

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 проектированию 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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
2 ВЫБОР МАТЕРИАЛА ЗВУКОПРОВОДА.....	5
3 РАСЧЕТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.....	6
4 ВХОДНАЯ И ВЫХОДНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ФИЛЬТРА.....	9
5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗВУКОПРОВОДА.....	10
6 МАТЕРИАЛЫ ВШП И ПОГЛОТИТЕЛЕЙ.....	11
7 ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЭФФЕКТОВ.....	11
8 ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ.....	12
9 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	15
10 ПРИМЕР РАСЧЕТА ВШП.....	15
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	18

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 (Δf)** – разница между верхней $f_{\text{В}}$ и нижней $f_{\text{Н}}$ 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 ($f_{\text{В}}$) и нижней ($f_{\text{Н}}$) частот;

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

- **неравномерность АЧХ в полосе рабочих частот (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 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 ($K_{\text{П}}$)** – 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.

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).

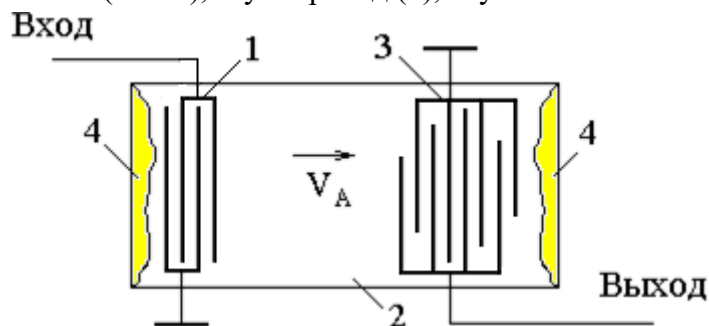


Рисунок 1 – Структура полосового фильтра на ПАВ

Процедура проектирования включает выбор материала звукопровода и расчет параметров ВШП.

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 (α_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

$$\frac{\Delta f}{f_0} \leq \sqrt{\frac{k_m^2}{\pi}} \quad (1)$$

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	$\alpha_f \cdot 10^6$, °C ⁻¹
Кварц (SiO_2)	3.15÷3.2	0.0012÷0.0024	9÷14.8
Ниобат лития ($LiNbO_3$)	3.48÷4.0	0.0052÷0.0554	14.4÷15.9
Германат висмута ($Bi_{12}GeO_{20}$)	1.62÷1.7	0.007÷0.0164	100
Танталат лития ($LiTaO_3$)	3.22÷3.31	0.0069÷0.0093	16.1÷22
Силикат висмута (Bi_2SiO_5)	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 (λ_A):

$$h = \lambda_A = \frac{V_A}{f_0}. \quad (2)$$

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

$$a = b = \lambda_A/4. \quad (3)$$

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 $K(\omega)$ и импульсную $G(t)$ характеристики ВШП:

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} G(t) e^{i\omega t} dt, \quad (4)$$

$$G(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\omega) e^{-i\omega t} d\omega. \quad (5)$$

Максимальное перекрытие W_0 – *апертура ВШП* – выбирается из условия согласования

с источником сигнала:

$$W_0 = (10 \div 200) \lambda_A. \quad (6)$$

В простейшем эквидистантном ($h = const$) и неаподизированном ($W_i = W_0$) преобразователе парциальные волны складываются в фазе с одинаковой амплитудой. АЧХ такого ВШП, согласно (4), соответствует огибающей спектра радиоимпульса со средней частотой f_0 (рис. 2) и имеет вид функции

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

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.

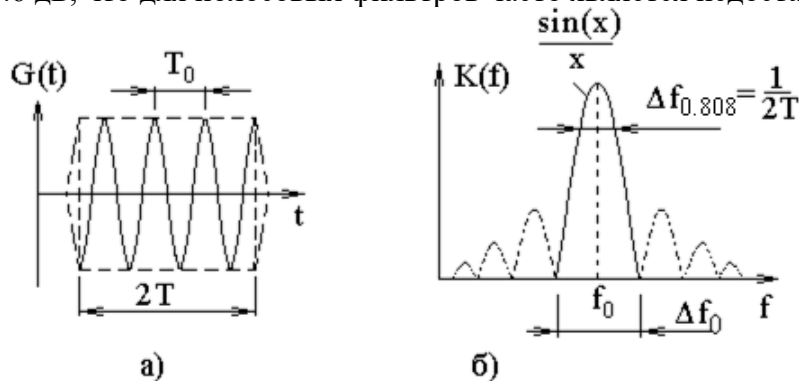


Рисунок 2 – Импульсный отклик (а) и АЧХ (б) ВШП с эквидистантными электродами одинаковой длины ($W_i = W_0 = const$)

Идеальный полосовой фильтр должен иметь прямоугольную АЧХ ($K_{\Pi} = 1$). Импульсная характеристика такого фильтра, согласно (5), 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).

Значения $K_{\Pi} < 1,1$ 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 (рис. 3). Перекрытие i -го со следующим за ним электродом в обе стороны от центра ВШП

$$W_i = \left| \frac{\sin \frac{\pi \Delta f_i}{2 f_0}}{\frac{\pi \Delta f_i}{2 f_0}} \cdot F_{Ai} \right| \cdot W_0 \quad \text{при } 0 < |i| \leq N_{\max}, \quad (7, a)$$

Длину электродов в зависимости от номера i можно рассчитать по формуле

$$l_i = (-1)^i [W_i + (W_0 - |l_{i-1}|)], \text{ при } 0 < |i| \leq N_{\max}. \quad (7, б)$$

Знак l_i определяет принадлежность электрода к верхней или нижней гребенке преобразователя. Максимальное количество штырей справа и слева от центра ВПП

$$N_{\max} = 2f_0 T, \quad (8)$$

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

$$T = \frac{n+1}{\Delta f}. \quad (9)$$

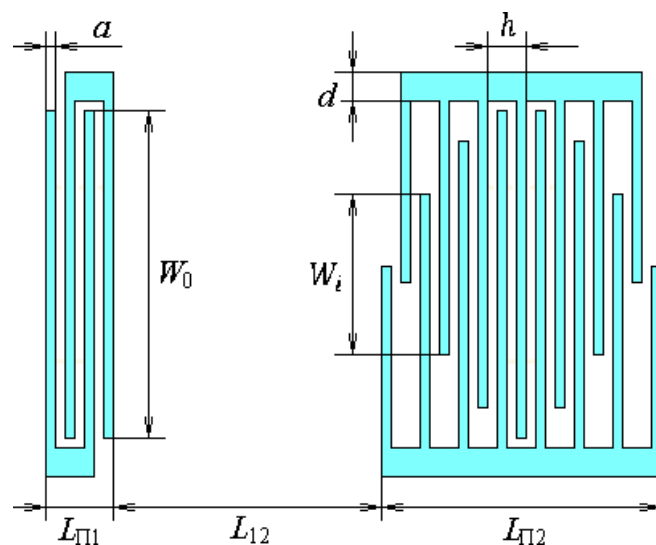


Рисунок 3 – К расчету топологии ВПП

Общее количество штырей

$$N_{Ш2} = 2N_{\max} + 1. \quad (10)$$

Длина преобразователя

$$L_{П} = N \frac{V_A}{2f_0}. \quad (11)$$

Аналитическое выражение для функции Хемминга (рис. 4)

$$F_{Xi} = k + (1 - k) \cdot \cos^m \left(\frac{\pi}{4f_0 T} \cdot i \right) \quad (11)$$

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

$$N_{П1} = 1.76 \frac{f}{\Delta f}, \quad (12)$$

число штырей

$$N_{Ш1} = 2 \cdot N_{П1}. \quad (13)$$

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

$$N_{\text{Ш2}} = N_{\text{Ш1}}/2. \quad (14)$$

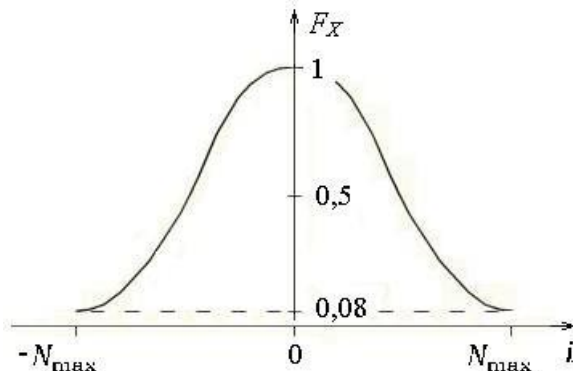


Рисунок 4 – Функция аподизации Хемминга при $k = 0.08$ и $m = 2$

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

$$N_{\text{Ш2}} = N_{\text{Ш1}}/2. \quad (14)$$

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

Эквивалентная схема ВШП включает активную $\text{Re}\{Y_{\text{вх}}\} = G_A(\omega)$ и реактивную $\text{Im}\{Y_{\text{вх}}\} = B_A(\omega) + \omega C_{\text{ВШП}}$ составляющие входной проводимости (рис. 5, б), причем реактивная часть обусловлена реактивной составляющей проводимости излучения $B_A(\omega)$ и статической емкостью преобразователя $C_{\text{ВШП}}$:

$$Y_{\text{вх}}(\omega) = G_A(\omega) + jB_A(\omega) + j\omega C_{\text{ВШП}}.$$

На основе теории цепей возможен переход к последовательной эквивалентной схеме, приведенной на рис. 5, а.

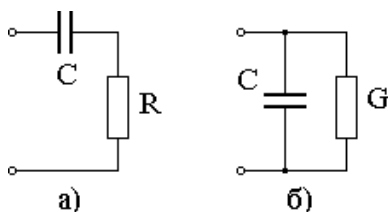


Рисунок 5 – Последовательная (а) и параллельная (б) эквивалентные схемы ВШП

Для согласования фильтра на ПАВ с внешними электрическими цепями необходимо знать его проводимости $Y(j\omega)$ на входе и выходе.

Активную $g(\omega)$ и реактивную $b(\omega)$ составляющие проводимости неаподизированного ВШП на частоте $\omega_0 = 2\pi f_0$ можно найти по формулам [5]:

$$g(\omega_0) = \frac{4}{\pi} \cdot k_m^2 N \omega_0 C_H, \quad (16, a)$$

$$b(\omega_0) = \omega_0 C_H, \quad (16, б)$$

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

$$C_H = W_0 N C_0, \quad (17)$$

где W_0 – апертюра ,

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 $a = b$ (Ф/м) [6]

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

где ε – диэлектрическая проницаемость материала звукопровода.

Для аподизированного ВШП

$$g(\omega_0) = \frac{2}{\pi} \cdot k_m^2 \omega_0 C_{A1}, \quad (18, a)$$

$$b(\omega_0) = \omega_0 C_{A2}, \quad (18, б)$$

$$C_{A1} = C_0 \left(\sum_{i=0}^N \sqrt{W_i} \right)^2, \quad (19, a)$$

$$C_{A2} = C_0 \sum_{i=0}^N W_i, \quad (19, б)$$

где W_i – перекрытие штырей.

Емкость интегрирующего (суммирующего) электрода ВШП (в пФ)

$$C_\Sigma = 0.09 \cdot \varepsilon \cdot \frac{d \cdot L_{ВП}}{H_D}, \quad (20)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала подложки (для кварца $\varepsilon = 11.7$);

d – ширина электрода ($d = 1 \div 2$ мм), в см;

$L_{ВП}$ – длина преобразователя, в см;

H_D – толщина подложки, в см.

5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗВУКОПРОВОДА

Толщина звукопровода D обычно выбирается не менее 20 μ .

Длина звукопровода L равна сумме длин входного $L_{П1}$ и выходного $L_{П2}$ преобразователей, расстояния между ними L_{12} и двух топологических допусков ΔL :

$$L = L_{\Pi 1} + L_{12} + L_{\Pi 2} + 2\Delta L. \quad (22)$$

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

$$L_{12} \geq 5D. \quad (23)$$

Топологический допуск ΔL зависит от технологии крепления звукопровода. Ширина звукопровода B выбирается из тех же соображений:

$$B = W_0 + 2d + 2\Delta d, \quad (24)$$

где W_0 – апертура,

d – ширина пассивной части и подводящих шин,

Δd – 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 подслоя 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 γ . 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 γ для некоторых материалов. По мере удаления от излучателя изменяются также профили интенсивности акустических волн. По аналогии с классической оптикой можно ввести параметр Френеля

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

где λ – 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. 6). Такой способ согласования применяется для фильтров с узкой

полосой пропускания.

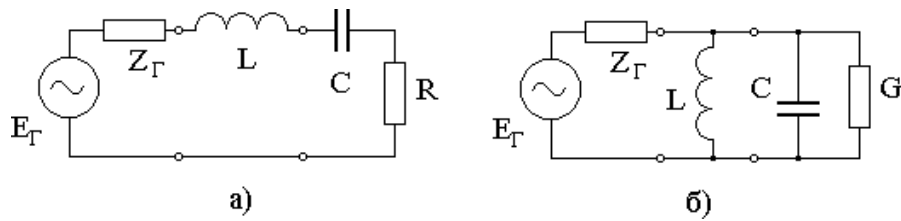
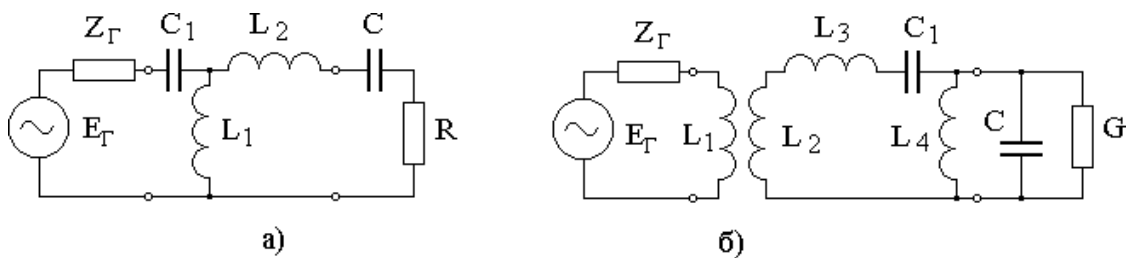


Рисунок 6 – Последовательная (а) и параллельная (б) схемы согласования узкополосного ВШП

Для фильтров с широкой полосой пропускания используются согласующие LC-цепочки (рис. 7), а также активные цепи, имитирующие индуктивность, или дифференциальные трансформаторы в виде интегральных функциональных узлов.



T-образным четырехполюсником (а) и Г-образным четырехполюсником с трансформатором (б)

Рисунок 7 – Согласование ВШП со средней полосой пропускания

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)

$$Q_{\text{Э}} = \frac{\pi}{k_m^2 N'} \quad (25)$$

где N – число электродов преобразователя.

Акустическая добротность обратно пропорциональна относительной полосе пропускания ВШП:

$$Q_A = \frac{f_0}{\Delta f} \sim 2N, \quad (26)$$

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

Оптимальное условие получения высокой эффективности преобразования в широкой полосе частот (рис. 8)

$$Q_A = Q_{\text{Э}}. \quad (27)$$

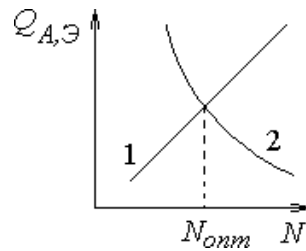


Рисунок 8 – Зависимость электрической (1) и акустической (2) добротности ВШП от числа электродов

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

$$N_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\pi}{k_m^2}} \quad (28)$$

$$\left. \frac{\Delta f}{f_0} \right|_{\text{опт}} = \frac{1}{N_{\text{опт}}} \sim k_m \quad (29)$$

Отношение

$$p = \left(\frac{N_{\text{опт}}}{N} \right)^2 = \frac{R_{\text{н.г}}}{R(\omega)} \quad (30)$$

где $R_{\text{н.г}}$ – сопротивление нагрузки (или генератора), 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:

$$B_{11} = -10 \lg \frac{1}{(1+p)^2}, \quad B_{21} = -10 \lg \frac{p^2}{(1+p)^2}, \quad B_{31} = -10 \lg \frac{2p}{(1+p)^2}. \quad (31)$$

На рис. 9 представлены зависимости коэффициентов B_{ij} от степени рассогласования. В согласованном режиме $N = N_{\text{опт}}$, $R_{\text{н}}/R_{\text{изл}} = 1$, т. е. в нагрузке выделяется 50 % энергии падающей волны ($B_{31} = 3$ дБ), 25 % энергии отражается обратно ($B_{11} = 6$ дБ) и 25 % энергии ($B_{21} = 6$ дБ) проходит преобразователь.

В фильтрах чаще всего $N > N_{\text{опт}}$, при этом $Q_A > Q_{\Omega}$. Чтобы урвать полосы пропускания, можно уменьшить $R_{\text{н}}$ и, следовательно, повысить добротность электрического контура.

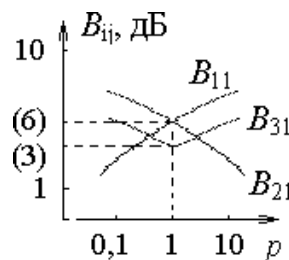


Рисунок 9 – Энергетические соотношения в ВШП

Выражения (31) позволяют при известной степени рассогласования определить энергетические соотношения в устройстве на ПАВ и, в частности, величину вносимых

преобразователями потерь B_2 :

$$B_2 = 2 \left(B_{31} - 10 \lg \frac{R_H - R_3}{R_H} \right), \quad (32)$$

где $R_3 = 2r/N$, $r = \rho W/ah_3$,

a – ширина электрода,

h_3 – толщина электрода,

ρ – удельное сопротивление материала электродов.

9 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

До КТ 1:

1. Сформировать техническое задание на курсовой проект. 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).

До КТ 2:

3. Оценить потери на рассогласование и вторичные эффекты (разделы 7,8).

4. Определить размеры звукопровода (раздел 5). Выбрать корпус фильтра, материалы ВШП и поглотителей. Описать технологический процесс изготовления фильтра (см. например, [7]).

До конца семестра:

5. Оформить пояснительную записку и графический материал, – сборочные чертежи кристалла и фильтра в целом.

6. Защитить проект.

10 ПРИМЕР РАСЧЕТА ВШП

Исходные данные:

– средняя частота полосы пропускания $f_0 = 100$ МГц;

– полоса пропускания на уровне -3 дБ $\Delta f = 20$ МГц;

– гарантированное относительное затухание = 30 дБ.

Материал звукопровода – ниобат лития $LiNbO_3$. Скорость ПАВ на свободной поверхности $V_A = 4$ км/с, коэффициент электромеханической связи $k_m^2 = 0.05$, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 11.7$ [5].

Топология широкополосного ВШП

Число пар штырей:

$$N_{П1} = 1.76 \frac{f}{\Delta f} = 1.76 \frac{100 \text{ МГц}}{20 \text{ МГц}} = 8.8.$$

Берем $N_{П1} = 9$, число штырей:

$$N_{Ш1} = 2 \cdot N_{П1} = 2 \cdot 9 = 18.$$

Длина ПАВ:

$$\lambda_A = \frac{V_A}{f_0} = \frac{4 \text{ км/с}}{100 \text{ МГц}} = 40 \text{ мкм.}$$

Расстояние между штырями:

$$d = \frac{\lambda_A}{2} = 20 \text{ мкм.}$$

Ширина штырей a и промежутки между ними b :

$$a = b = \frac{\lambda_A}{4} = 10 \text{ мкм.}$$

Апертура:

$$W_0 = 100 \cdot \lambda_A = 4 \text{ мм.}$$

Топология аподизованного ВШП

Оставляем один лепесток импульсной характеристики фильтра.

Длительность половины импульсного отклика:

$$T = \frac{n+1}{\Delta f} = \frac{1+1}{20 \text{ МГц}} = 0.1 \text{ мкс.}$$

Максимальное количество штырей справа и слева от центра ВШП:

$$N_{max} = 2f_0 T = 2 \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} = 20.$$

Общее количество штырей:

$$N_{Ш2} = 2N_{max} + 1 = 2 \cdot 20 + 1 = 41.$$

Перекрытие i -го со следующим за ним электродом в обе стороны от центра ВШП:

$$W_i = \left| \frac{\sin \frac{\pi \Delta f}{2f_0} i}{\frac{\pi \Delta f}{2f_0} i} \cdot F_{Ai} \right| \cdot W_0, \text{ при } 0 < |i| \leq N_{max}$$

Функциональная длина электродов в зависимости от номера i :

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

При аподизации ВШП функцией Хемминга:

$$F_{Ai} = F_{Xi} = 0.08 + 0.02 \cdot \cos^2 \left(\frac{\pi}{4f_0 T} \cdot i \right)$$

Таблица 2 – Результаты расчета длины и перекрытия электродов

i	$\left \frac{\sin(\dots \cdot i)}{(\dots \cdot i)} \right $	F_{xi}	$W_i, \text{ мм}$	$l_i, \text{ мм}$
± 0	1	1	4	4
± 1	0.95	0.99	3.76	-3.76
± 2	0.92	0.96	3.53	3.77
± 3	0.85	0.945	3.21	-3.44
± 4	0.76	0.9	3.0	3.56
± 5	0.63	0.86	2.16	-2.6
± 6	0.5	0.8	1.6	3
± 7	0.36	0.73	1.05	-2.05
± 8	0.33	0.66	0.87	2
± 9	0.1	0.6	0.24	-2.24
± 10	0	0.54	0	1.76
± 11	0.05	0.46	0.1	-2.34
± 12	0.15	0.38	0.22	1.88
± 13	0.2	0.31	0.25	-2.37
± 14	0.216	0.26	0.22	1.85
± 15	0.21	0.2	0.17	-2.32
± 16	0.19	0.17	0.13	1.81
± 17	0.15	0.13	0.08	-2.27
± 18	0.1	0.1	0.04	1.77
± 19	0.05	0.085	0.02	-2.25
± 20	0	0.08	0	1.75

Результаты расчета приведены в табл. 2 и на рис. 10. Знак l_i электродов нижней гребенки – плюс, верхней гребенки – минус.

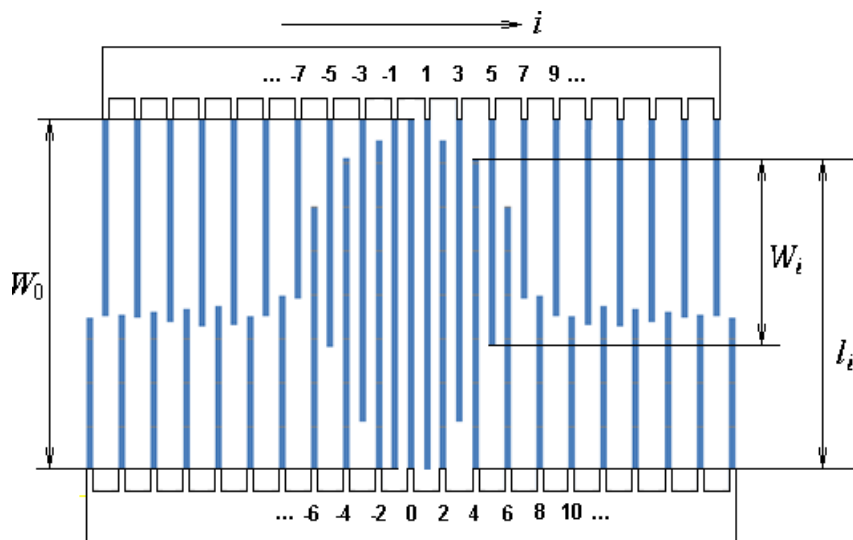


Рисунок 10 – К расчету перекрытия и длины электродов аподизированного ВШП

Входная проводимость

Статическая емкость неаподизированного ВШП:

$$C_H = W_0 N C_0 = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 0.27 = 0.02 \text{ пФ.}$$

Реактивная проводимость:

$$b(\omega_0) = \omega_0 C_H = 2\pi \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot 0.02 \cdot 10^{-12} = 1.2 \cdot 10^{-3}.$$

Активная проводимость:

$$g(\omega_0) = \frac{4}{\pi} \cdot k_m^2 N \omega_0 C_H = \frac{4}{\pi} \cdot 0.05 \cdot 18 \cdot 1.2 \cdot 10^{-3} = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

Емкость суммирующего электрода:

$$C_\Sigma = 0.09 \cdot \varepsilon \cdot \frac{d \cdot L}{H_\Pi} = 0.09 \cdot 11.7 \cdot \frac{0.2 \cdot 0.036}{0.05} = 0.15 \text{ пФ.}$$

Полная емкость входного преобразователя:

$$C_1 = C_H + C_\Sigma = 0.17 \text{ пФ.}$$

Выходная проводимость

Для аподизированных ВШП Активная проводимость:

$$g(\omega_0) = \frac{2}{\pi} \cdot k_m^2 \omega_0 C_{A1} = \frac{2}{\pi} \cdot 0.05 \cdot 10^8 \cdot 0.28 \cdot 10^{-12} = 1.9 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

Реактивная проводимость:

$$b(\omega_0) = \omega_0 C_{A2} = 10^8 \cdot 0.14 \cdot 10^{-12} = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

Емкость суммирующего электрода:

$$C_\Sigma = 0.09 \cdot \varepsilon \cdot \frac{d \cdot L}{H_\Pi} = 0.09 \cdot 11.7 \cdot \frac{0.2 \cdot 0.08}{0.05} = 0.34 \text{ пФ.}$$

Полная емкость выходного преобразователя:

$$\begin{aligned} C_{A1} &= C_0 \left(\sum_{i=0}^N \sqrt{W_i} \right)^2 \approx 0.27 \cdot 49.3 \cdot 10^{-2} \cdot 2 = 0.28 \text{ пФ;} \\ C_{A2} &= C_0 \sum_{i=0}^N W_i = 0.27 \cdot 24.65 \cdot 10^{-2} \cdot 2 = 0.14 \text{ пФ.} \\ C_2 &= C_{A2} + C_\Sigma = 0.14 + 0.34 = 0.48 \text{ пФ.} \end{aligned}$$

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ 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: <http://window.edu.ru/resource/026/45026/files/dmitriev2.pdf>, свободный (дата обращения:

19.01.2016).

2. Балышева О.Л. Материалы для акустоэлектронных устройств: учебное пособие. СПб.: ГУАП, 2005. – 50 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/861/44861/files/Balysheva1.pdf>, свободный (дата обращения: 19.01.2016).

3. 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, свободный (дата обращения 19.01.2016).

4. ГОСТ 28170-89. Изделия акустоэлектронные. Термины и определения. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/93/936.shtml>, свободный (дата обращения 19.01.2016).

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. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://reku.kai.ru/files/2011/04/РПрУ-Часть-2.pdf>, свободный (дата обращения: 19.01.2016).

6. Иоссель Ю.Я. Расчет электрической емкости / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.

7. Чернышова Т.И. Проектирование фильтров на поверхностно- акустических волнах: учебно-методическое пособие / Т.И. Чернышова, Н.Г. Чернышов. – Тамбов: ТГТУ, 2008. – 48 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2008/chernyshova-a.pdf>, свободный (дата обращения: 19.01.2016).

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