

Министерство образования и науки Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной  
аппаратуры (КУДР)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой КУДР, доцент

\_\_\_\_\_ А.Г. Лоцилов

\_\_\_\_\_ 2017 г.

Конструирование и технология микро- и  
наноэлектронных средств

**ПОЛОСОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ПАВ**

Руководство к лабораторной работе для студентов  
направления подготовки бакалавра 11.03.03  
«Конструирование и технология электронных средств»

Рецензент

Доцент кафедры КУДР

\_\_\_\_\_ М.М. Славникова

\_\_\_\_\_ 2017 г.

Разработчик

Доцент кафедры КУДР

\_\_\_\_\_ М.Н. Романовский

\_\_\_\_\_ 2017 г.

2017

## Содержание

1 Общие сведения	3
2 Элементы конструкции фильтров на ПАВ	3
3 Характеристики ВШП	4
4 Параметры фильтров на ПАВ	6
5 Аподизация ВШП	7
6 Объект и методика эксперимента	8
7 Порядок выполнения работы	10
8 Контрольные вопросы	11
9 Рекомендуемая литература	11

## 1 Общие сведения

Поверхностные акустические волны (ПАВ) в твердом теле локализируются в приповерхностном слое толщиной порядка длины волны. Скорость ПАВ примерно на пять порядков меньше скорости электромагнитных волн. За счет взаимодействия с планарными структурами на поверхности твердого тела, можно изменять направление, скорость, затухание и др. характеристики ПАВ. Указанные особенности позволяют создавать на ПАВ эффективные устройства для обработки сигналов.

Полосовые фильтры на ПАВ характеризуются высокой прямоугольностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), исключительным внеполосным подавлением, температурной стабильностью, малым весом и габаритами, отсутствием энергопотребления. Они не требуют сложной настройки в аппаратуре и не могут расстроиться в процессе эксплуатации. Технология изготовления фильтров на ПАВ совместима с производством интегральных схем. К недостаткам устройств на ПАВ можно отнести относительно высокую стоимость, а также повышенные потери.

Полосовые фильтры на ПАВ и др. устройства акустоэлектроники находят широкое применение в радиолокации, спутниковой связи и др. областях. Частотный диапазон устройств – от 10 МГц до 5 ГГц.

*Цель настоящей работы – ознакомление с принципом действия, базовой конструкцией, методикой определения основных параметров полосовых фильтров на ПАВ.*

## 2 Элементы конструкции фильтров на ПАВ

Простейший фильтр на ПАВ содержит (см. рис. 1): входной преобразователь (1), звукопровод (2), выходной преобразователь (3), акустический поглотитель (4), электростатический экран (5). В качестве преобразователей используют встречно-штыревые системы электродов. Звукопроводы обычно изготавливают из пьезоэлектрических материалов.

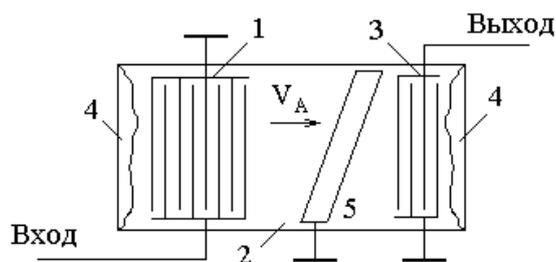


Рисунок 1 – Базовая конструкция фильтра на ПАВ

Входной встречно-штыревой преобразователь (ВШП) создает на рабочей поверхности звукопровода электрическое поле между противофазными штырями. Под действием электрического поля в приповерхностном слое звукопровода за счет обратного пьезоэффекта возникают упругие волны деформации – ПАВ. ПАВ со скоростью  $V_A$  распространяется в обе стороны от входного преобразователя. На границах звукопровода акустический поглотитель, во избежание отражений, демпфирует ПАВ. Электростатический экран служит для уменьшения прямой электромагнитной наводки.

Штыри ВШП расположены периодически с шагом  $h/2$ . *На частоте акустического синхронизма  $f_0$*  ПАВ от отдельных штырей складываются в фазе и, следовательно, возбуждаются наиболее интенсивно. Длина таких волн  $\lambda_A = h = V_A/f_0$ .

В пьезоэлектрических материалах ПАВ сопровождаются переменным электрическим полем. Работа ВШП в режиме приема основана на прямом пьезоэлектрическом эффекте. Мерой эффективности взаимодействия ПАВ с ВШП является коэффициент электромеханической связи

$$k_m^2 = -\frac{2\Delta V_A}{V_A}, \quad (1)$$

где  $\Delta V_A$  – изменение скорости ПАВ при ее переходе на закороченную (покрытую металлическим слоем) поверхность.

### 3 Характеристики ВШП

В качестве парциального элемента ВШП, вносящего энергетический вклад в формирование ПАВ, выступают пары соседних противофазных электродов. Вклад  $i$ -ой пары электродов  $A_i$  определяется их перекрытием  $W_i$ . *Максимальное значение перекрытия электродов  $W_0$  называется апертурой преобразователя.*

Поддадим на ВШП  $\delta$ -импульс электрического напряжения. Волновой пакет на выходе ВШП – импульсный отклик преобразователя – является суперпозицией плоских волн, созданных всеми парами электродов и следующих с задержкой, пропорциональной координате источника. Импульсную характеристику ВШП можно представить в виде суммы

$$g(t) = \sum_{i=1}^N (-1)^i A_i \delta\left(t - \frac{x_i}{V_A}\right), \quad (2)$$

где  $t$  – время;  $N$  – число электродов;  $A_i$  и  $x_i$  – амплитуды и координаты источников;  $(-1)^i$  – коэффициент смены знака электрического поля между электродами;  $x_i/V_A = t_i$  – время выборки.

В модели  $\delta$ -источников точки  $x_i$  соответствуют середине  $i$ -го электрода для пьезоэлектрических материалов с большим коэффициентом электромеханической связи и середине зазора между  $i$  и  $(i+1)$  электродами для подложек из слабых пьезоэлектриков.

АЧХ ВШП находим прямым Фурье-преобразованием импульсной характеристики (2):

$$\dot{K}(\omega) = \sum_{i=1}^N (-1)^i A_i e^{-j\omega t_i}. \quad (3)$$

Для ВШП простейшего фильтра  $A_i = A_0 = const$ ;  $t_i = i/(2f_0)$ ;  $(-1)^i = e^{j\pi i}$ . Выражение в правой части (3) является геометрической прогрессией, и может быть вычислено:

$$K(f) = A_0 N \frac{\sin[\pi N(f-f_0)/(2f_0)]}{\pi N(f-f_0)/(2f_0)} \sim \frac{\sin(x)}{x}. \quad (4)$$

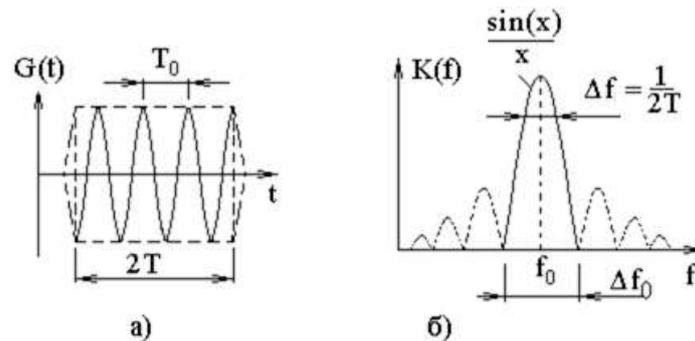


Рисунок 2 – Импульсный отклик (а) и АЧХ (б) ВШП с электродами одинаковой длины ( $W_i = W_0 = const$ )

Первые нули АЧХ (рис. 2, б) соответствуют частотам

$$f_{1,2} = f_0 \pm \frac{f_0}{N}, \quad (5)$$

*относительная ширина полосы пропускания обратно пропорциональна числу электродов:*

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_2 - f_1}{f_0} = \frac{2}{N}. \quad (6)$$

Таким образом, АЧХ ВШП однозначно связана с числом, расположением и взаимным перекрытием излучающих электродов. За счет изменения топологии ВШП можно сформировать различные АЧХ. **Весовая обработка ВШП изменением степени перекрытия штырей  $W_i$  по его длине называется аподизацией. ВШП с одинаковым расстоянием между штырями называются эквидистантными, с неодинаковым расстоянием – неэквидистантными преобразователями.**

#### 4 Параметры фильтров на ПАВ

Характеристики фильтра на ПАВ предопределяются ВШП, т. к. пьезоэлектрическая подложка обычно частотно-зависимыми свойствами не обладает. Импульсная характеристика определяется сверткой импульсных характеристик входного и выходного ВШП:

$$G(t) = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (-1)^{k+i} W_k W_i \delta(t - t_k + t_i). \quad (7)$$

Выражение для АЧХ фильтра представляет собой произведение частотных характеристик преобразователей. Если выходной ВШП широкополосный (содержит малое число электродов), то АЧХ находится прямым Фурье-преобразованием функции аподизации электродов  $W(x_i)$  входного ВШП.

АЧХ идеального полосового фильтра прямоугольная. Форма импульсного отклика такого фильтра описывается бесконечной во времени функцией

$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} \sin(x)/x, & x \neq 0; \\ 1, & x = 0. \end{cases}$$

Если ограничить слева и справа импульсную характеристику некоторым значением времени  $T$  (рис. 3), то АЧХ примет вид, показанный на рис. 4.

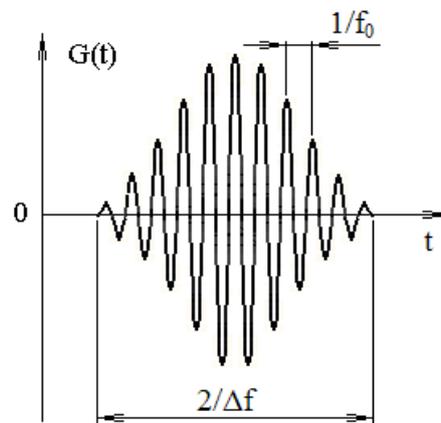


Рисунок 3 – Центральный лепесток импульсной характеристики фильтра на ПАВ

Ограничение импульсного отклика  $G(t)$  во времени эквивалентно умножению бесконечного отклика на прямоугольную функцию окна  $H(t)$ . Перемножение во временной области  $G(t)$  и  $H(t)$  эквивалентно операции свертки  $K(f)$  и  $H(f)$  в частотной области. Результатом и является АЧХ рис. 4.

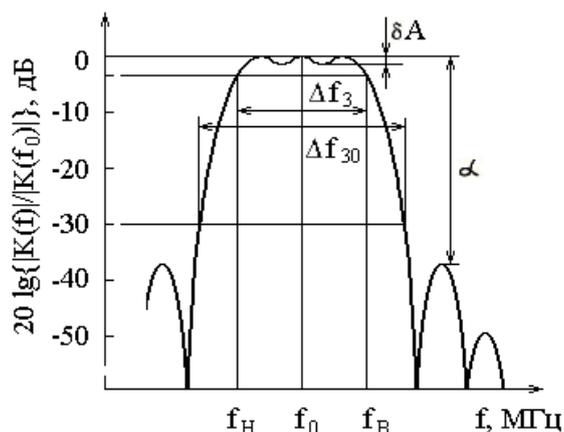


Рисунок 4 – К определению основных параметров фильтра

Основными параметрами полосовых фильтров на ПАВ являются:

- **полоса пропускания  $\Delta f$**  – разница между верхней  $f_B$  и нижней  $f_H$  частотами (рис. 4), определяемыми на уровне минус 3 дБ от максимального значения модуля коэффициента передачи фильтра  $|K(f)|$ ;
- **средняя частота полосы пропускания  $f_0$**  – полусумма верхней  $f_B$  и нижней  $f_H$  частот;
- **неравномерность АЧХ в полосе рабочих частот  $\Delta A$**  – разница между максимальным и минимальным значениями модуля коэффициента передачи  $|K(f)|$ , выраженного в децибелах, в заданном диапазоне частот внутри полосы пропускания;
- **гарантированное относительное затухание  $\alpha$**  – отношение значений модуля коэффициента передачи  $|K(f)|$  на номинальной частоте к его максимальному значению в заданных диапазонах частот вне полосы пропускания, выраженное в децибелах;
- **коэффициент прямоугольности  $K_{\Pi}$**  – отношение полосы частот по уровню минус 30дБ к полосе частот по уровню минус 3дБ. Верхний и нижний уровни измерения полосы частот могут быть другими (обычно они оговариваются), например, минус 40 дБ и минус 1 дБ, соответственно;
- **вносимое затухание  $A_0$**  – значение модуля коэффициента передачи фильтра на номинальной частоте, выраженное в децибелах.

## 5 Аподизация ВШП

Гарантированное относительное затухание ( $\alpha$ ) фильтра на ПАВ с прямоугольной весовой функцией окна ( $W_i = W_0 = const$ ) составляет около 13 дБ, что недостаточно для большинства применений фильтров. Увеличить  $\alpha$  позволяет весовая обработка ВШП изменением степени перекрытия электродов в соответствии с функций аподизации  $F_a$ :

$$W_i = W_0 F_a(i). \quad (8)$$

Исследовано большое число функций аподизации: Хемминга (уровень подавления боковых лепестков  $\alpha = -42,8$  дБ); Чебышева ( $\alpha = -42,8$  дБ); Кайзера ( $\alpha = -54,2$  дБ) и др., а также комбинаций  $F_a$  входного и выходного преобразователей.

*Отметим, что аподизация и входного, и выходного ВШП требует введения в конструкцию фильтра многополоскового ответвителя.*

Например, аналитическое выражение для функции Хемминга имеет вид

$$F_x(i) = k + (1 - k) \cos^m \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{2i}{N} - 1 \right) \right], \quad (9)$$

где  $k$  и  $m$  – параметры функции,  $i$  и  $N$  – номер и число электродов ВШП. Параметры  $k$  и  $m$  в общем случае могут быть различными, однако чаще всего выбирают  $k = 0.08$  и  $m = 2$  (рис. 5).

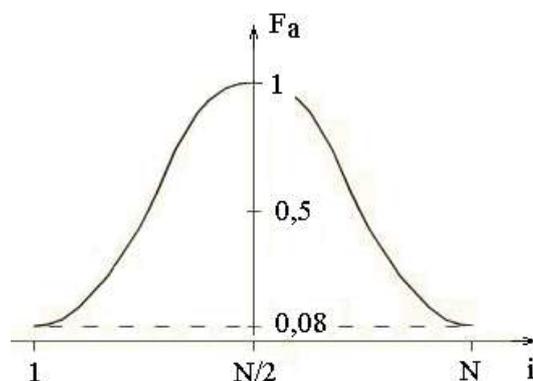


Рисунок 5 – Функция аподизации Хемминга

**Значения  $K_{\Pi} < 1,1$  достигаются при аподизации электродов ВШП вида  $\text{sinc}(x)$ .** По мере увеличения числа используемых лепестков функции  $\text{sinc}(x)$  уменьшается коэффициент прямоугольности и неравномерность АЧХ в полосе пропускания, увеличивается гарантированное относительное затухание.

*На практике из-за разного рода вторичных эффектов (дифракция, изменение скорости ПАВ под электродами ВШП, потери при регенерации ПАВ в электродах ВШП и др.) число используемых лепестков функции  $\text{sinc}(x)$  ограничено значением  $n \sim 20$ . ВШП с числом лепестков более пяти требуют громоздкого расчета, учитывающего влияние эффектов второго порядка. Кроме того, по мере увеличения значения  $n$  увеличиваются вносимые фильтром потери. Поэтому обычно  $n$  выбирают равным от пяти до семи.*

## 6 Объект и методика эксперимента

Объектом исследования является фильтр К04ФЕ003 (рис. 6, 7) – полосовой фильтр на ПАВ второй промежуточной частоты звука стандарта телевидения D/К.

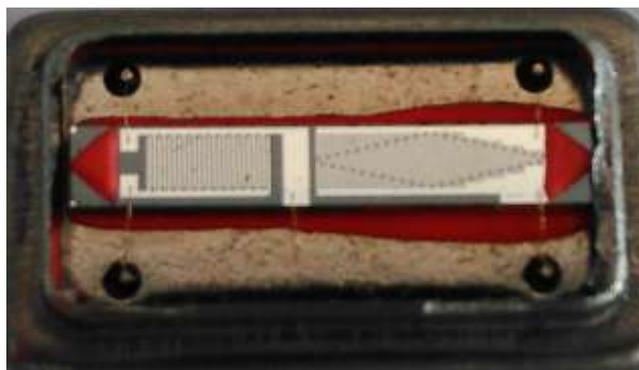


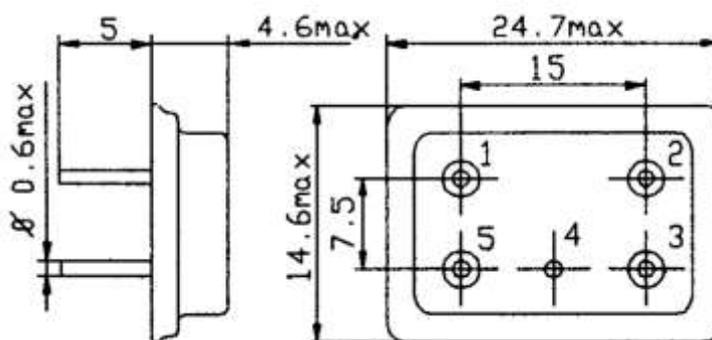
Рисунок 6 – Структура полосового фильтра К04ФЕ003

Материал звукопровода фильтра К04ФЕ003 – пьезоэлектрическая керамика. Электрические характеристики фильтра при температуре  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , сопротивлении генератора  $R_{Г} = 50 \text{ Ом}$ , сопротивлении нагрузки  $R_{Н} = 1 \text{ кОм}$  приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Электрические характеристики фильтра К04ФЕ003

Параметр	Значение
Затухание передачи на частоте максимального сигнала	15 дБ
Нижняя частота среза по уровню -3 дБ от максимального сигнала	6,35 МГц
Верхняя частота среза по уровню -3 дБ от максимального сигнала	6,65 МГц
Затухание сигнала относительно максимального сигнала на частотах:	
3 – 5 МГц	38 дБ
5 – 5,95 МГц	34 дБ
7,05 – 8 МГц	34 дБ
Входной импеданс ( $R_{ВХ}$ , $\varphi_{ВХ}$ )	240 Ом, $73^\circ$
Выходной импеданс на нижней частоте среза по уровню -3 дБ от максимального сигнала ( $R_{ВЫХ}$ , $\varphi_{ВЫХ}$ )	490 Ом, $74^\circ$

Аппаратное обеспечение эксперимента включает микроскоп бинокулярный стереоскопический МБС-12, объект-микрометр отраженного света, двухканальный цифровой осциллограф DS1042С, функциональный генератор AFG3021. Структурная схема измерений характеристик фильтра приведена на рис. 8.



1 – вход; 2 – выход (общий); 3 – выход; 4, 5 – общий.

Рисунок 7 – Корпус и назначение выводов полосового фильтра К04ФЕ003



Рисунок 8 – Структурная схема измерений частотной и импульсной характеристик фильтра

## 7 Порядок выполнения работы

7.1 Ознакомиться с разделами 1 – 6, руководствами по эксплуатации генератора AFG3021 и осциллографа DS1042C. Ответить на контрольные вопросы.

7.2 По микрофотографии и образцу изучить конструкцию фильтра на ПАВ и назначение основных его элементов.

7.3 Определить основные топологические параметры входного и выходного ВШП – апертуру, шаг и число штырей, расстояние между преобразователями.

7.4 Измерить АЧХ и определить основные электрические параметры фильтра (см. с. 7).

**Частотная характеристика измеряется в диапазоне 3÷ 8 МГц при напряжении на выходе генератора 1В (Run Mode – Continues).**

7.5 По результатам п. 7.3 и 7.4 рассчитать скорость ПАВ.

7.6 Измерить импульсную характеристику фильтра. Определить длительность и задержку импульсного отклика, период быстрых изменений импульсной характеристики и их частоту.

**Для измерения импульсной характеристики использовать радиоимпульс с параметрами: частота заполнения –  $f_0$ , длительность –  $1 \div 2$  периода  $f_0$  (Run Mode – Burst).**

7.7 По результатам п. 7.3 и 7.6 оценить полосу пропускания фильтра и скорость ПАВ.

7.8 Оформить отчет.

## 8 Контрольные вопросы

8.1 Перечислите основные элементы базовой конструкции полосового фильтра на ПАВ.

8.2 Как выглядит АЧХ реального полосового фильтра? Назовите его основные параметры.

8.3 Чем отличаются импульсные характеристики реального и идеального полосового фильтра на ПАВ?

8.4 Как изменяется коэффициент прямоугольности фильтра с аподизированным ВШП по мере уменьшения количества лепестков функции  $\text{sinc}(x)$ ?

8.5 Какими параметрами топологии ВШП определяется минимальный коэффициент прямоугольности фильтра на ПАВ с аподизацией  $\text{sinc}(x)$ ?

8.6 Как по размерам аподизированного ВШП (длина главного лепестка, расстояние между электродами) определить среднюю частоту и полосу пропускания фильтра?

8.7 Каково назначение органов управления, индикации и разъемов на передней панели генераторов и осциллографа?

## 9 Рекомендуемая литература

9.1 Балышева О.Л. Акустоэлектронная компонентная база // Журнал радиоэлектроники, № 6, 2014 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun14/2/text.pdf>, свободный (дата обращения: 02.01.2016).

9.2 Дмитриев В.Ф., Кравец Е.В. Полосовой фильтр на ПАВ для фильтрации радиосигналов. Методические указания к лабораторной работе по курсу Акустоэлектронные устройства. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2012. – 14 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://guap.ru/guap/kaf25/aeu\\_2.pdf](http://guap.ru/guap/kaf25/aeu_2.pdf), свободный (дата обращения 02.01.2016).

9.3 Поверхностные акустические волны в радиотехнике: конспект лекций по дисциплине / сост.: Г.Ф. Афанасьев, Л.Ш. Биктимиров. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 75 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2013/121.pdf>, свободный (дата обращения: 02.01.2016).