частотных характеристик. Это могут быть полосовые фильтры с высокой прямоугольностью АЧХ или, наоборот, со сложной формой АЧХ (чебышевской, гауссовской, треугольной, трапециевидной и др.) при заданной линейной или нелинейной ФЧХ, режекторные фильтры, частотные дискриминаторы, преобразователи Гильберта, дифференциаторы и т.п. Кроме того, в настоящее время уже достигнуты высокие параметры полосовых фильтров ПАВ, близкие к предельным, и ряд разработок фильтров освоен в серийном и массовом производстве, чего, к сожалению, нельзя сказать о других функциональных устройствах на ПАВ.

Помимо своих уникальных электрических характеристик, фильтры ПАВ выгодно отличаются от своих аналогов малыми размерами, механической прочностью, высокой надежностью, обусловливаемой качеством исходных материалов и процессом их обработки. Использование же достижений фотолитографии и групповой полупроводниковой технологии при изготовлении позволяют получить хорошую воспроизводимость параметров и сравнительно низкую стоимость фильтров ПАВ. Они с успехом могут применяться во входных цепях и трактах промежуточных частот систем связи, телевидения и радиолокации, в системах следящей и оптимальной фильтрации, в измерителях скорости и дальности, устройствах формирования и обработки сигналов РЛС, в анализаторах спектра, генераторах, синтезаторах и дискриминаторах частоты измерительной техники, в аналоговых системах автоматики и телемеханики и др.

Как любое функциональное устройство, простейший фильтр ПАВ состоит из передающего и приемного преобразователей, трансформирующих электрический сигнал в акустическую волну на входе и обратно на выходе устройства. Средой для распространения ПАВ служит, в большинстве случаев, пьезоэлектрический звукопровод, на полированной рабочей поверхности которого располагаются преобразователи. В зависимости от поставленных требований в структуру фильтра ПАВ могут быть включены

дополнительные преобразователи или управляющие элементы. Поскольку большинство типов преобразователей ПАВ обладает двунаправленностью излучения, то во избежание паразитных отражений на торцы звукопровода наносят поглотители. С целью уменьшения вносимых потерь на входе и выходе фильтра применяются пассивные или активные согласующие цепи.

Основной вклад в формирование селективных свойств фильтра ПАВ вносят частотно – избирательные процессы преобразования волн на входе и выходе. Затухания ПАВ при распространении также являются частотно – зависимыми, но эта зависимость для большинства пьезоэлектриков сравнительно слаба во всем освоенном диапазоне частот вплоть до 1,0–1,5 ГГц, и ее обычно пренебрегают. В результате передаточная функция фильтра ПАВ определяется в основном сочетанием передаточных функций передающего и приемного преобразователей, а также согласующих цепей. Средняя частота фильтра ПАВ зависит от длины периода электродов преобразователей. Скорость ПАВ составляет 1500 – 5000 м/с, поэтому нижняя граница рабочего диапазона зависит от размеров имеющихся кристаллов, которые для частот ниже 5 – 10 МГц должны быть чрезмерно большими. Верхний предел ограничен возможностями технологии изготовления преобразователей и при использовании обычной фотолитографии составляет 300 – 500 МГц; применение электронографии расширяет эти границы до 1500 – 2000 МГц. Полоса пропускания фильтров ПАВ обратно пропорциональна числу электродов в преобразователях и может быть реализована в пределах от 0,1 % до 100 %. Полоса пропускания фильтров на ПАВ – резонаторах может быть сужена до 0,01 %.

Помимо указанных выше преимуществ, фильтры ПАВ могут обеспечить наименьший коэффициент прямоугольности  $K_n = 1,1 - 1,15$  по уровням (40/3) дБ, близкий к теоретическому пределу  $K_n = 1,0$ . Кроме того интегральные пьезофильтры на основе локализации энергии и ПАВ имеют габаритные индексы избирательности и потерь на порядок меньше, чем у фильтров других типов.

На рис. 2.6. приведена конструкция полосового фильтра на ПАВ с одним аподизированным преобразователем.

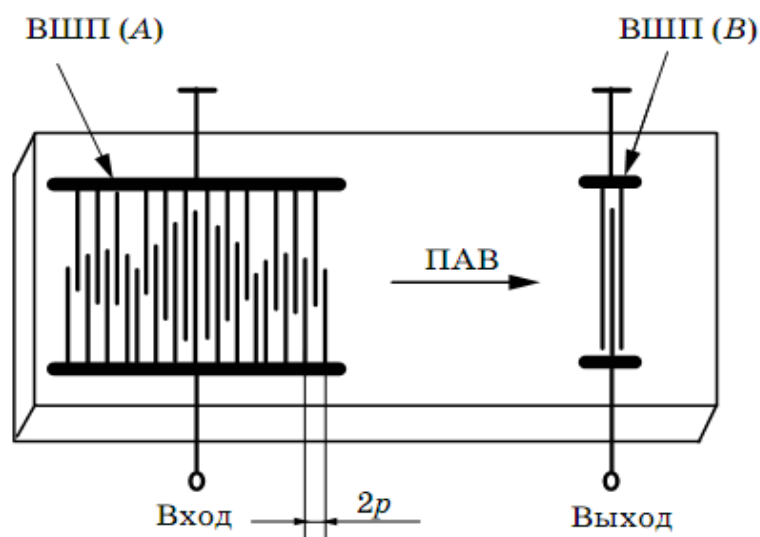


Рис. 2.1. Конструкция полосового фильтра на ПАВ с одним аподизированным преобразователем

Рассмотрим простейший вариант конструкции однопроходного фильтра (рис. 2.6). Входной преобразователь имеет многоэлектродную структуру. Число электродов выходного преобразователя невелико и выбрано с таким расчетом, чтобы его АЧХ не искажала существенно более узкополосную характеристику выходного преобразователя. В фильтре такой конструкции многоэлектродный (более узкополосный) преобразователь принято называть полосозадающим по сравнению с малоэлектродным – широкополосным. Практически расчет такого фильтра сводится к расчету топологии полосозадающего преобразователя, что определяет преимущество данной конструкции. Операция, реализующая заданный закон модуляции импульсного отклика преобразователя ПАВ, называется аподизацией преобразователя.

С помощью преобразования Фурье получим частотную характеристику встречно-штыревого преобразователя (ВШП)

$$K(\omega) = \sum_{m=1}^N (-1)^m W_m \exp \left[ -i\pi m \frac{\omega}{\omega_0} \right], \quad (36)$$

где  $W_n$  – величина апертуры ВШП в первом зазоре.

Поскольку число штырей выходного ВШП значительно меньше числа второго, он имеет полосу пропускания значительно шире и таким образом, частотная характеристика фильтра полностью определяется законом аподизации входного ВШП. На рис. 2.7 приведена амплитудно-частотная

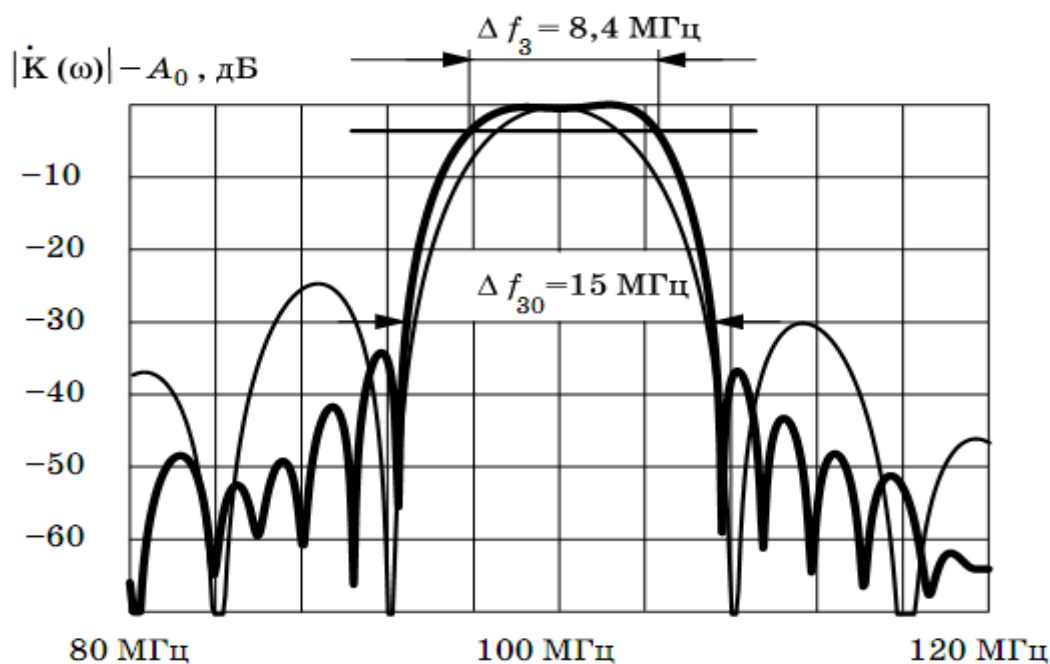


Рис. 2.2. Амплитудно-частотная характеристика фильтра на ПАВ с аподизацией входного ВШП функцией вида  $\sin x/x$ .

характеристика фильтра на ПАВ с аподизацией входного ВШП функцией вида  $\sin x/x$ .

## 2.2 Торцевой пьезопреобразователь.

Существует возможность широкополосного возбуждения ПАВ в пьезоактивных материалах с помощью торцевого пьезоэлектрического преобразователя (ТПП). ТПП (рисунок 2.4) представляет собой два металлических электрода 1, нанесенных на звукопровод из пьезоактивного материала, причем электроды расположены на взаимно ортогональных поверхностях (поверхности распространения ПАВ 2 и поверхности возбуждения 3) и образуют у общего ребра на поверхности возбуждения зазор, величина которого сравнима с длиной возбуждаемой ПАВ.

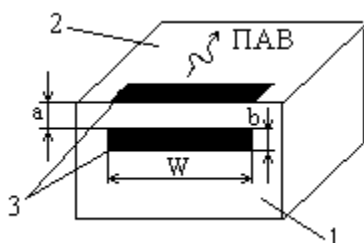


Рис. 2.3. Схема торцевого пьезоэлектрического преобразователя.

Принцип действия такого преобразователя основан на том, что в пьезоактивных материалах имеются поперечно-пьезоактивные направления.

Акустические волны, распространяющиеся в этих направлениях, могут сопровождаться поперечной волной электрической индукции, что позволяет возбуждать их тангенциальными электрическими полями с поверхности пьезоэлектрика. Поэтому, если ориентация звукопровода выбрана такой, что направление распространения ПАВ является поперечно-пьезоактивным, то ПАВ может эффективно возбуждаться тангенциальным электрическим полем в зазоре между электродами ТПП. Такое возбуждение более широкополосное, чем при возбуждении с помощью ВШП, поскольку в данном случае электрическое поле ПАВ не связано с пространственным-периодическим распределением возбуждающего электрического поля.

На рисунке 2.5 приведены экспериментальные кривые частотной зависимости коэффициента преобразования ТПП на кристалле ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) для величины зазоров  $a$ : 8 и 15 мкм. Неравномерность частотной характеристики коэффициента преобразования для ТПП с величиной зазора 8 мкм составила примерно 7дБ в диапазоне частот 150÷850 МГц при максимальной эффективности преобразования – 12.8 дБ, а для ТПП с величиной зазора 15 мкм – ~6дБ в диапазоне частот 150÷400 МГц при максимальной эффективности – 17.2дБ. видно, что в среднем коэффициент преобразования уменьшается с ростом частоты, что объясняется уменьшением перекрытия поперечного электрического поля, сопровождающего ПАВ, с возбуждающим тангенциальным электрическим полем в зазоре между электродами ТПП в исследуемом диапазоне частот. Возрастание же коэффициента преобразования при уменьшении величины зазор объясняется увеличением напряженности электрического поля в зазоре между электродами при одинаковой подводимой электрической мощности.

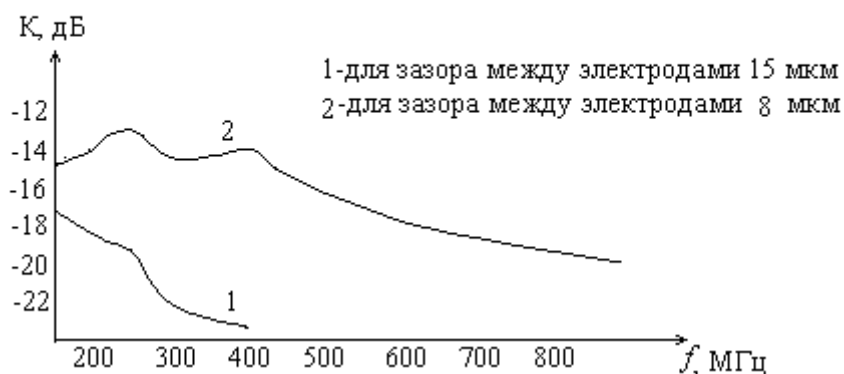


Рис. 2.4- Зависимость коэффициента преобразования ТПП от частоты.

Таким образом, ТПП могут с успехом применяться для возбуждения ПАВ в устройствах, для которых одним из основных требований является широкий диапазон рабочих частот.

Кроме того, важным преимуществом преобразователей такого типа является возможность изготовления их для работы на достаточно высоких



частотах ( до 1000 МГц) без применения сложной технологии, поскольку для этого требуется обеспечить величину зазора между электродами  $5\div 6$  мкм, что может быть выполнено с помощью обычной фотолитографии и даже механической гравировки.

Эффективность преобразования электромагнитной энергии в акустическую можно оценить с помощью простейшей эквивалентной схемы ТПП, представляющей параллельное соединение сопротивление излучения  $R_{и}$  и статической емкости преобразователя  $C_0$  (рисунок 2.6). Учитывая конечную высоту электродов на поверхности возбуждения, при условии  $b \gg a$  выражение для  $C_0$  имеет вид:

$$C_0 = (2W\varepsilon^n/\pi) \cdot \ln(4b/a) ,$$

где  $\varepsilon^n$  – диэлектрическая проницаемость кристалла.

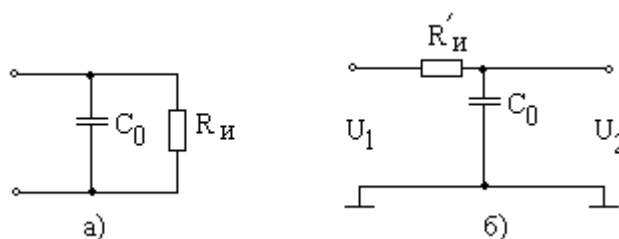


Рис. 2.6. - Эквивалентная электрическая схема ТПП:  
а- параллельная, б – последовательная.

Для ТПП идеально проводящие электроды которого непосредственно подключены к подводящей линии с волновым сопротивлением  $Z_0$ , эффективность  $K$  может быть найдена в виде:

$$K = -10 \lg [ (Y_0 + 1/R_{и} + (\omega C_0)^2 R_{и}) / 4 Y_0 ],$$

где  $Y_0$  – проводимость подводящей линии.

Для анализа искажений формы сигнала можно обратиться к последовательной эквивалентной схеме ТПП (рисунок 2.6, б.),

$$R'_{и} = X_{C_0}^2 / R_{и} .$$

Фактически последовательная схема представляет собой фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой среза  $f = 1/2\pi R'_{и} C_0$ . Если на вход схемы подать импульс напряжения прямоугольной формы, то на выходе будет наблюдаться импульс с затянутыми фронтами (рисунок 2.7), причем величина затягивания  $\tau_{\phi}$  определяется постоянной времени  $t = R'_{и} C_0$  и показывает время, в течение которого выходное напряжение возрастает от 10% до 90% своего конечного значения.

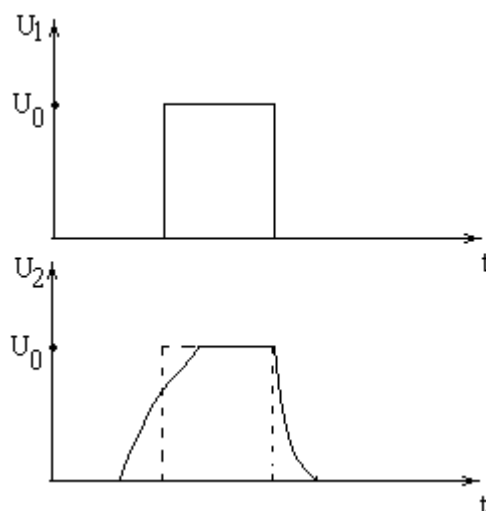


Рис. 2.7. - Временные диаграммы сигналов.

Другим важным параметром широкополосных устройств является линейность их фазо-частотных характеристик (ФЧХ). ФЧХ последовательной эквивалентной схемы определяется выражением

$$\varphi = -\arctg \omega R_n' C_0.$$

Величина  $R_n'$  является частотно зависимой ( $R_n' \approx 1/\omega$ ), поэтому можно считать, что  $\varphi = \text{const}$  для ТПП. Следовательно фаза выходного сигнала будет пропорциональна частоте, а значит ФЧХ будет линейной.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1. Измерение частотных характеристик

На рисунке 3.1 показана структурная схема для измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) ПФ.

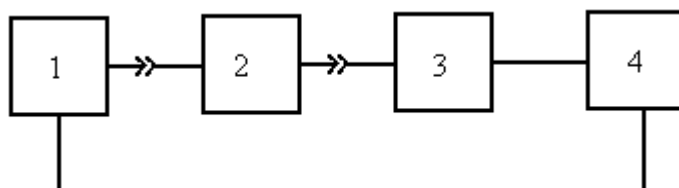


Рис.3.1 - Структурная схема для измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) ПФ.

1.-Генераторный блок прибора X1-42А(измерителя коэффициента стоячей волны (КСВ) и АЧХ); 2.-ПФ; 3.-Усилитель;4.-Измерительный блок прибора X1-42А.

## **3.2 Экспериментальное задание**

3.2.1. Собрать схему экспериментальной установки согласно рис. 3.1

3.2.2. Провести измерение частотных характеристик полосового фильтра согласно п. 3.1 настоящего руководства.

## **4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

4.1 Что такое ПФ на ПАВ? Каким образом он может применяться в системах обработки сигналов?

4.2 В каком диапазоне частот используются ПФ?

4.3 Перечислите основные достоинства фильтра на ПАВ.

4.4 Чем обусловлена большая широкополосность ТПП, в сравнении с ВШП.

## **5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

5.1. Титульный лист.

5.2. Цель работы.

5.3. Схема эксперимента.

5.4. Результаты эксперимента и их анализ.

5.5. Ответы на контрольные вопросы.

5.6. Выводы.

5.7. Список использованной литературы.

## **6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

6.1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1988. – 448с.

6.2. Бондаренко В.С., Орлов В.С. Фильтры на поверхностных акустических волнах. – М.: Радио и связь, 1984. – 272с.

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

6.4. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов / Пер. с франц. Под ред. В.В.Леманова - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. - 424 с.

6.5. Кайно Г. Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов / Пер. с англ. С.Н.Карпачева, В.Г. Можяева, И.Ю.Солодова; Под ред. О.В.Руденко. - М.: Мир, 1990. - 656 с.

6.6. Морган Д., Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах / Пер. с англ. С.А. Жгуна, М.Ю. Дивногорцева; Под ред. С.И.Баскакова. – М.: Радио и связь, 1990. – 416 с.

- 6.7. Поверхностные акустические волны / Под ред. А. Олинера; Пер. с англ. Г.Г. Кессених, Е.Д.Якушкина; Под ред. И.С.Резо. - М.: Мир, 1981. - 392 с.
- 6.8. Речицкий В.И., Акустоэлектронные радиоконпоненты. - М.: Радио и связь, 1987.– 192с.