

Министерство науки и высшего образования Российской  
Федерации

Томский государственный  
университет систем управления и  
радиоэлектроники

М.Н. Романовский

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА НА ПАВ**

Методические указания к курсовому проекту и самостоятельной работе  
по дисциплине Интегральные устройства радиоэлектроники

Томск  
2022

УДК 621.382

ББК 32.844

Р69

Рецензент

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

**Романовский Михаил Николаевич**

Р69 Проектирование полосового фильтра на ПАВ: методические указания к курсовому проекту и самостоятельной работе по дисциплине Интегральные устройств радиоэлектроники / М.Н. Романовский. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 19 с.

Рассмотрены основные элементы и этапы проектирования полосовых фильтров на поверхностных акустических волнах. Приведены порядок выполнения работы, список 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

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Общие сведения.....	4
2 Выбор материала звукопровода.....	6
3 Расчет преобразователей .....	7
4 Входная и выходная проводимость фильтра.....	10
5 Определение размеров звукопровода.....	12
6 Материалы ВШП и поглотителей .....	13
7 Влияние вторичных эффектов .....	14
8 Электроакустическое согласование .....	16
9 Порядок работы .....	18
Список литературы .....	19

## 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Интегральные устройства радиоэлектроники – это интегральные схемы (ИС) и технологически совместимые с ними функциональные устройства. Для ИС характерна технологическая интеграция, для функциональных устройств – интеграция параметрическая.

В функциональных акустоэлектронных устройствах носителями информации выступают поверхностные волны упругих деформаций в непрерывных (континуальных) средах, в которых возможен (как правило) пьезоэлектрический эффект.

Основными элементами устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) являются электроакустические преобразователи и звукопроводы. В качестве преобразователей используются встречно-штыревые системы электродов различной конструкции на пьезоэлектрической подложке [1–3]. Дополнительные планарные элементы на поверхности звукопровода позволяют управлять характеристиками ПАВ: направлением, скоростью, затуханием и т. д. Частотный диапазон устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) составляет от 10 МГц до 3 ГГц (в лабораторных образцах до 5 ГГц).

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 их изготовления совместима с производством интегральных схем.

Основными параметрами полосовых фильтров на ПАВ являются [4]:

- полоса пропускания ( $\Delta f$ ) – разница между верхней  $f_v$  и нижней  $f_n$  частотами, определяемыми на уровне 3 дБ (соответствует уровню 0.808) от максимального значения модуля коэффициента передачи фильтра  $|K(f)|$ ;

- средняя частота полосы пропускания ( $f_0$ ) – полусумма верхней ( $f_v$ ) и нижней ( $f_n$ ) частот;

- номинальная частота – частота, устанавливаемая в технической документации на фильтр;

- 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 – отношение значения модуля коэффициента передачи  $|K(f)|$  на номинальной частоте к его максимальному значению в заданных диапазонах частот вне полосы пропускания, выраженное в децибелах;

- коэффициент прямоугольности ( $K_p$ ) – 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.

В техническом задании на проектирование фильтра на ПАВ обычно задают не точный вид АЧХ, а предельные значения его основных параметров. Это позволяет подбирать конечную импульсную характеристику исходя из заданных ограничений. Частотный спектр импульсной характеристики фильтра соответствует АЧХ.

Проектируемый фильтр содержит (рис. 1): входной (1) и выходной (3) встречно-штыревые преобразователи (ВШП), звукопровод (2), акустический поглотитель (4).

Процедура проектирования включает выбор материала звукопровода и расчет параметров ВШП.

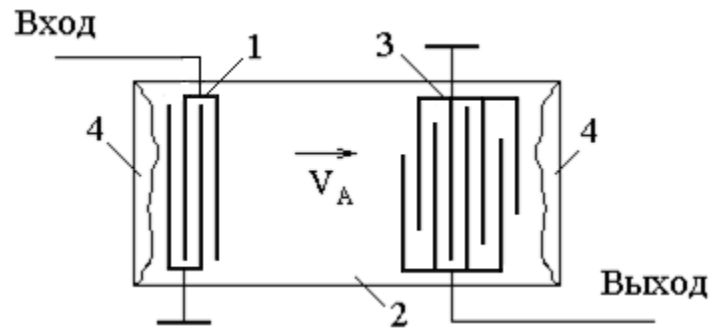


Рисунок 1 – Структура полосового фильтра на ПАВ

Цель настоящей работы – на примере фильтров приобрести начальные навыки проектирования акустоэлектронных устройств на ПАВ.

## 2 ВЫБОР МАТЕРИАЛА ЗВУКОПРОВОДА

Звукопроводы изготавливают как из монокристаллов, так и из поликристаллических (пьезокерамических) материалов. Монокристаллы более стабильны во времени, обеспечивают меньшее затухание ПАВ (0,1÷0,5 дБ/см на частотах до 2 ГГц) и сильную пьезоэлектрическую связь.

Параметры монокристаллических материалов звукопроводов (табл. 1) зависят от кристаллографической ориентации (плоскости среза). Скорость распространения ПАВ ( $V_A$ ) предопределяет границу верхних частот и габариты фильтра. Коэффициент электромеханической связи ( $k_m^2$ ) характеризует эффективность взаимодействия ПАВ с ВШП, т. е. пьезоэлектрические свойства звукопровода. Температурный коэффициент частоты ( $\alpha_f$ ) – относительное изменение частоты  $f$  на 1 °С – учитывает изменения размеров звукопровода и скорости распространения ПАВ с температурой.

Электроакустическому согласованию ВШП отвечает равенство полос пропускания преобразователя и согласующей цепи. Относительная полоса пропускания фильтров ограничена свойствами пьезоэлектрического материала.

Чтобы потери в устройстве были минимальны, необходимо выполнить условие

$$\frac{\Delta f}{f_0} \leq \sqrt{\frac{k_m^2}{\pi}}$$

Поэтому для широкополосных фильтров на ПАВ требуются материалы с большим значением  $k_m^2$ . Например, кварц ST-среза используется для устройств с полосой (0,3÷2) %, танталат лития – (4÷10) %, ниобат лития – (10÷23) %.

Таблица 1 – Основные параметры пьезоэлектрических материалов

Материал	$V_A$ , км/с	$k_m^2$	$\alpha_f \cdot 10^6$ , °С <sup>-1</sup>
Кварц (SiO <sub>2</sub> )	3.15÷3.2	0.0012÷0.0024	9÷14.8
Ниобат лития (LiNbO <sub>3</sub> )	3.48÷4.0	0.0052÷0.0554	14.4÷15.9
Германат висмута (Bi <sub>12</sub> GeO <sub>20</sub> )	1.62÷1.7	0.007÷0.0164	100
Танталат лития (LiTaO <sub>3</sub> )	3.22÷3.31	0.0069÷0.0093	16.1÷22
Силикат висмута (Bi <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> )	167	0.018	118

На данном этапе проектирования должны быть определены основные параметры материала звукопровода: скорость ПАВ, коэффициент электромеханической связи, угол отклонения потока энергии, коэффициент анизотропии, акустическое сопротивление, температурные коэффициенты скорости и задержки, диэлектрическая проницаемость. Основные параметры ряда материалов приведены в [1, 3]

### 3 РАСЧЕТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Встречно-штыревой преобразователь (ВШП) состоит из двух гребенок тонкопленочных металлических электродов (штырей), вложенных друг в друга и расположенных на пьезоэлектрической подложке (рис. 1). В качестве парциального элемента ВШП, вносящего энергетический вклад в формирование ПАВ, выступают пары соседних противофазных электродов. Для реализации разнообразных АЧХ предложено множество вариантов аподизации – весовой обработки амплитуд и фаз парциальных волн [1, 3].

Расчет ВШП предполагает вычисление или выбор: периода следования ( $h$ ), ширины ( $a$ ) и количества ( $N$ ) электродов; апертуры ( $W_0$ ) и функции аподизации ВШП; расстояния между входным и выходным преобразователями; согласующих элементов; толщины электродов ВШП.

Период следования электродов ВШП соответствует длине ПАВ ( $\lambda_A$ ):

$$h = \lambda_A = \frac{V_A}{f_0}$$

Ширина электродов ( $a$ ) и зазор между ними ( $b$ )

$$a = b = \frac{\lambda_A}{4}$$

Энергетический вклад  $i$ -ой пары электродов ( $A_i$ ) в формирование ПАВ определяется их перекрытием ( $W_i$ ). Аподизация ВШП достигается изменением  $W_i$  вдоль оси преобразователя. В основе расчета  $W_i$  лежат преобразования Фурье, связывающие частотную и импульсную характеристики ВШП:

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} G(t) e^{i\omega t} dt,$$
$$G(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\omega) e^{-i\omega t} d\omega.$$

Максимальное перекрытие  $W_0$  – апертура ВШП – выбирается из условия согласования с источником сигнала:

$$W_0 = (10 \div 200) * \lambda_A.$$

В простейшем эквидистантном ( $h = \text{const}$ ) и неаподизированном ( $W_i = W_0$ ) преобразователе парциальные волны складываются в фазе с одинаковой амплитудой. АЧХ такого ВШП соответствует огибающей спектра радиоимпульса со средней частотой  $f_0$  (рис. 2) и имеет вид функции кардинальный синус:

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}, \text{ при } x \neq 0;$$
$$\text{sinc}(x) = 1, \text{ при } x = 0.$$

Наряду с главным лепестком, определяющим полосу пропускания ВШП, функция  $\text{sinc}(x)$  имеет ряд так называемых боковых лепестков. Подавление боковых лепестков у простейшего ВШП не более 13.6 дБ, что для полосовых фильтров часто является недостаточным.

Идеальный полосовой фильтр должен иметь прямоугольную АЧХ ( $K_{\Pi} = 1$ ). Импульсная характеристика такого фильтра имеет вид бесконечной во времени функции

$\text{sinc}(x)$ . В результате ограничения импульсной характеристики во времени появляются боковые лепестки, а также неравномерность АЧХ в полосе пропускания. Объясняется это тем, что разрывы сигнала приводят к возникновению в его спектре высоких паразитных частот (явление Гиббса).

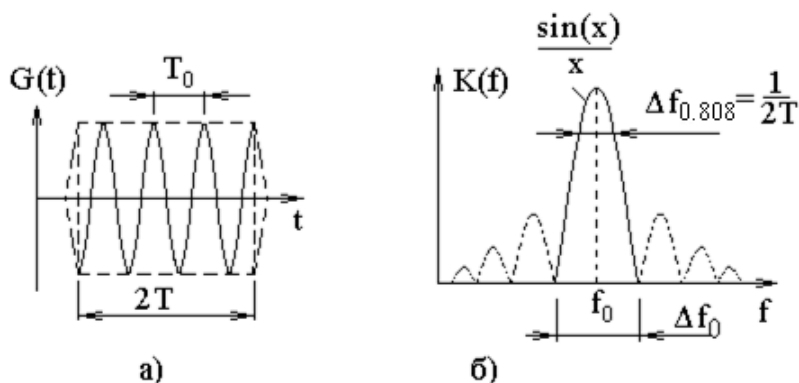


Рисунок 2 – Импульсный отклик (а) и АЧХ (б) ВШП с эквидистантными электродами одинаковой длины ( $W_i = W_0 = \text{const}$ )

Значения  $K_{\text{п}} < 1,1$  достигаются аподизацией ВШП вида  $\text{sinc}(x)$ . Длительность импульсной характеристики (т. е. длину преобразователя) ограничивают при этом несколькими лепестками. При числе боковых лепестков  $n = 2$  относительное затухание составляет уже до 23 дБ.

Для дальнейшего снижения боковых лепестков АЧХ применяют различные способы сглаживания импульсной характеристики к краям. С этой целью ее умножают на некоторую убывающую к краям взвешивающую функцию ( $F_A$ ), называемую функцией аподизации. Чаще всего используют функции аподизации Хемминга или Кайзера, обеспечивающие подавление уровня боковых лепестков АЧХ до 40 и до 60дБ, соответственно.

Длину центрального ( $i = 0$ ) электрода обычно выбирают равной длине электродов неаподизованного ВШП. Перекрытие  $i$ -го со следующим за ним электродом в обе стороны от центра ВШП

$$W_i = \left| \frac{\sin \frac{\pi \Delta f}{f_0} i}{\frac{\pi \Delta f}{f_0} i} F_{Ai} \right| * W_0, \text{ при } 0 < |i| \leq N_{\text{max}}$$

Функциональную длину электродов в зависимости от номера  $i$  можно рассчитать по формуле

$$l_i = (-1)^i [W_i + (W_0 - |l_{i-1}|)], \text{ при } 0 < |i| \leq N_{\text{max}}.$$

Знак  $l_i$  определяет принадлежность электрода к верхней или нижней гребенке преобразователя.

Максимальное количество штырей справа и слева от центра ВШП

$$N_{\text{max}} = 2f_0 T,$$

где  $T$  – половина длительности импульсного отклика – определяется количеством оставленных боковых лепестков  $n$  функции  $\text{sinc}(x)$ :

$$T = \frac{n + 1}{\Delta f}.$$



Общее количество штырей

$$N_{Ш2} = 2N_{max} + 1.$$

Аналитическое выражение для функции Хемминга (рис. 3)

$$F_{Xi} = k + (1 - k) \cos^m \left( \frac{\pi}{4f_0 T} i \right)$$

Параметры  $k$  и  $m$  в общем случае могут быть различными, однако чаще всего выбирают  $k = 0.08$  и  $m = 2$ .

Число пар штырей входного (неаподизированного) преобразователя

$$N_{П1} = 1,76 \frac{f_0}{\Delta f},$$

число штырей

$$N_{Ш1} = 2N_{П1}$$

Длина преобразователя

$$L_{П1} = 2aN_{Ш1}$$

Дополнительное подавление боковых лепестков АЧХ фильтра достигается при совпадении нулей основных лепестков АЧХ входного и выходного преобразователей. Для функции Хемминга, например, это происходит при соотношении чисел электродов

$$N_{Ш2} = N_{Ш1}/2.$$

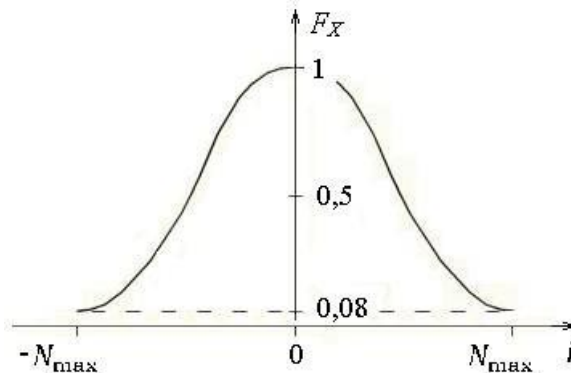


Рисунок 3 – Функция аподизации Хемминга при  $k = 0.08$  и  $m = 2$

Расстояние между входным и выходным ВШП  $L$  выбирают исходя из допустимого уровня прямой связи через паразитную емкость между входом и выходом, которая должна давать существенно меньший уровень сигнала на выходе, чем акустическая связь через ВШП при минимальных габаритах устройства. Для уменьшения дифракционных потерь входной и выходной ВШП следует располагать в ближней зоне друг относительно друга (см. с. 13).

Толщина электродов ( $h_M$ ) ВШП выбирается исходя из того, чтобы обеспечить низкий уровень отражений ПАВ от электродов, при приемлемом уровне сопротивления потерь электродов. При не очень большом числе электродов в ВШП и малом коэффициенте связи это обеспечивается толщиной  $h_M / \lambda_A \sim 0.01$ . Типичное значение толщины электродов составляет  $0.1 \div 0.3$  мкм.

## 4 ВХОДНАЯ И ВЫХОДНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ФИЛЬТРА

Для согласования фильтра на ПАВ с внешними электрическими цепями необходимо знать его проводимости на входе и выходе.

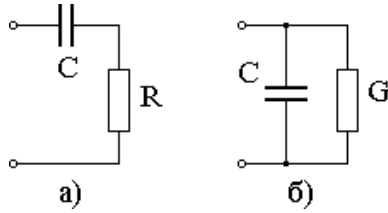


Рисунок 4 – Последовательная (а) и параллельная (б) эквивалентные схемы ВШП

Эквивалентная схема ВШП включает активную и реактивную составляющие входной проводимости (рис. 4, б), причем реактивная часть обусловлена реактивной составляющей проводимости излучения и статической емкостью преобразователя. На основе теории цепей возможен переход к последовательной эквивалентной схеме, приведенной на рис. 4, а.

Активную  $g(\omega)$  и реактивную  $b(\omega)$  составляющие проводимости неаподизированного ВШП на частоте  $\omega_0$  можно найти по формулам [5]:

$$g(\omega_0) = \frac{4}{\pi} k_m^2 N \omega_0 C_H,$$

$$b(\omega_0) = \omega_0 C_H,$$

где  $k_m^2$  – коэффициент электромеханической связи,  $N$  и  $C_H$  – количество штырей и статическая емкость неаподизированного ВШП.

$$C_H = W_0 N C_0,$$

где  $W_0$  – апертура,  $C_0$  – погонная емкость копланарных электродов ВШП (для ниобата лития  $C_0 = 0.27$  пФ/м, для кварца  $C_0 = 0.026$  пФ/м).

Погонная емкость двух копланарных электродов при  $a = b$  (пФ/м) [6]

$$C_0 \sim 0.021(1 + \varepsilon),$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала звукопровода.  
Для аподизированного ВШП

$$g(\omega_0) = \frac{2}{\pi} k_m^2 \omega_0 C_{A1},$$

$$C_{A1} = C_0 \left( \sum_{i=0}^n \sqrt{W_i} \right)^2,$$

$$C_{A2} = C_0 \sum_{i=0}^n W_i,$$

где  $W_i$  – перекрытие штырей.

Емкость интегрирующего (суммирующего) электрода ВШП (в пФ)

$$C_{\Sigma} = 0.09 \varepsilon \frac{dL_{ВП}}{H_D},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала подложки (для кварца  $\varepsilon = 11.7$ );  $d$  – ширина электрода ( $d = 1 \div 2$  мм), в см;  $L_{\text{вп}}$  – длина преобразователя, в см;  $H_D$  – толщина подложки, в см.

## 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗВУКОПРОВОДА

Толщина звукопровода  $H_D$  обычно выбирается не менее  $20 \lambda_A$ . Длина звукопровода  $L$  равна сумме длин входного  $L_{П1}$  и выходного  $L_{П2}$  преобразователей, расстояния между ними  $L_{12}$  и двух топологических допусков  $\Delta L$ :

$$L = L_{П1} + L_{12} + L_{П2} + 2\Delta L.$$

Минимальная величина  $L_{12}$  определяется уровнем не задержанного сигнала, величина которого в основном зависит от диэлектрической проницаемости материала звукопровода. Чтобы прямо прошедший сигнал был мал по сравнению с ПАВ сигналом, должно выполняться условие

$$L_{12} \geq 5H_D$$

Топологический допуск  $\Delta L$  зависит от технологии крепления звукопровода. Ширина звукопровода  $B$  выбирается из тех же соображений:

$$B = W_0 + 2d + 2\Delta d,$$

где  $W_0$  - апертура,  $d$  - ширина пассивной части и подводящих шин,  $\Delta d$  - технологический допуск (выбирается с учетом ограничений тонкопленочной технологии).

## 6 МАТЕРИАЛЫ ВШП И ПОГЛОТИТЕЛЕЙ

В качестве материала для решетки ВШП в большинстве устройств на ПАВ используют алюминий. Толщина пленки колеблется в пределах  $(0.08 \div 0.3)$  мкм, в зависимости от рабочей частоты устройства. Для увеличения адгезии алюминия используется подслой ванадия толщиной  $(5 \div 30)$  нм.

Для устранения отражений акустический поглотитель наносят на торцы звукопровода и на участки рабочей поверхности непосредственно за преобразователем. Толщина поглотителя обычно находится в пределах  $(0,1 \div 0,8)$  мм. В качестве акустических поглотителей можно применять материалы на основе эпоксидных смол, а также элементоорганических каучуков и их смесей. Наиболее технологичными из них и обладающими хорошими поглощающими свойствами являются кремнийорганические компаунды [7].

## 7 ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЭФФЕКТОВ

Основными причинами потерь, вносимых устройствами на ПАВ, являются: двунаправленность входного и выходного ВШП; рассогласование ВШП с внешними электрическими цепями; затухание сигнала в электродах преобразователя; затухание ПАВ в подложке; дифракционная расходимость акустического пучка.

Расчет топологии ВШП не учитывает так называемые эффекты второго порядка (дифракция, изменение скорости ПАВ под электродами ВШП, потери при регенерации ПАВ в электродах ВШП и др.). Эффекты второго порядка влияют на передаточные функции фильтров на ПАВ.

Емкостная связь между входным и выходным ВШП через звукопровод и крышку корпуса приводит к электромагнитной наводке. Для уменьшения этой наводки рекомендуется заземлять противоположные гребенки входного и выходного ВШП, а в промежутке между ВШП устанавливать заземленный металлический экран.

Более сильный паразитный сигнал возникает из-за отражения ПАВ от акустической неоднородности под ВШП, а также из-за регенерации ПАВ выходным преобразователем. Это так называемый трехкратно отраженный сигнал (ТОС). Для ослабления ТОС применяют ВШП с расщепленными электродами, электрическое рассогласование с нагрузкой, поворот фазового фронта ПАВ (например, с помощью металлической пленки треугольной формы), противофазное отражение ПАВ от составного приемного ВШП.

Различия в импедансах свободного и металлизированного участка звукопровода можно уменьшить с помощью дополнительного осаждения тонкого акустически согласующего материала сверху или снизу электродов.

Для подавления объемных акустических волн (ОАВ), отраженных от нерабочей поверхности звукопровода, применяют рифление нижней поверхности, клиновидное углубление и покрытие ее поглотителем. Снижение уровня сдвиговых объемных волн, распространяющихся почти параллельно поверхности, достигается: выбором среза кристалла с минимальной эффективностью возбуждения ОАВ; переизлучением ПАВ в соседний акустический канал с помощью многополоскового ответвителя; поворотом фронта ПАВ с помощью треугольной металлической пленки и соответствующим поворотом выходного ВШП; использованием двух параллельных акустических каналов.

Дифракционные эффекты в монокристаллах оценивают величиной и знаком параметра анизотропии  $\gamma$ . Идеальным считается материал со значением  $\gamma = 1$ , при котором расширение акустического пучка минимально или отсутствует (эффект автоколлимации). В

изотропной среде  $\gamma = 0$ ; в монокристаллах при  $\gamma > 0$  дифракционные потери больше, а при  $\gamma < 0$  меньше, чем в изотропной среде. В [3] приведены значения  $\gamma$  для некоторых материалов.

По мере удаления от излучателя изменяются также профили интенсивности акустических волн. По аналогии с классической оптикой можно ввести параметр Френеля

$$F = \frac{4S\lambda_A}{W_0^2},$$

где  $\lambda_A$  - длина волны;  $S$  – расстояние от преобразователя до точки наблюдения;  $W_0$  – апертура преобразователя.

Значение  $F < 1$  соответствует зоне Френеля (ближней зоне). В ближней зоне энергия акустического луча не выходит за пределы апертуры преобразователя. Значение  $F > 1$  соответствует зоне Фраунгофера (дальней зоне), в которой акустический луч разваливается.

Очевидно, что для уменьшения потерь ВШП следует располагать в ближней зоне друг относительно друга.

Для уменьшения дифракционных искажений материал и срез звукопровода выбирают с минимальной дифракцией. Компенсация дифракционных искажений может быть достигнута целенаправленной коррекцией АЧХ, рассчитанной без учета дифракции.

Наиболее сильно дифракция ухудшает характеристики аподизованных преобразователей. Существенное уменьшение дифракционных эффектов получается при использовании ВШП с масштабированием отдельных групп электродов, – в несколько раз увеличивают перекрытие электродов, соответствующих боковым лепесткам функции аподизации, но одновременно с помощью внешних делителей уменьшают амплитуду подаваемого на них напряжения сигнала. Это можно сделать, например, с помощью емкостного делителя. Уменьшить дифракционные искажения можно также путем внешнего взвешивания ВШП, слабо подверженного дифракции.

## 8 ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ

Электроакустическое согласование сводится к построению цепей, импеданс которых в сечении входа и выхода равен, соответственно, сопряженному выходному и входному импедансу фильтра на ПАВ.

Самый простой способ согласования – использование последовательной или параллельной катушки индуктивности  $L$ , предназначенной в основном для компенсации статической емкости  $C$  (рис. 5). Такой способ согласования применяется для фильтров с узкой полосой пропускания.

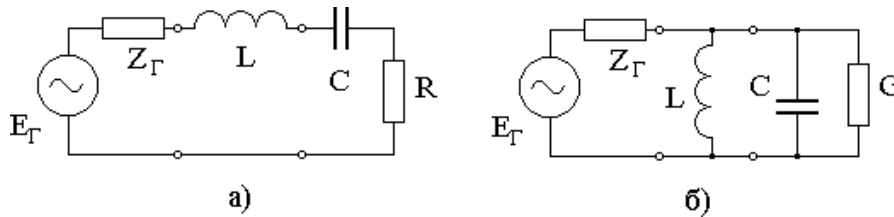


Рисунок 5 – Последовательная (а) и параллельная (б) схемы согласования узкополосного ВШП

Для фильтров с широкой полосой пропускания используются согласующие  $LC$ -цепочки (рис. 6), а также активные цепи, имитирующие индуктивность, или дифференциальные трансформаторы в виде интегральных функциональных узлов.

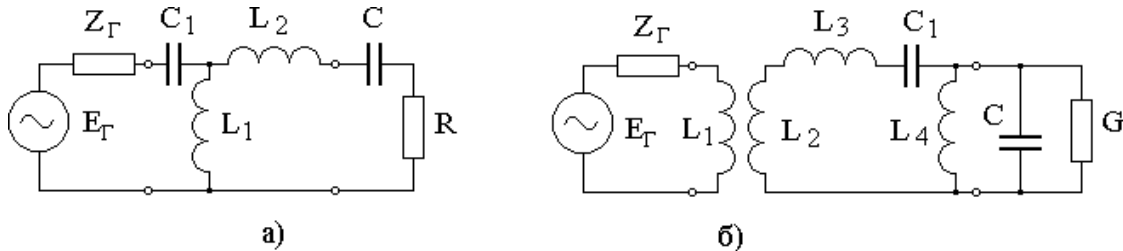


Рисунок 6 – Согласование ВШП со средней полосой пропускания Т-образным четырехполюсником (а) и Г-образным четырехполюсником с трансформатором (б)

Для фильтров с полосой  $\Delta f/f = (40 \div 50) \%$  целесообразно ограничиться только согласованием активных сопротивлений генератора и фильтра, т. к. в этом случае число элементов согласующей цепи возрастает до 5–10, что не способствует миниатюризации [8].

Резонансная частота образующегося при согласовании контура должна совпадать с  $f_0$ . На частоте  $f_0$  добротность электрического контура (электрическая добротность ВШП)

$$Q_{\text{Э}} = \frac{\pi}{k_m^2 N}$$

где  $N$  – число электродов преобразователя.

Акустическая добротность обратно пропорциональна относительной полосе пропускания ВШП:

$$Q_{\text{А}} = \frac{f_0}{\Delta f} \sim 2N,$$

где  $\Delta f = 1/T_0 \approx f_0/(2N)$ .

Оптимальное условие получения высокой эффективности преобразования в широкой



полосе частот (рис. 7)  $Q_A = Q_Э$ .

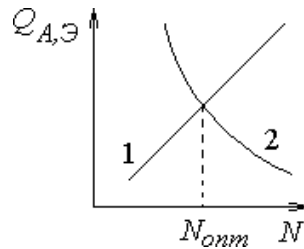


Рисунок 7 – Зависимость электрической (1) и акустической (2) добротности ВШП от числа электродов

Отвечающее этому равенству значение  $N$  называется оптимальным числом электродов для данного пьезоэлектрического материала:

$$N_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\pi}{k_m^2}}$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{N_{\text{опт}}} \sim k_m.$$

Отношение

$$p = \left(\frac{N_{\text{опт}}}{N}\right)^2$$

называется степенью рассогласования ВШП.

Когда ПАВ достигает приемного преобразователя, часть акустической энергии отражается от него, другая часть преобразуется в электрический сигнал и выделяется на нагрузке, а оставшаяся часть проходит в прежнем направлении и демпфируется поглотителем. Коэффициенты отражения  $B_{11}$ , прохождения  $B_{21}$  и поглощения  $B_{31}$  определяются выражениями:

$$B_{11} = -10 \log \frac{1}{(1+p)^2},$$

$$B_{21} = -10 \log \frac{p^2}{(1+p)^2},$$

$$B_{31} = -10 \log \frac{2p}{(1+p)^2},$$

На рис. 8 представлены зависимости коэффициентов  $B_{ij}$  от степени рассогласования. В согласованном режиме  $N = N_{\text{опт}}$ ,  $R_H/R_{\text{уэл}} = 1$ , т. е. в нагрузке выделяется 50 % энергии падающей волны ( $B_{31}=3\text{дБ}$ ), 25 % энергии отражается обратно ( $B_{11}=6\text{ дБ}$ ) и 25 % энергии ( $B_{21}=6\text{ дБ}$ ) проходит преобразователь.

В фильтрах чаще всего  $N > N_{\text{опт}}$ , при этом  $Q_A > Q_Э$ . Чтобы уравнивать полосы пропускания, можно уменьшить  $R_H$  и, следовательно, повысить добротность электрического контура.

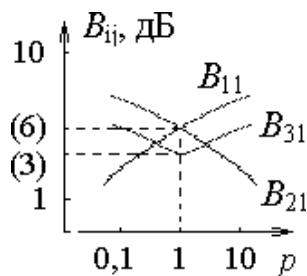


Рисунок 8 – Энергетические соотношения в ВШП

При известной степени рассогласования можно определить энергетические соотношения в устройстве на ПАВ и, в частности, величину вносимых преобразователями потерь  $B_2$

$$B_2 = 2 \left( B_{31} - 10 \log \frac{R_H - R_Э}{R_H} \right),$$

где  $R_Э = 2r/N$ ,  $r = \rho W/ah_Э$ ,  $a$  – ширина электрода,  $h_Э$  – толщина электрода,  $\rho$  – удельное сопротивление материала электродов.

## 9 ПОРЯДОК РАБОТЫ

- 1 Сформировать техническое задание. Исходные данные задаются преподавателем.
- 2 Выбрать материал звукопровода (см. разделы 1, 2), рассчитать топологию ВШП (разделы 3, 10), входную и выходную проводимости фильтра (раздел 4).
- 3 Оценить потери на рассогласование и вторичные эффекты (разделы 7, 8).
- 4 Определить размеры звукопровода (раздел 5). Выбрать корпус фильтра, материалы ВШП и поглотителей.
- 5 Описать технологический процесс изготовления фильтра.
- 6 Оформить пояснительную записку и графический материал, – сборочные чертежи кристалла и фильтра в целом.
- 7 Защитить проект.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев В.Ф. Устройства интегральной электроники: Акустоэлектроника. Основы теории, расчета и проектирования: учебное пособие. – СПб.: ГУАП, 2006. – 169 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.studmed.ru/dmitriev-vf-ustroystva-integralnoy-elektroniki-akustoelektronika-osnovy-teorii-rascheta-i-proektirovaniya\\_db105ef452f.html](https://www.studmed.ru/dmitriev-vf-ustroystva-integralnoy-elektroniki-akustoelektronika-osnovy-teorii-rascheta-i-proektirovaniya_db105ef452f.html), свободный (дата обращения: 19.01.2022).

1. Балышева О.Л. Материалы для акустоэлектронных устройств: учебное пособие. – СПб.: ГУАП, 2005. – 50 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.studmed.ru/balysheva-ol-materialy-dlya-akustoelektronnyh-ustroystv\\_0d14164ed01.html](https://www.studmed.ru/balysheva-ol-materialy-dlya-akustoelektronnyh-ustroystv_0d14164ed01.html), свободный (дата обращения: 19.01.2022).

2. Балышева О.Л. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования / О.Л. Балышева, В.И. Григорьевский, Ю.В. Гуляев, В.Ф. Дмитриев, Г.Д. Мансфельд. – М.: Радиотехника, 2012. – 576 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_1782364#1](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1782364#1), свободный (дата обращения 19.01.2022).

3. ГОСТ 28170-89. Изделия акустоэлектронные. Термины и определения. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/93/936.shtml>, свободный (дата обращения 19.01.2022).

5 Ильин Г.И. Проектирование радиоприемных устройств СВЧ. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию / Г.И. Ильин, Л.А. Трофимов, М.А. Царева. – Казань: КГТУ, 2010. – С. 41.