

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

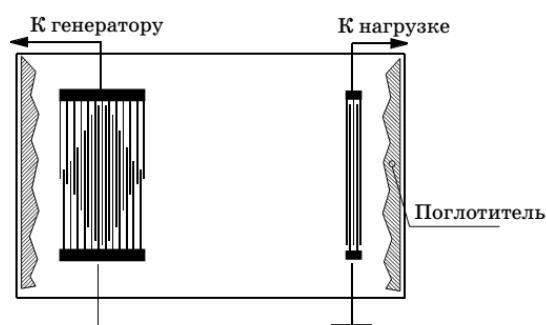
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники

РАСЧЕТ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению курсовых работ
по дисциплине «Функциональная электроника»
для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
(профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»)
очной формы обучения



Воронеж 2020

УДК 621.385.6(07)
ББК 22.32я7

Составитель: канд. техн. наук Т. В. Свистова

Расчет акустоэлектронных устройств: методические указания к выполнению курсовых работ по дисциплине «Функциональная электроника» для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Т. В. Свистова. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2020. – 22 с.

Методические указания содержат рекомендации к выполнению, содержанию, защите курсовой работы и методику расчета и конструирования акустоэлектронных устройств. Предназначены для студентов бакалавриата четвертого курса.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле Му_курсовая работа_ФЭ_Свистова.pdf.

Ил. 5. Табл. 4. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.385.6(07)
ББК 22.32я7

Рецензент – Е. Ю. Плотникова, канд. техн. наук, доц.
кафедры полупроводниковой электроники
и наноэлектроники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Студенты направления подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» очной формы обучения согласно рабочей программе дисциплины «Функциональная электроника» выполняют курсовую работу.

Курсовая работа по дисциплине «Функциональная электроника» предусматривает разработку конкретного акустоэлектронного устройства (АЭУ), поэтому в задачу курсовой работы входит разработка топологии устройства, выбор его законченной конструкции и расчет основных параметров.

При выполнении курсовой работы студент должен:

- научиться самостоятельно работать с технической и научной литературой;
- проработать вопросы теории и конструирования устройств функциональной электроники;
- обоснованно подходить к выбору технических решений при расчете устройств;
- критически оценивать результаты, полученные при расчете топологии устройства, его параметров и характеристик;
- уметь четко и грамотно излагать свои мысли и наглядно представлять результаты расчетов.

1. ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа содержит следующие разделы:

1. Задание.
2. Введение.
3. Теоретическая часть.
3. Расчетно-конструкторская часть.
4. Заключение.

Каждый студент получает индивидуальное задание. В задании приводится наименование темы и исходные данные для расчета топологии, структуры и параметров акустоэлектронного устройства.

Во введении указываются цели и задачи, решаемые при расчете акустоэлектронного устройства, подчеркивается актуальность темы работы.

В разделе работы «Теоретическая часть» рассматриваются теоретические основы работы конкретного АЭУ, а именно, назначение, область применения, принцип действия, устройство, материалы, используемые в производстве АЭУ, его основные параметры и характеристики.

В разделе работы «Расчетно-конструкторская часть» рассматриваются следующие вопросы:

- а) выбор исходного материала и типа структуры АЭУ;
- б) расчет топологии АЭУ;

- в) расчет параметров и характеристик АЭУ;
- г) приводится описание конструкции синтезируемого АЭУ.

При выполнении расчетно-конструкторской части работы следует пользоваться методами расчетов, приведенных в рекомендуемых методических пособиях или литературе (учебниках). Все формулы, по которым проводятся расчеты тех или иных величин, должны проверяться на размерность. Все формулы, кроме тех случаев, о которых сделаны соответствующие оговорки, должны выражаться в единицах системы СИ (в метрах, килограммах, секундах, вольтах, амперах, омах, сименсах, кулонах, фарадах, генри и т.п.). Вычисления достаточно выполнять с 2 - 3 значащими цифрами в результате.

Пояснительная записка должна быть оформлена в соответствии с методическими указаниями «Правила оформления выпускной квалификационной работы» и не должна содержать грамматических и синтаксических ошибок. На титульном листе указывается название дисциплины, тема курсовой работы, фамилия и инициалы студента, номер зачетки, специальность и факультет, а также вариант выполняемого задания.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ И ЗАЩИТЫ

Задание на курсовую работу выдается руководителем работы. Самостоятельная работа студентов систематически контролируется и направляется руководителем работы. Руководитель курсовой работы устанавливает общее направление и содержание работы, консультирует студентов по всем вопросам работы, рекомендует литературу, оказывает помощь студенту при выполнении им различных разделов работы.

Полностью законченная работа сдается на проверку не позднее, чем за три рабочих дня до назначенного срока защиты. После устранения отмеченных ошибок студент допускается к защите. Дата защиты устанавливается руководителем работы. На защите могут присутствовать все желающие.

Защита курсовой работы включает доклад студента (5 - 6 минут) и ответы на вопросы. Вопросы могут задаваться как преподавателем, так и студентами, присутствующими на защите. В докладе требуется четко сформулировать задание на курсовую работу, пояснить порядок ее выполнения, изложить полученные результаты, отметить конструктивные решения и подвести итог своей работы. Задаваемые вопросы должны соответствовать теме работы и относиться к методам расчета проектируемого АЭУ, особенностям его конструкции, а также могут быть заданы вопросы по теоретическому курсу, связанному с содержанием работы.

Курсовую работу оценивается по четырех балльной системе (отл., хор., удовл., неудовл.). При оценке курсовой работы учитывается обоснованность принятых технических решений, объем использования современной вычислительной техники, оформление работы, качество расчетно-конструкторских работ, техническая эрудиция, логичность и грамотность изложения материала по-

яснительной записки, а также содержание доклада и ответы на вопросы, умение правильно излагать свои мысли, владеть научно-технической терминологией.

3. КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ УСТРОЙСТВА НА ПОВЕРХНОСТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

На сегодняшний день акустоэлектроника является одним из активно развивающихся направлений функциональной электроники. Среди акустоэлектронных устройств широкое распространение получили устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Такие преимущества, как высокая надежность, малые масса и размеры, отсутствие энергопотребления, возможность выполнения различных операций обработки сигналов, реализация заданных технических характеристик, с высокой точностью обеспечивают широкое применение этих устройств в современных средствах связи.

Носителем информации в устройствах на ПАВ являются волны, у которых энергия упругих колебаний сосредоточена в тонком приповерхностном слое твердого тела. В качестве среды распространения используются пьезоэлектрические монокристаллы. Для преобразования электрических сигналов в акустические и обратно, а также для отражения и изменения траектории распространения акустических волн используются металлические структуры, нанесенные на поверхность пьезоэлектрической подложки. Возбуждение и прием акустических волн осуществляется с помощью входного и выходного преобразователей ПАВ, число электродов которых может быть различным (от единиц до нескольких тысяч).

Практическое использование ПАВ началось в середине 60-х годов в фильтрах для аналоговой обработки сигналов, когда были предложены и реализованы устройства для их возбуждения – встречно-штыревые преобразователи (ВШП).

Позднее устройства на ПАВ нашли применение в качестве фильтров промежуточной частоты телевизионных приемников. Затем, в радарных системах нашли применение дисперсионные линии задержки в качестве устройств для формирования и сжатия линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов. Благодаря небольшим габаритам и весу при высокой надежности область использования устройств на ПАВ стала быстро расширяться.

Помимо поверхностных волн, имеющих вертикальную поляризацию вектора механического смещения (рэлеевских), широкое распространение получили также устройства на ПАВ, использующие ПАВ с горизонтальной поляризацией вектора механического смещения (STW), а также «вытекающие», приповерхностные и объемные акустические волны.

В настоящее время существует большое количество акустоэлектронных устройств различного типа. Среди них можно выделить элементарные, на основе которых строятся более сложные устройства.

К элементарным АЭУ относятся:

- бездисперсионные линии задержки (с линейной зависимостью фазы задержанного сигнала от частоты);
- дисперсионные линии задержки (с квадратичной зависимостью фазы задержанного сигнала от частоты);
- многоотводные линии задержки с кодированием по фазе задержанных сигналов;
- резонаторы на основе различного типа поверхностных и объемных волн;
- фильтры различного типа, в том числе трансверсальные, а также на основе резонаторов, использующих различные типы поверхностных и объемных волн.

Элементарные АЭУ широко используются в различных компонентах радиотехнических систем. Среди таких компонентов можно выделить следующие:

- датчики различных физических величин (давления, крутящего момента и т.д.);
- гребенчатые фильтры или банки фильтров – устройства частотного разделения каналов, имеющие, как правило, один вход и от двух до 40 выходов;
- устройства формирования и сжатия сигналов с различными типами частотной модуляции (используются в радиолокационных станциях (РЛС), в том числе бортовых РЛС самолетов, корабельных РЛС, наземных РЛС дальнего обнаружения, в головных частях систем самонаведения высокоточного оружия);
- устройства формирования и сжатия фазокодированных (ФКМ) сигналов (используются в РЛС со сжатием импульса и широкополосных системах связи; наиболее популярным кодом является код Баркера – двухфазный код, дающий относительный уровень боковых лепестков для идеальных сигналов, равный $20 \lg N$, где N – число элементарных символов в кодовой последовательности, не превышающее 13);
- входные фильтры радиоприемных устройств, фильтры тракта промежуточной частоты (ПЧ) радиоприемных и радиопередающих устройств (например, мобильной связи);
- анализаторы спектра радиосигналов (радиоразведка);
- корреляторы, в том числе корреляторы с памятью (используются, например, в крылатых ракетах);
- генераторы высокостабильных сигналов на основе резонаторов на поверхностных и объемных акустических волнах;
- устройства калибровки по дальности и контроля энергопотенциала РЛС;
- дуплексоры, сумматоры, разветвители, фазовращатели, аттенюаторы.

Простейшее устройство на ПАВ включает входной (возбуждающий) и выходной (приемный) встречно-штыревые преобразователи (ВШП), расположенные на поверхности пьезоэлектрического кристалла (рис. 1). На рисунке приняты следующие обозначения: 1 – возбуждающий ПАВ-преобразователь; 2

– приемный преобразователь; 3 – звукопровод; 4 – электроды ВШП; L_C – согласующая индуктивность; R_G, R_H – сопротивления генератора и нагрузки, соответственно.

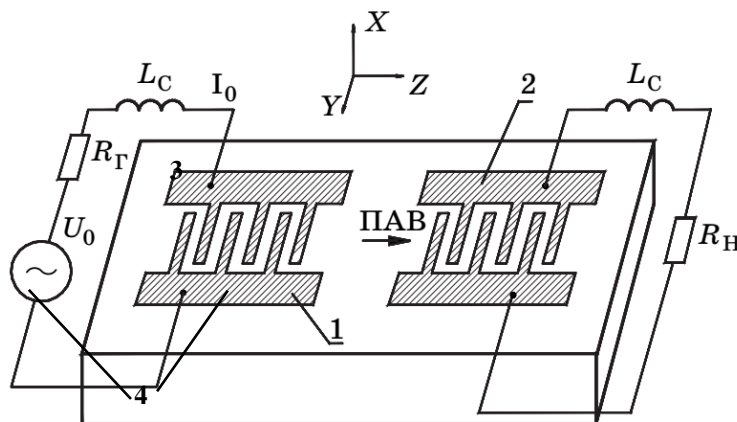


Рис. 1. Конструкция устройства на ПАВ, с подключенным генератором синусоидального сигнала амплитудой U_0

Эквивалентная схема ВШП включает активную $R_A\{Y_{Bx}\} = G_A(f)$ и реактивную $I_m\{Y_{Bx}\} \approx \omega C_{BШП}$ составляющие входной проводимости (рис. 2):

$$Y_{Bx}(\omega) \approx G_A(\omega) + j\omega C_{BШП}. \quad (1)$$

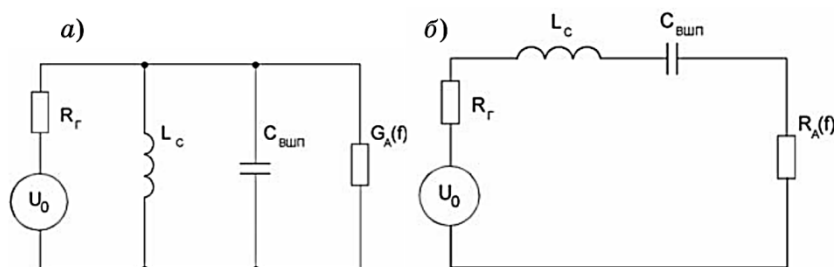


Рис. 2. Эквивалентные схемы ВШП: а – параллельная, б – последовательная

Возможно представление эквивалентной схемы ВШП как в виде параллельного соединения проводимости ВШП и источника сигнала (рис. 2, а), так и в виде последовательного соединения активного сопротивления ВШП и источника сигнала (рис. 2, б). Следует отметить, что оба представления эквивалентны.

Обычная **линия задержки** (ЛЗ) на ПАВ (рис. 3) состоит из входного и выходного встречно-штыревых преобразователей, нанесенных на поверхность пьезоэлектрической среды (звукопровода), в которой могут распространяться поверхностные акустические волны с небольшим затуханием. Линии задержки на ПАВ, как правило, имеют однородные преобразователи.

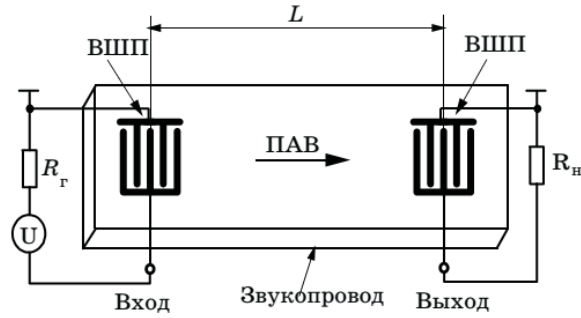


Рис. 3. Линия задержки на ПАВ и способ ее включения во внешнюю цепь (ВШП показаны условно.

R_n, R_r – сопротивления нагрузки и генератора)

Под однородным преобразователем понимается ВШП, у которого период и перекрытие соседних электродов неизменны. В этом случае входная проводимость преобразователя может быть определена по соотношению

$$G_A(\omega) \approx \frac{4}{\pi} \kappa_{эм}^2 \omega C_{ВШП} N_2 |J(\omega)|^2, \quad (2)$$

где N_2 – число пар электродов; $C_{ВШП}$ – емкость преобразователя, равная

$$C_{ВШП} = 0,5W_0 C_2 N, \quad (3)$$

где W_0 – апертура электродов; C_2 – емкость пары электродов на единицу их длины (смотри табл. 1); N – общее число электродов. Фурье-компонента распределения поверхностного тока на электродах преобразователя

$$J(\omega) = \sin(x) / x, \quad (4)$$

где $x = \frac{N_2 \pi (\omega - \omega_0)}{\omega_0}$, ω_0 – центральная частота.

Квадрат коэффициента электромеханической связи $\kappa_{эм}^2$ – важная характеристика материала. Его значения приведены в табл. 1. Этот параметр материала определяет максимальную величину входной проводимости преобразователя при выбранной его апертуре.

Таблица 1

Параметры основных пьезоэлектрических материалов

Материал	Срез	Скорость ПАВ, м/с	$N_{2,opt}$	$\kappa_{эм}^2$	W_{opt} / λ_0	C_2 , пФ/м
Ниобат лития	YZ	3488	4	0,048	108	464
Кварц	ST	3158	23	0,0014	46	50

Примечание. W_{opt} соответствует выполнению условия (16) при числе пар электродов в ВШП, равном $N_{2,\text{opt}}$

В настоящее время разработано и используется в радиоэлектронной аппаратуре большое количество фильтров различных типов на ПАВ. Условно все многообразие фильтров на ПАВ можно разделить на трансверсальные и резонансные. Резонансные фильтры на ПАВ, в свою очередь, можно разделить на фильтры со слабой акустической связью и импедансные фильтры.

Отличительной особенностью трансверсальных фильтров на ПАВ является то, что их АЧХ определяется видом аподизации электродов ВШП. В фильтрах трансверсального типа обычно один из преобразователей однородный, а второй неоднородный (рис. 4). Под неоднородным преобразователем будем понимать ВШП, у которого период и перекрытие соседних электродов (апертура) W_K могут меняться. В этом случае выражение для входной проводимости ВШП имеет вид

$$G_A(\omega) \approx \frac{4}{\pi} \kappa_{\text{эм}}^2 \omega C_{\text{ВШП}} N_2 \left| \sum_{K=1}^N \frac{W_K}{W_0} J_K(\omega) \right|^2, \quad (5)$$

Емкость преобразователя в этом случае

$$C_{\text{ВШП}} = 0,5 C_2 \sum_{K=1}^N W_K. \quad (6)$$

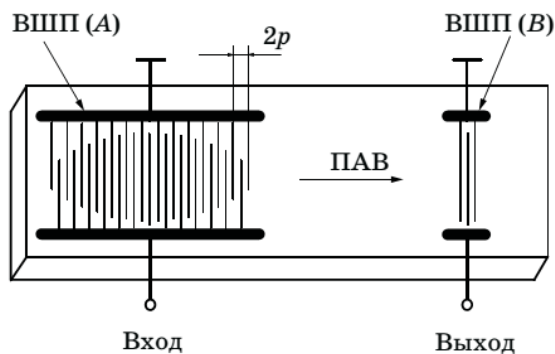


Рис. 4. Конструкция трансверсального фильтра, электроды одного из ВШП которого аподизованы

Частотные свойства преобразователя определяет фурье-компонента распределения поверхностного тока в электродах преобразователя. Распределение поверхностного тока на электродах $J(z)$ является сложной функцией, зависящей как от геометрии самих электродов и их взаимного расположения, так и от параметров акустической волны, распространяющейся под электродами.

Для практических расчетов в большинстве случаев вполне приемлемо использовать модель однородного распределения поверхностного тока. В этом случае (4) имеет вид

$$J_K(\kappa) = \frac{I_K}{I_0} \exp(j\kappa z_K) \sin c \left[\frac{\kappa(b_K - a_K)}{2} \right], \quad (7)$$

где I_K – ток в k -м электроде (знак I_K с учетом направления, например, плюс для электродов, подключенных к верхней шине и минус – к нижней шине), z_K – координата центра k -го электрода, $k = \omega/V_{\text{ПАВ}}$.

Зная входную проводимость преобразователя, можно рассчитать потери на преобразование встречно-штыревым преобразователем:

$$A_{\text{вхн}}(\omega) = 10 \log_{10} \left[\frac{2Y_G G_A(\omega)}{[G_A(\omega) + Y_G]^2 + [\omega C_{\text{ВШП}} - 1/(\omega L_C)]^2} \right], \text{Дб} \quad (8)$$

где Y_G – проводимость генератора (или нагрузки для приемного преобразователя).

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $A(\omega)$ устройства на ПАВ типа трансверсального фильтра или линии задержки определяется потерями на преобразование на входном – $A_{\text{ВШП-1}}(\omega)$ и выходном – $A_{\text{ВШП-2}}(\omega)$ преобразователях и потерями при распространении ПАВ между преобразователями и может быть рассчитана по соотношению

$$A(\omega) = A_{\text{ВШП-1}}(\omega) + A_{\text{ВШП-2}}(\omega) + T(\omega), \text{Дб}, \quad (9)$$

где $T(\omega) = 10 \log_{10} \{ \exp[-\alpha(\omega)l] \}$ – потери на распространение ПАВ между преобразователями; $\alpha(\omega)$ – постоянная затухания ПАВ на частоте ω , l – расстояние между преобразователями.

Потери при распространении ПАВ в кристалле в основном обусловлены тепловыми колебаниями кристаллической решетки. Например, для ниобата лития YZ-среза экспериментально измеренная их частотная зависимость хорошо аппроксимируется функцией

$$T(\omega) \approx \left\{ 0,19(\omega/\omega_1) + 0,88(\omega/\omega_1)^{1,9} \right\} \frac{l}{V_{\text{ПАВ}}} 10^6, \text{Дб} \quad (10)$$

а для кварца ST, X-среза аналогичная зависимость имеет вид

$$T(\omega) \approx \left\{ 0,47(\omega/\omega_1) + 2,62(\omega/\omega_1)^2 \right\} \frac{l}{V_{\text{ПАВ}}} 10^6, \text{Дб} \quad (11)$$

где ω_1 – частота, равная 1 ГГц (10^9 Гц).

Потери $T(\omega)$ существенны для устройств на ПАВ типа линии задержки, а в фильтрах на ПАВ ими, как правило, можно пренебречь.

Процедура синтеза устройства на ПАВ, не имеющего многополосковых ответвителей и отражательных структур, включает выбор материала звукопровода и расчет (выбор) основных параметров преобразователей.

Исходными данными являются: центральная частота f_0 , полоса рабочих частот Δf , время задержки сигнала t_3 (для линии задержки), уровень внеполосного подавления (для фильтра), материал звукопровода.

Расчет преобразователей включает: расчет периода следования электродов и их ширины; расчет числа электродов в ВШП; расчет апертуры преобразователя; выбор функции аподизации (для фильтра); расчет расстояния между входным и выходным ВШП; расчет согласующих элементов; выбор толщины электродов ВШП; расчет потерь.

3.1. Синтез ЛЗ на ПАВ. Расчет топологии

Исходные данные:

- центральная частота f_0 ;
- полоса рабочих частот Δf ;
- время задержки сигнала t_3 ;
- материал звукопровода;
- возбуждающий (ВШП-1) и приемный (ВШП-2) преобразователи эквивалентны, эквидистантны и неаподизированы.

Определить:

- период следования электродов, мкм;
- ширину одного электрода, мкм;
- апертуру электродов ВШП, мм;
- число электродов в одном ВШП;
- расстояния между входным и выходным ВШП, мм;
- согласующие элементы $C_{\text{ВШП}}$ и L_C
- потери в линии задержки на частотах, дБ: $f_0, f_0 - \Delta f/2, f_0 + \Delta f/2$;
- толщину электрода;
- габаритные размеры устройства;
- толщину звукопровода.

Производится синтез линии задержки:

а) расчет топологии преобразователей.

Если преобразователь ВШП-1 и ВШП-2 эквидистантные неаподизованные (рис. 3), то расчет топологии ведется по ниже приведенным формулам.

Определение периода следования электродов и их ширины. Полупериод следования электродов p выбирается равным половине длины ПАВ:

$$p = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{V_{\text{ПАВ}}}{2f_0}, \quad (12)$$

а ширина электрода – четверти длины волны

$$d = \frac{\lambda}{4}. \quad (13)$$

Определение числа электродов в ВШП. Приближенно число электродов ВШП можно оценить по соотношению

$$N \approx \frac{2f_0}{\Delta f}, \quad (14)$$

где Δf – заданная полоса частот устройства по уровню – 3 дБ. Поскольку реальная полоса частот устройства зависит от используемой в ВШП функции аподизации и условий согласования на входе и выходе преобразователя, вычисленное по (14) значение N необходимо уточнить методом подбора с использованием соотношений (2) – (6).

Оптимальное число электродов в ВШП. (Используется в некоторых специальных случаях при проектировании устройств на ПАВ.) При оптимальном числе электродов $N_{\text{ВШП}}$ акустическая добротность преобразователя совпадает с его электрической добротностью. Равенство акустической и электрической добротности соответствует ситуации, когда преобразователь имеет высокую эффективность в максимальной полосе частот. Оптимальное число пар электродов в ВШП зависит от выбранного материала и равно

$$N_{2,opt} = \sqrt{\pi/4k_m^2}. \quad (15)$$

Выбор апертуры преобразователя W_0 проводится из условия согласования ВШП с нагрузкой. Активная часть входной проводимости ВШП на центральной частоте должна быть равна активной части проводимости источника сигнала (генератора или нагрузки), обычно составляющей $R_\Gamma = R_H = 50$ Ом. При этом предполагается, что реактивная составляющая входной проводимости будет скомпенсирована элементами согласования, например, индуктивностью.

При выборе апертуры ВШП следует исходить из условия:

$$Y_\Gamma = \frac{1}{R_\Gamma} = \frac{4}{\pi} \kappa_{ЭМ}^2 \omega W_0 C_2 N_2^2. \quad (16)$$

Выбирая апертуру преобразователя, необходимо учитывать возможные дифракционные потери, связанные с расходимостью акустического луча. Поэтому апертура электродов ВШП не должна быть меньше значения, определяемого границей зоны Френеля:

$$\overline{W} \geq \sqrt{\lambda l} |1 + \gamma|, \quad (17)$$

где γ – параметр анизотропии; l – длина пути распространения ПАВ.

Например, для ниобата лития YZ-среза $\gamma = -1,083$, для кварца ST-среза $\gamma = +0,378$.

В случае нарушения условия (17) при расчете ПАВ-устройства необходимо учитывать дифракционную расходимость акустического луча, что является очень непростой задачей, решение которой не гарантирует получение качественных характеристик устройства.

Расчет или выбор расстояния между входным и выходным ВШП. В случае линии задержки расстояние между ВШП определяется необходимым временем задержки t_3 :

$$l = t_3 V_{\text{ПАВ}}. \quad (18)$$

Расчет согласующих элементов обычно проводится из условия компенсации статической емкости входного и выходного преобразователей (см. эквивалентную схему рис. 1):

$$\frac{1}{[\omega L_C]} = \omega C_{\text{ВШП}}, \quad (19)$$

где L_C – согласующая индуктивность, схема включения L_C показана на рис. 1.

В тех случаях, когда активная составляющая входной проводимости существенно отличается от проводимости генератора, и необходимо обеспечить низкий уровень отражений от электрической нагрузки, используют трансформаторы импеданса.

Толщина электродов (h_M) ВШП в устройствах типа линии задержки 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

$$h_M/\lambda \sim 0,01. \quad (20)$$

Типичное значение толщины электродов составляет $0,1 \dots 0,3$ мкм.

Помимо отражений, связанных с механической нагрузкой электрода на поверхность звукопровода, имеют место отражения, связанные с электрической нагрузкой поверхности. Структура поля, а главное – скорость акустической волны зависят от электрических граничных условий на поверхности. Эти отражения пропорциональны разности скоростей на свободной и металлизированной поверхности при $h_M \rightarrow 0$ или коэффициенту электромеханической связи $\kappa_{ЭМ}^2 \approx \frac{2\Delta V}{V}$. В тех случаях, когда выбором толщины электродов проблему отражений решить не удастся, используются расщепленные электроды, отражения от которых взаимно компенсируют друг друга. Параметры основных пьезоэлектрических материалов приведены в табл. 1;

б) определение габаритных размеров линии задержки.

Определяем длину звукопровода L_d

$$L_d = L_{\text{вх}} + L_{\text{вых}} + L_1 + 2L_2, \quad (21)$$

где $L_{\text{вх}}$ – длина входного преобразователя; $L_{\text{вых}}$ – длина выходного преобразователя; $L_1 = l$ – расстояние между преобразователями; $L_2 = 5 \dots 10$ мм – расстояние между крайним электродом преобразователя и торцевой гранью звукопровода.

Если преобразователь эквидистантный, то

$$L_{\text{вх}} = L_{\text{вых}} = L_{\text{экв}} = p \cdot (2N - 1) + d. \quad (22)$$

Ширина звукопровода фильтра

$$L_{\text{ш}} = W + 2(L_3 + L_4), \quad (23)$$

где $L_3 = 5 \dots 10$ мм – расстояние между общей шиной решетки преобразователя и продольной гранью звукопровода; $L_4 = 2d$ – ширина общей шины решетки преобразователя.

Толщина звукопровода выбирается для уменьшения влияния объемных волн

$$d_3 = 20\lambda; \quad (24)$$

в) приводится описание конструкции линии задержки.

Методические рекомендации для расчета линии задержки на ПАВ.

Расчет ЛЗ на ПАВ рекомендуется проводить в следующей последовательности.

1. Определяем полупериода следования электродов (12) и их ширину (13).
2. Определяем число электродов в ВШП (14).
3. Находим апертуру (степень перекрытия) электродов (17).
4. Определяем расстояние между входным и выходным ВШП (18).
5. Рассчитываем согласующие элементы $C_{\text{ВШП}}$ и L_C (3), (19), (16).
6. Определяем потери в линии задержки (10) или (11) в зависимости от материала звукопровода.
7. Определяем толщину электрода (20).
8. Определяем габаритные размеры устройства (21), (22), (23).
9. Определяем толщину звукопровода (24).
10. Описываем конструкцию линии задержки. Например, линия задержки содержит один входной преобразователь и один выходной. Входной преобразователь – эквидистантный неаподизованный, число пар штырей – N . Выходной преобразователь – эквидистантный неаподизованный с числом пар штырей – N .
Материалом для звукопровода ЛЗ на ПАВ является ниобат лития с ориентацией ZY или кварц ST.

Класс обработки звукопровода – $\nabla 13$ или $\nabla 14$. Размеры подложки $L_d \times L_{ш} \times d_3$ мм.

Материалом изготовления штырей преобразователей является алюминий А99 ГОСТ11069–64, по соображениям наименьшей стоимости. Для улучшения адгезии используется подслоя ванадия. Для защиты от воздействия окружающей среды элементы конструкции ВШП покрываются защитным материалом – фоторезист негативный ФН-11 ТУ6-14-631–71. В качестве материала для поглощителей используется эпоксидная смола ЭД-5 ГОСТ10587–75.

ЛЗ изготавливают по методу прямой контактной фотолитографии.

Для герметизации ЛЗ используется металлостеклянный прямоугольный корпус из ковара, со штырьковыми выводами типа 1210 (157.29-1), соответствующий по типоразмеру ГОСТ17467–79.

3.2. Синтез фильтра на ПАВ. Расчет топологии

Исходные данные:

- центральная частота f_0 ;
- относительная полоса пропускания $\Delta f / f_0$;
- число лепестков импульсного отклика m ;
- функция аподизации $\omega(n)$.
- материал звукопровода и его класс обработки.
- структурная схема фильтра – тип конструкции входного и выходного преобразователей - возбуждающий (ВШП-1) эквидистантный и неаподизированный, приемный (ВШП-2) неэквидистантный и аподизированный.

Определить:

- количество пар электродов в ВШП-1;
- расстояние между соседними электродами ВШП-1;
- толщину электрода ВШП-1;
- апертуру (степень перекрытия) электродов ВШП-1;
- количество пар электродов в ВШП-2;
- расстояние между соседними электродами ВШП-2;
- толщину электрода ВШП-2 (27);
- координаты краев электродов ВШП - 2 по оси Y ;
- габаритные размеры устройства;
- толщину звукопровода.

Описать конструкцию фильтра.

Производится синтез фильтра:

а) расчет топологии преобразователей.

Если преобразователь ВШП-1 эквидистантный неаподизированный (рис. 5), то расчет топологии ведется по ниже приведенным формулам.

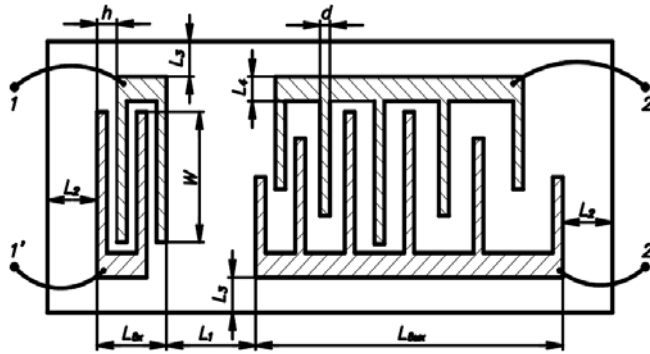


Рис. 5. Схема проектируемого фильтра на ПАВ

Определяем количество пар N электродов

$$N = \frac{f_0}{\Delta f'} \quad (25)$$

f_0 – центральная частота, а $\Delta f = f_v - f_n$, где f_v – верхняя граничная частота и f_n – нижняя граничная частота. Следует пояснить, что значения f_v и f_n вытекают из соотношения $\Delta f / f_0$.

Определяем расстояние h между соседними электродами

$$h = \frac{\lambda}{2}, \quad (26)$$

где $\lambda = v_{\text{пав}} / f_0$ – длина волны.

Рассчитываем ширину электродов по формуле

$$d = \frac{\lambda}{4}. \quad (27)$$

Находим апертуру (степень перекрытия) электродов

$$W_0 = (10 \dots 200)\lambda. \quad (28)$$

Если ВШП - 2 неэквидистантный аподизованный (рис. 5), то для расчета топологии справедливы следующие формулы.

Определяем количество пар N электродов

$$N = (m + 1) \frac{f_0}{\Delta f'}, \quad (29)$$

где m – число лепестков импульсного отклика.

Определяем расстояние h между соседними электродами по формуле

$$h(n) = v \frac{f_g t_3}{2\Delta f} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4n\Delta f}{f_g^2 t_3}} \right), \quad (30)$$

где $t_3 = L_1/v_{\text{пав}}$ – время задержки, где $L_1 = 8 \dots 10$ мм – расстояние между преобразователями, $n = 1, 2, \dots, N$ – количество пар электродов.

Рассчитываем толщину электродов по формуле (27)

Находим координаты краев электродов ВШП - 2 по оси Y

$$Y(n) = \frac{W_0}{2} [1 - (-1)^n \Phi(n)], \quad (31)$$

где W_0 – апертура входного преобразователя, $n = -N \dots +N$, а $\Phi(n)$ имеет вид

$$\Phi(n) = \frac{\sin\left(\frac{\pi n}{N+1}\right)}{\frac{\pi n}{N+1}} \omega(n), \quad (32)$$

где $\omega(n)$ – передаточная функция (функция аподизации).

При $n = 0$ длина электрода равна $(10 \dots 200) \cdot \lambda$. Конец этого электрода будет являться началом системы координат $Y(n)$;

б) определение габаритных размеров проектируемого фильтра.

Определяем длину звукопровода L_d

$$L_d = L_{\text{вх}} + L_{\text{вых}} + L_1 + 2L_2, \quad (33)$$

где $L_{\text{вх}}$ – длина входного преобразователя; $L_{\text{вых}}$ – длина выходного преобразователя; $L_1 = 8 \dots 10$ мм – расстояние между преобразователями; $L_2 = 5 \dots 10$ мм – расстояние между крайним электродом преобразователя и торцевой гранью звукопровода.

Если преобразователь эквидистантный, то

$$L_{\text{ЭКВ}} = h \cdot (2N - 1) + d. \quad (34)$$

Если преобразователь неэквидистантный, то

$$L_{\text{неЭКВ}} = \sum_{n=1}^N (2h_n) + d. \quad (35)$$

Ширина звукопровода фильтра

$$L_{\text{ш}} = W_{\text{вх}} + 2(L_3 + L_4), \quad (36)$$

где $L_3 = 5 \dots 10$ мм – расстояние между общей шиной решетки преобразователя и продольной гранью звукопровода; $L_4 = 2d$ – ширина общей шины решетки преобразователя.

Толщина звукопровода выбирается для уменьшения влияния объемных волн

$$d_3 = 20\lambda; \quad (37)$$

в) приводится описание конструкции проектируемого фильтра.

Методические рекомендации для расчета фильтра на ПАВ. Расчет фильтра на ПАВ рекомендуется проводить в следующей последовательности.

1. Определяем количество пар электродов в ВШП-1 (25).
2. Определяем расстояние между соседними электродами ВШП-1 (26).
3. Определяем толщину электрода ВШП-1 (27).
4. Находим апертуру (степень перекрытия) электродов ВШП-1 (28).
5. Определяем количество пар электродов в ВШП-2 (29).
6. Определяем расстояние между соседними электродами ВШП-2 (30).

Полученные значения записываем в табл. 2.

7. Определяем толщину электрода ВШП-2 (27).

8. Находим координаты краев электродов ВШП - 2 по оси Y (31), (32).

Полученные значения записываем в табл. 3.

Таблица 2

Расстояние между соседними электродами ВШП-2

n	1	2	3	4	5	6	...	...	N
h , мкм									

Таблица 3

Координаты краев электродов ВШП - 2 по оси Y

n	$-N$	...	...	-5	-4	-3	-2	-1	0
$Y(n)$									
n	0	1	2	3	4	5	...	...	N
$Y(n)$									

9. Определяем габаритные размеры устройства (33) - (36).

10. Определяем толщину звукопровода (37).

11. Описываем конструкцию фильтра. Например, фильтр содержит один входной преобразователь и один выходной. Входной преобразователь – эквидистантный неаподизованный широкополосный, число пар штырей – N . Выходной преобразователь – неэквидистантный аподизованный с числом пар штырей – N .

Материалом для звукопровода проектируемого фильтра на ПАВ является ниобат лития с ориентацией ZY или кварц ST .

Класс обработки звукопровода – $\nabla 13$ или $\nabla 14$. Размеры подложки $L_d \times L_{ш} \times d_3$ мм.

Материалом изготовления штырей преобразователей является алюминий А99 ГОСТ11069–64, по соображениям наименьшей стоимости. Для улучшения адгезии используется подслой ванадия. Для защиты от воздействия окружающей среды элементы конструкции ВШП покрываются защитным материалом – фоторезист негативный ФН-11 ТУ6-14-631–71. В качестве материала для поглотителей используется эпоксидная смола ЭД-5 ГОСТ 10587–75.

Проектируемый фильтр изготавливают по методу прямой контактной фотолитографии.

Для герметизации фильтра используется металлостеклянный прямоугольный корпус из ковара, со штырьковыми выводами типа 1210 (157.29-1), соответствующий по типоразмеру ГОСТ 17467–79.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Виды функций аподизации, употребляемые в фильтрах
на ПАВ

№ п/п	Функция аподизации
1	$1 + 2F_1 \cos\left(\frac{n\pi}{N+1}\right), F_1 = 0,4$
2	$\left(\frac{\sin x}{x}\right)^r, x = \left(\frac{n\pi}{N+1}\right), r = 1$
3	$\left(\frac{\sin x}{x}\right)^r, x = \left(\frac{n\pi}{N+1}\right), r = 2$
4	$\left(\frac{\sin x}{x}\right)^r, x = \left(\frac{n\pi}{N+1}\right), r = 3$
5	$\left[\cos\left(\frac{n\pi}{2(N+1)}\right)\right]^r, r = 1$
6	$\left[\cos\left(\frac{n\pi}{2(N+1)}\right)\right]^r, r = 2$
7	$\left[\cos\left(\frac{n\pi}{2(N+1)}\right)\right]^r, r = 3$
8	$0,5 \left[1 + \cos\left(\frac{n\pi}{N+1}\right)\right]^r, r = 1$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балышева, О.Л. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования [Текст] / О.Л. Балышева, В.И. Григорьевский, Ю.В. Гуляев, В. Ф. Дмитриев, Г.Д. Мансфельд. – М.: Радиотехника, 2012. – 576 с.

2. Бугаев, А.С. Устройства на поверхностных акустических волнах: учеб. пособие [Текст] / А.С. Бугаев, В.Ф. Дмитриев, С.В. Кулаков. – Спб.: ГУАП, 2009. – 188 с.

3. Войцеховский, А.В. Функциональная акустоэлектроника: учеб. пособие [Текст] / А.В. Войцеховский, А.А. Скрыльников. - Томск: Томский государственный университет, 2013. - 362 с.

4. Рычина, Т.А. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы [Текст] / Т.А. Рычина, А.В. Зеленский. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.

5. Фильтры на поверхностных акустических волнах (расчет, технология и применение) [Текст] / Пер. с англ.; под ред. Г. Мэттьюза. – М.: Радио и связь, 1981. – 472 с.

6. Чернышова, Т.И. Проектирование фильтров на поверхностно-акустических волнах: учеб.-метод. пособие [Текст] / Т.И. Чернышова, Н.Г. Чернышов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 48 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	3
2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ И ЗАЩИТЫ.....	4
3. КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ УСТРОЙСТВА НА ПОВЕРХНОСТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ	5
3.1. Синтез ЛЗ на ПАВ. Расчет топологии.....	11
3.2. Синтез фильтра на ПАВ. Расчет топологии.....	15
ПРИЛОЖЕНИЕ. Виды функций аподизации, употребляемые в фильтрах на ПАВ	20
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	21

РАСЧЕТ АКУСТОЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению курсовых работ
по дисциплине «Функциональная электроника»
для студентов направления
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
(профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»)
очной формы обучения

Составитель:
Свистова Тамара Витальевна

Редактор Е. А. Кусаинова

Подписано в печать 10.06.2020
Объем данных 1,16 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14