

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

М.Н. Романовский

ПОЛОСОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ПАВ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«Интегральные устройства радиоэлектроники»

Томск
2022

УДК 621.382
ББК 32.844
Р 69

Рецензент
Еханин С.Г., профессор кафедры конструирования узлов и деталей
РЭА, докт. техн. наук

Романовский Михаил Николаевич
Р 69 Полосовые фильтры на ПАВ: методические указания к лабораторной работе по дисциплине Интегральные устройства радиоэлектроники/ М.Н. Романовский. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 10 с.

Рассмотрены принцип действия, основные элементы конструкции и параметры полосовых фильтров на поверхностных акустических волнах. Приведены порядок выполнения работы, контрольные вопросы, список рекомендуемой литературы.

Одобрено на заседании каф. КУДР протокол № 233 от 17 февраля 2022 г.

УДК 621.382
ББК 32.844

© Романовский М.Н., 2022
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
2 ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ.....	4
3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ВШП.....	5
4 ПАРАМЕТРЫ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ.....	6
5 АПОДИЗАЦИЯ ВШП.....	7
6 ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА.....	8
7 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	9
8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	10
9 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	10

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 прямоуглольностью 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.

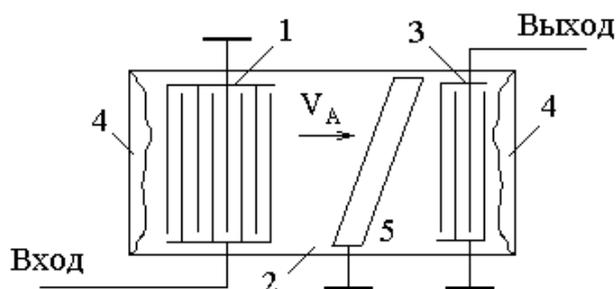


Рисунок 1 – Базовая конструкция фильтра на ПАВ

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 ΔV_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.**

Подадим на ВШП δ -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

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

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

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

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:

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

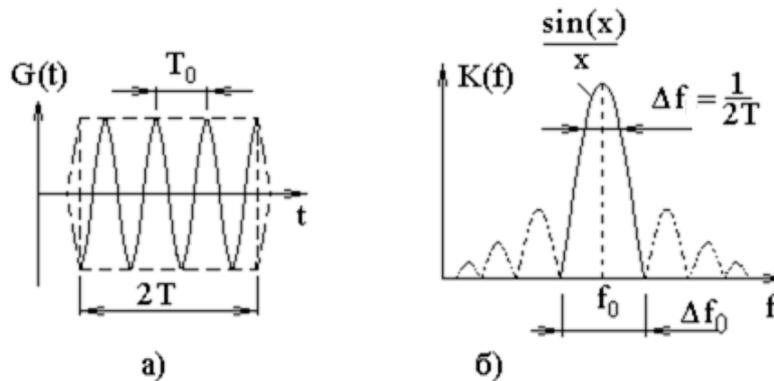


Рисунок 2 – Импульсный отклик (а) и АЧХ (б) ВШП с электродами одинаковой длины ($W_i = W_0 = const$)

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.

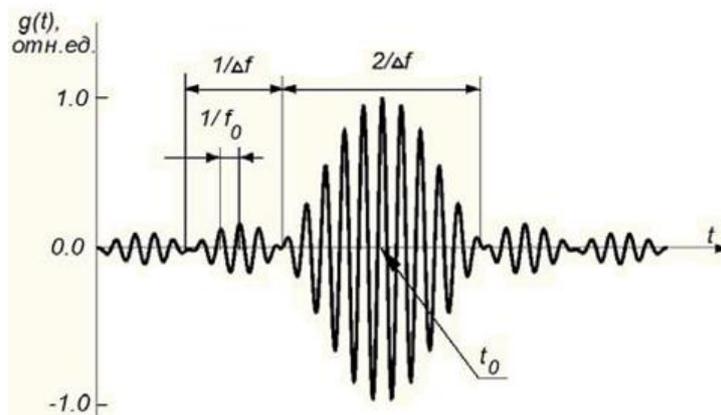


Рисунок 3 – Пять лепестков импульсной характеристики фильтра на ПАВ

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.

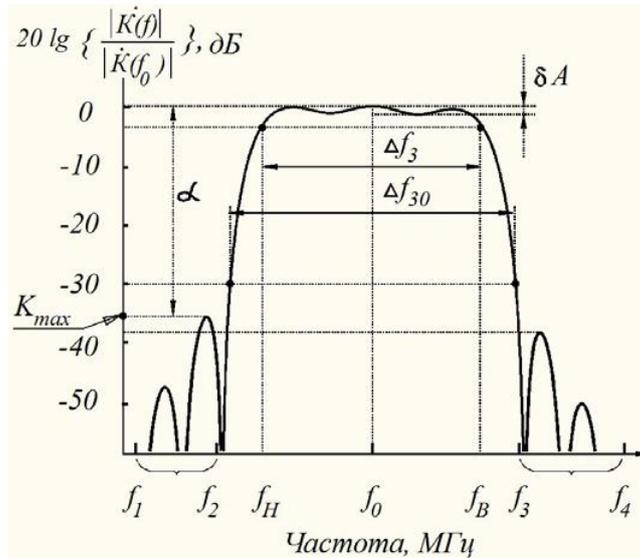


Рисунок 4 – К определению основных параметров фильтра

Основными параметрами полосовых фильтров на ПАВ являются:

- **полоса пропускания Δf** – 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;
- **номинальная частота** – частота, устанавливаемая в технической документации на фильтр;
- **неравномерность АЧХ в полосе рабочих частот δA** – разница между максимальным и минимальным значениями модуля коэффициента передачи $|K(f)|$, выраженного в децибелах, в заданном диапазоне частот внутри полосы пропускания;
- **гарантированное относительное затухание α** – 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 $K_{п}$** – отношение полосы частот по уровню минус 30 дБ к полосе частот по уровню минус 3 дБ. 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 (α) фильтра на ПАВ с прямоугольной весовой функцией окна ($W_i = W_0 = const$) составляет около 13 дБ, что недостаточно для большинства применений фильтров. Увеличить α 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).

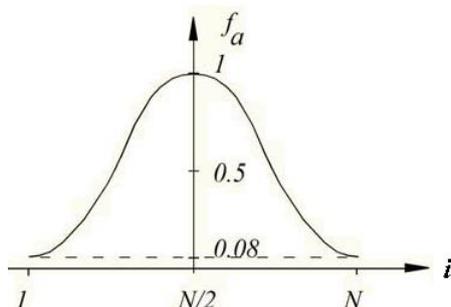


Рисунок 5 – Функция аподизации Хемминга

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

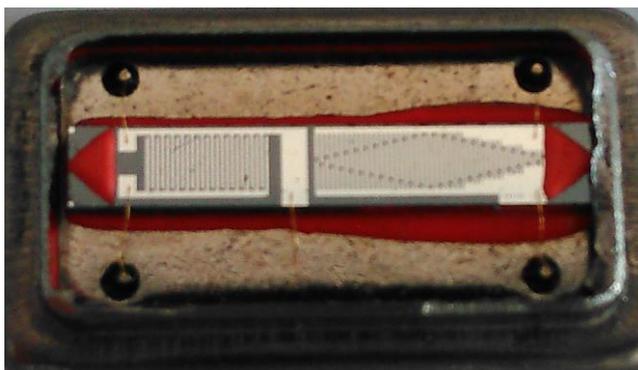
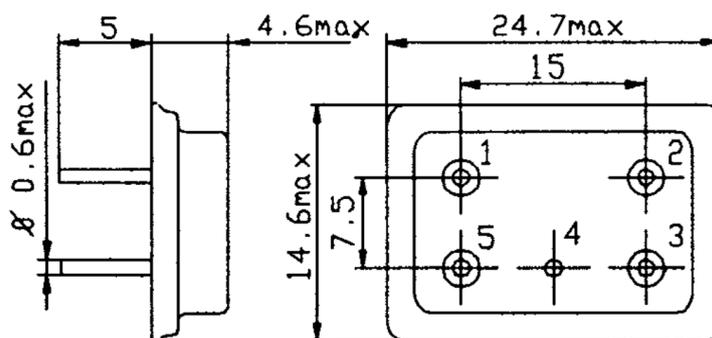


Рисунок 6 – Структура полосового фильтра К04ФЕ003



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

Рисунок 7 – Корпус и назначение выводов полосового фильтра К04ФЕ003

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.



Рисунок 8 – Структурная схема измерений частотной и импульсной характеристик фильтра

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
Входной импеданс ($R_{ВХ}$, $\varphi_{ВХ}$)	240 Ом, 73°
Выходной импеданс на нижней частота среза по уровню -3 дБ от максимального сигнала ($R_{ВЫХ}$, $\varphi_{ВЫХ}$)	490 Ом, 74°

7 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

7.1 Ознакомиться с разделами 1 – 6, руководствами по эксплуатации генератора AFG3021 и осциллографа DS1042С. 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 $3 \div 8$ 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 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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).

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://guar.ru/guar/kaf25/aeu_2.pdf, свободный (дата обращения 02.01.2016).

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).