

## **ЭФФЕКТЫ «ВТОРОГО ПОРЯДКА» В УСТРОЙСТВАХ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ**

*К. т. н. Карпев Д. В., Киселев С. В., к. ф.-м. н. Кондратьев С. Н.,  
к. т. н. Орлов В. С.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В основе расчета и конструирования устройств обработки радиосигналов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) лежит представление об однозначной связи геометрии структуры устройства с его электрическими характеристиками. Эффективным источником возбуждения ПАВ является заряд, распределенный на поверхности звукопровода. В широко используемой для расчета устройств на ПАВ модели б-источников [1] полагается, что каждый электрод или пара электродов встречно-штыревого преобразователя (ВШП) являются независимыми источниками ПАВ, а каждый источник соответствует отсчету (выборке) импульсной характеристики. Такое приближение соответствует модели «первого порядка». Оно позволяет рассматривать ВШП как трансверсальный фильтр и использовать для синтеза устройств на ПАВ разработанные ранее в теории цифровых фильтров и антенных решеток [2] методы «оконных функций», частотной выборки и оптимизационный. На практике параметры устройств на ПАВ не совпадают с расчетными вследствие проявления эффектов «второго порядка». Под этими эффектами обычно понимают все механизмы и явления, из-за которых происходят отклонения характеристик устройства на ПАВ от описываемых моделью «первого порядка» соотношений. Без детального учета или компенсации этих эффектов невозможно проектирование любых высококачественных устройств на ПАВ: фильтров, резонаторов, линий задержки, фурье-процессоров, корреляторов и т. д.

Эффекты второго порядка, влияющие на характеристики фильтров, можно разделить на шесть основных групп [1]:

1. Эффекты, обусловленные электростатическими явлениями: неоднородностью распределения электрического заряда по ширине и апертуре электродов преобразователя; зависимостью распределения этого заряда от топологии электродов и от их взаимного расположения в преобразователе.

2. Эффекты, определенные взаимодействием ПАВ с электродной структурой и внешней электрической цепью. К ним относятся: двунаправленность излучения ПАВ, неоднородность фазовых фронтов излучаемых ПАВ, регенерация, масс-электрические отражения от краев электродов, омические потери в электродах, неоднородность распределения вдоль преобразователя питающего электроды напряжения из-за омических потерь в контактных шинах. Кроме того, к этой группе можно отнести сигналы много-кратного, в основном тройного прохождения, обусловленные отражениями ПАВ от многоэлектродной структуры ВШП и несогласованной нагрузки, а также искажения амплитудно- и фазо-частотных характеристик (АЧХ) и ФЧХ, вызванные влиянием согласующих цепей.

3. Эффекты, зависящие от распространения ПАВ: дифракция, дисперсия, потери на аподизацию; потери на распространение, связанные с рассеянием на дефектах кристалла, примесях, раковинах и царапинах на поверхности, а также с излучением энергии в среду, прымывающую к поверхности звукопровода.

4. Эффекты, обусловленные влиянием паразитных сигналов: электромагнитной и электростатической наводкой; генерацией и приемом паразитных объемных акустических волн; генерацией гармоник ПАВ, возникающих из-за нелинейности свойств материала звукопровода; паразитными акустическими и тепловыми шумами материалов звукопровода и электродов преобразователя; отражениями поверхностных и акустических волн от краев конструктивных элементов фильтра: звукопровода, многополосковых ответвителей, экранов, контактных шин, фазовращателей, акустических поглотителей и т. д.

5. Искажения, связанные с технологическими погрешностями при изготовлении фильтров: ошибки ориентации звукопроводов относительно кристаллографических осей; погрешности угловой ориентации, взаимного расположения звукопровода и преобразователей; отклонения размеров, включая толщину и положения электродов ВШП; обрывы и закоротки электродов; разброс электрофизических характеристик материалов звукопровода и преобразователей.

6. Эффекты, обусловленные чувствительностью характеристик материалов звукопровода и преобразователей к влиянию внешних дестабилизирующих факторов: температуры, давления, влаги, радиации и т. д.

Некоторые из перечисленных эффектов второго порядка принципиально присущи устройствам на ПАВ и не могут быть полностью устранены. К таким относятся, например, электростатические эффекты; регенерация ПАВ в преобразователе; дифракция акустических волн; омические потери и т. д. Влияние их может быть учтено расчетным путем или скомпенсировано изменением геометрии электродной структуры преобразо-

вателя и подбором соответствующего материала пьезоэлектрической подложки. Другие явления, такие как отражения от краев подложки, электромагнитная и электростатическая наводки, могут быть устранены различными методами. В некоторых случаях при разработке устройств на ПАВ следует принимать компромиссное решение. Так, увеличение апертуры электродного преобразователя уменьшает влияние дифракционных искажений, но увеличивает омические потери в электродах преобразователя. В свою очередь, уменьшает омические потери за счет увеличения толщины металла нене целесообразно из-за больших масс-электрических переотражений.

В зависимости от заданных требований в конструкции устройства и материала подложки могут преобладать те или иные вторичные эффекты. Поэтому при разработке устройств на ПАВ можно ограничиться лишь учетом нескольких эффектов или использовать конструктивные методы, приводящие к их уменьшению или компенсации. Кроме того, целесообразно учитывать экономические факторы. Так, влияние разброса технологических параметров может быть уменьшено разбраковкой готовых изделий, но это значительно повышает их стоимость.

### ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Одна из основных трудностей, возникающих при конструировании устройства на ПАВ, состоит в том, что даже в электростатическом приближении  $\delta$ -источники нельзя считать независимыми, так как величина заряда любого отдельного электрода зависит от расположения и полярности окружающих его электродов. Для точного решения задачи о распределении зарядов в ВШП необходимо рассматривать всю совокупность электродов и решать довольно сложную граничную задачу для гармонических функций, что значительно усложняет расчет.

При конструировании широкополосных фильтров, а также в случае работы ВШП на гармониках, необходимо учитывать реальное распределение заряда на электродах преобразователя, отличающееся от приближенной аппроксимации  $\delta$ -функциями. Нормированная плотность заряда на электроде, находящемся в бесконечной периодической решетке с противоположной полярностью соседних штырей, описывается распределением [3]:

$$\sigma(z) = \frac{1}{\sqrt{\cos 4\pi f_0 z/v - \cos 2\pi a/d}}, \quad |z| < a/2,$$

где  $a$  — ширина электрода,  $d$  — шаг электролов,  $v$  — скорость ПАВ.

Частотная характеристика одиночного электрода определяется с помощью преобразования Фурье этого распределения:

$$A(f) = \frac{\pi P_v(-\cos 2\pi a/d)}{K(\cos \pi a/d)},$$

где  $f_0 = v/d$  — центральная частота преобразователя;  $P_v$  — функция Лежандра 1-го рода с коэффициентом  $v = \frac{1}{2}(f/f_0 - 1)$ ;  $K(\cos \pi a/d)$  — эллиптический интеграл 1-го рода.

Другой моделью распределения заряда на электродах преобразователя является модель «одиночной полосы». В этой модели реальное распределение заряда считается таким, как у одиночной бесконечно длинной полосы

$$\sigma(z) = \frac{1}{\pi \sqrt{(a/2)^2 - z^2}}, \quad |z| < a/2.$$

Частотная характеристика этого распределения определяется выражением:

$$A(f) = J_0\left(\pi \frac{a}{d} \frac{f}{f_0}\right),$$

где  $J_0\left(\pi \frac{a}{d} \frac{f}{f_0}\right)$  — функция Бесселя.

Гораздо лучшие результаты дает модель, в которой реальное распределение заряда на электроде преобразователя аппроксимируется функцией

$$\sigma(z) = \frac{A_0(1 + C_1 z + C_2 z^2)}{\sqrt{(a/2)^2 - z^2}}. \quad (1)$$

Постоянные  $A_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ , входящие в (1), зависят от геометрии преобразователей и полярности близлежащих электролов.

Распределение (1) может быть также использовано для анализа возбуждения ПАВ на гармониках и расчета распределения заряда на электродах при падении на них поверхностной волны. Вполне удовлетворительные результаты получены для частот, которые менее чем в два раза превышают частоту акустического синхронизма.

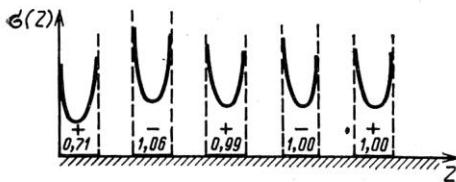


Рис. 1. Распределение электрического заряда вблизи края встречно-штыревой системы электродов и эффективная сила источников

Влияние электростатических эффектов особенно заметно для широкополосных преобразователей с относительной полосой пропускания  $\Delta f/f_0 > 30\%$ , у которых ширина промежутка меньше ширины электродов, и при работе на гармониках основной частоты.

Аподизованные преобразователи ПАВ имеют перекрытия электродов от 1 до сотен длин волн. Максимальная длина электродов ограничена необходимостью обеспечения соответствующего импеданса, омическим сопротивлением и соображениями экономии пьезоэлектрической подложки.

Размеры самых малых электродов ограничены дифракционными эффектами и краевыми эффектами на концах электродов, поскольку в поперечном направлении распределение заряда также имеет корневую особенность. Согласно результатам измерений, полученным в [4], краевые эффекты у электродов приводят к увеличению эффективной длины перекрытия электродов приблизительно на  $\lambda/3$  ( $\lambda$  — длина ПАВ), поэтому любое перекрытие электродов, меньшее  $\lambda/3$ , следует считать неправильным определенным.

Распределение заряда на электродах преобразователя и, следовательно, электрические характеристики устройства на ПАВ зависят от топологии и расположения электродов в самом преобразователе. Особенные трудности возникают при расчете распределения заряда на электроде, расположенному в конце массива электродов, и в том случае, когда нарушена последовательность и знакочередование фазы в массиве электродов. Последняя ситуация возникает при расчете преобразователей с выборочным удалением электродов.

На рис. 1 приведен график распределения плотности заряда вблизи конца знакочередующейся последовательности электродов и значения абсолютных величин зарядов. Эффекты конца последовательности электродов имеют место и в преобразователях ПАВ, у которых аподизация осуществлена изменением длины перекрытия электродов. Поэтому эти эффекты должны учитываться при проектировании устройств на ПАВ.

### ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАВ С ЭЛЕКТРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ И ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ

Проблема взаимодействия ПАВ с электродной структурой является ключевой в теории устройств на ПАВ. Для ее решения было предложено большое число моделей и методов, учитывающих те или иные эффекты второго порядка.

В модели δ-источников и некоторых других электростатических моделях используется приближение слабой связи, в котором предполагается, что распределение зарядов не изменяется при прохождении ПАВ под электродами преобразователя. Это допущение справедливо при выполнении условия  $Nk^2 \ll 1$ , где  $N$  — число периодов ВШП,  $k^2$  — коэффициент электромеханической связи. В противном случае необходимо учитывать обмен энергией между ПАВ и электродной структурой ВШП.

При взаимодействии ПАВ с электродной структурой происходят два вида отражений акустической волны от преобразователя: 1) регенерация ПАВ, связанная с обратимостью пьезоэффекта и двунаправленностью излучения ВШП; 2) масс-электрические отражения. Последние не зависят от нагрузки на входе ВШП и определяются геометрией электродов и свойствами материалов подложки и электродов.

Отражения, обусловленные взаимодействием ПАВ с ВШП, создают две проблемы. Одна из них — возникновение сигнала тройного прохождения (СТП) между входным и выходным преобразователями. Этот сигнал, задержанный относительного входного на время, равное утроенному времени задержки фильтра 37, создает неравномерность АЧХ и ФЧХ в полосе пропускания с периодом по частоте  $\Delta F = 1/2T$ .

Другая проблема — это искажение формы амплитудных и фазовых характеристик, вызванные отражениями в пределах одного ВШП.

Для анализа отражений, обусловленных регенерацией ПАВ в преобразователе, удобно использовать параллельную эквивалентную схему ВШП [4]. Из анализа эквивалентных схем следует, что передаточная функция аподизованного ВШП отличается от рассчитанной модели δ-источников из-за частотной зависимости проводимости излучения ВШП  $Y_a(\omega)$ .

Для того чтобы фильтр работал без искажений характеристик в полосе пропускания, нагрузки на его выходе и входе должны быть низкоомными. Это условие требует увеличения вносимого затухания по сравнению с теоретическим минимальным значением 6 дБ, обусловленным двунаправленностью ВШП. Практически величины

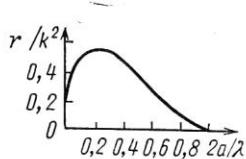


Рис. 2. Зависимость нормированного коэффициента отражения одного электрода от коэффициента заполнения

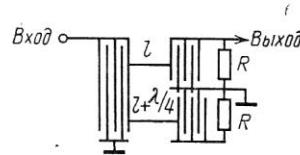


Рис. 3. Конструкция фильтра с отражающим преобразователем

вносимого затухания составляют 12...20 дБ при неравномерности в полосе пропускания 0,2...1 дБ. При вносимом затухании  $L = 10 \log P$  (более 10 дБ) уровень сигнала тройного прохождения связан с потерями: СТП =  $2L + 6$  дБ [4].

Рассматривая ВШП как обратимый трехполюсник с двумя акустическими и одним электрическим входом и предполагая отсутствие потерь энергии в ВШП и симметрию (или асимметрию) акустических входов, авторы работ [5, 6] получили выражения, связывающие коэффициенты матрицы рассеяния ВШП, не зависящие от выбора модели. Все коэффициенты рассеяния ВШП могут быть определены через две независимые переменные, в качестве которых в [5] выбраны модуль коэффициента передачи от акустического входа к электрическому и разность фазовых углов коэффициентов отражения и прохождения. Матрица рассеяния всего устройства может быть получена перемножением матриц отдельных ВШП.

Как уже отмечалось, в отличие от отражений, вызываемых регенерацией, массо-электрические отражения не зависят от внешних нагрузок и существуют при закорачивании электрического входа ВШП. Возникновение этих отражений вызвано возмущениями, создаваемыми ВШП на поверхности пьезоэлектрика за счет механического и электрического воздействий электродов. При шаге электродов, равном половине длины волны, отражения от всех электродов складываются синфазно.

Коэффициент отражения от одного электрода  $r$  пропорционален квадрату коэффициента электромеханической связи  $k^2$ . Его зависимость от коэффициента заполнения показана на рис. 2.

Коэффициент отражения ПАВ из-за массовой нагрузки [4] аппроксимируется выражением:

$$|r_m| = \frac{2}{3} \frac{\rho_m}{\rho_p} \frac{h}{\lambda},$$

где  $\rho_p$  и  $\rho_m$  — плотности пьезоэлектрика и материала покрытия;  $h$  — толщина слоя. Более строгое решение показывает, что величина коэффициента отражения зависит также от коэффициента Пуассона, материала подложки и от формы края электрода.

У материалов с малым  $k^2$  таких, как кварц, преобладает влияние массовых отражений. Кроме того, учет влияния накопления энергии под электродами приводит к появлению квадратичной составляющей в зависимости  $r_m$  от  $h/\lambda$  [7].

Для подавления массо-электрических отражений обычно используется конструкция ВШП с двойными (расщепленными) электродами шириной  $\lambda/8$  [4]. В таком преобразователе отражения от двух половин электрода противофазны и поэтому взаимно компенсируются. Коэффициент отражения для ВШП с двойными электродами минимален при коротком замыкании и максимален на холостом ходу. Его характеристики хорошо совпадают с расчетами по модели эквивалентной схемы. Эффективен метод взаимной компенсации массо-электрических и регенерированных отражений [6].

Недостатком метода является уменьшение размеров штырей в 2 раза, что ограничивает его применение в высокочастотных устройствах.

На рис. 3 показана конструкция, содержащая два выходных преобразователя, которые расположены на отличающихся на  $\lambda/4$  расстояниях от входного ВШП. Один из преобразователей включен на эквивалент нагрузки и создает отражения, противофазные отражениям от основного ВШП. В такой схеме дополнительные потери составляют 3 дБ.

Подавление тройного сигнала без увеличения вносимого затухания может быть достигнуто в фильтре с тремя преобразователями [8].

Недостатком конструкции является необходимость использования дополнительной фазосдвигающей цепи. Кроме того, если хотя бы один из преобразователей аподизован, то подавление тройного сигнала будет неполным.

Кардинальный метод устранения сигнала тройного прохождения — применение однонаправленных ВШП. При идеальном согласовании коэффициент отражения одинонаправленного преобразователя равен нулю. Поэтому могут быть достигнуты минимальные потери без искажения характеристик. В [9] описан фильтр с однонаправленными ВШП на частоту 1,23 ГГц, вносимым затуханием 7 дБ и неравномерностью АЧХ 0,2 дБ. Однако такие преобразователи требуют применения сложных согласующих цепей, содержащих не менее двух индуктивных элементов.

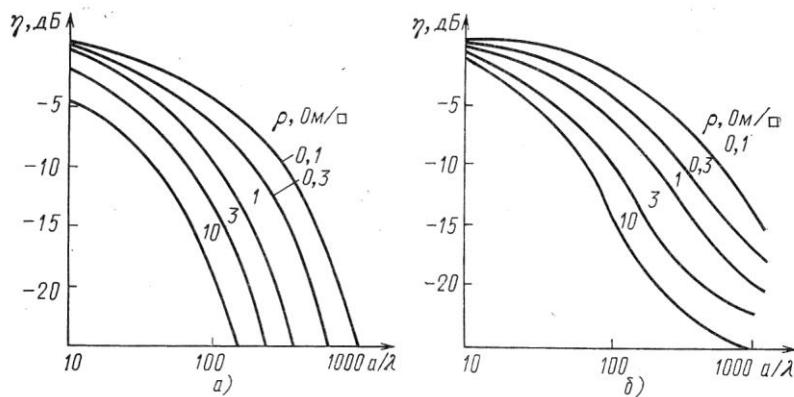


Рис. 4. Зависимость резистивных потерь пары электродов от апертуры и удельного сопротивления слоя

Еще одно проявление взаимодействия ПАВ с электродной структурой присуще только аподизованным преобразователям. Причиной этого является неплоскость фазовых фронтов ПАВ, проходящей под аподизованным ВШП. Это объясняется различием условий распространения ПАВ на свободной и металлизированной поверхностях пьезоэлектрика, что приводит к изменению фазовой скорости ПАВ за счет пьезоэффекта и влиянию массовой нагрузки со стороны электродов на поверхности пьезоэлектрика. Первый эффект увеличивается с ростом величины коэффициента электромеханической связи, а второй — с увеличением толщины электрода.

Неплоскость фазовых фронтов может быть значительно уменьшена введением дополнительных электродов. Они не перекрываются с противоположными электродами, поэтому практически не влияют на возбуждение ПАВ и позволяют уравнять протяженность участков металлизации вдоль направления распространения ПАВ по апертуре преобразователя. Неполную компенсацию искажений фазового фронта можно объяснить дифракцией, наличием зазоров между разнополярными электродами и различием условий распространения ПАВ над однополярными и разнополярными группами электродов.

Применение аподизованных преобразователей приводит также к дополнительным потерям из-за неоднородности амплитудных фронтов ПАВ. В практических конструкциях эти потери, называемые потерями на аподизацию, составляют 1...3 дБ. В ряде случаев эти потери можно устранить, используя ВШП с «наклонной» аподизацией [10]. Другой механизм потерь связан с конечным сопротивлением материала электродов.

Омическое сопротивление электродов оказывает существенное влияние на характеристики различных акустоэлектронных компонентов, входящих в состав устройств на ПАВ, таких как ВШП, многополосковый ответвитель, отражающие структуры и т. д. Связано это, с одной стороны, с тем, что толщину электродов обычно ограничивают с целью избежать искажений, вызванных «массовой» нагрузкой. С другой стороны, ширина электродов обычно не превышает половины длины акустической волны и составляет несколько микрон для частот порядка сотен мегагерц. Таким образом, роль резистивных эффектов возрастает с повышением частоты. Наличие сопротивления приводит к тому, что ПАВ генерируется неодинаково по апертуре акустического пучка. Поэтому для анализа резистивных эффектов апертуру разбивают на отдельные участки.

Потери, связанные с омическим сопротивлением электродов ВШП, можно оценить выражением [11]:

$$\eta = -10 \lg \left( 1 + \frac{R_e}{R_a} \right) \text{дБ},$$

где  $R_a$  — сопротивление излучения,  $R_e = \frac{8}{3} \rho_s a$ , где  $\rho_s$  — поверхностное сопротивление.

На рис. 4,а приводятся зависимости  $\eta$  для кварца ST-реза, на рис. 4,б — для YZ-реза LiNbO<sub>3</sub> от апертуры ВШП, вычисленные для различных значений поверхностного сопротивления [11].

Омическое сопротивление электродов приводит к искажениям профилей ПАВ по апертуре ВШП. Аналогичные искажения наблюдаются и в других структурных элементах устройств на ПАВ — многополосковых ответвителях (МПО) и отражательных решетках, представляющих собой ряды параллельных проводящих полосок.

Другой механизм искажений профилей ПАВ в МПО связан с волноводным характером распространения ПАВ под металлизированной структурой. В МПО, состоящем из ряда разомкнутых металлических полосок, скорость ПАВ ниже, чем на свободной поверхности пьезоэлектрика. В результате возникает волноводный эффект, приводящий к появлению мод, обусловленных конечными размерами структуры в попе-

речном направлении. Это приводит к неоднородности профилей переизлученной волны в МПО и появлению паразитных резонансов, когда такая структура используется как отражатель ПАВ.

Эффективным способом уменьшения влияния поперечных мод является взвешивание преобразователей по апертуре акустического пучка [12].

### ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАВ

При рассмотрении эффектов второго порядка в предыдущих разделах предполагалось, что ПАВ, распространяющаяся в пьезоэлектрическом звукопроводе, не затухает и имеет плоский фазовый фронт. Теперь будет учтено влияние дифракционных эффектов, обусловленных ограничением ширины пучка ПАВ, и потеря при распространении на электрические характеристики приборов.

Дифракция является одним из основных эффектов, искажающих амплитудные и фазовые характеристики устройств на ПАВ. Наибольшее влияние дифракция оказывает при малых апертурах преобразователей и больших расстояниях между ними, а также в случае аподизированных преобразователей, имеющих значительное число штырей с малым перекрытием.

Для согласования с электрической нагрузкой и из-за ограниченности размеров используемых подложек апертуры преобразователей устройств на ПАВ выбираются равными  $W_0 = (50\ldots70)\lambda_0$ , а приемный ВШП располагается на расстоянии  $l_a = (50\ldots150)\lambda_0$  от передающего, т. е. в ближней зоне Френеля акустического поля. Как показали расчеты дифракционных полей на подложке из ST-среза кварца, искажения амплитуды ПАВ в точках приема достигают 8...12 %, а пульсации фазы составляют 17...25° [12]. Поскольку амплитуда ПАВ нелинейно зависит от перекрытия электродов и пройденного расстояния, то влияние дифракции эквивалентно изменению заложенного при проектировании закона аподизации и приводит к росту боковых лепестков передаточной функции.

Наибольшее влияние на передаточную функцию фильтров на ПАВ с аподизированным ВШП оказывает непостоянство фазы принимаемой волны: боковые лепестки увеличиваются на 15...20 дБ, а отклонения фазовой характеристики фильтра от линейной на краях полосы пропускания достигают  $\pm(10\ldots15)^\circ$  [12].

Влияние дифракции заметно с уровня 30...35 дБ относительно уровня полосы пропускания и в полосе частот проявляется по разному. На частотах ниже и вблизи частоты синхронизма форма АЧХ практически не меняется.

В результате влияния дифракции значительно ухудшается уровень боковых лепестков. Особенно велики искажения АЧХ фильтров на ПАВ в нулях характеристики, так как дифракция нарушает строго противофазное сложение волн и приводит к ослаблению затухания на 25...30 дБ. В итоге нули АЧХ «заплывают», а высокочастотные боковые лепестки практически сливаются в один, нарушая симметрию АЧХ.

Влияние дифракционных искажений может быть скомпенсировано за счет коррекции амплитуд и положений источников акустических волн [13, 14].

Для уменьшения дифракционных искажений используются также различные конструктивные решения. Одним из таких решений является замена аподизации другими видами весовой обработки, например, выборочным удалением электродов, емкостным взвешиванием. Преимуществом таких конструкций является однородность фронта ПАВ, что позволяет использовать два взвешенных преобразователя. При этом также уменьшается влияние других вторичных эффектов. В результате удается получить уровень подавления боковых лепестков 50...65 дБ.

Еще одним путем снижения дифракционных искажений является использование материалов и срезов с минимальной дифракцией. Такие срезы найдены для  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ,  $\text{Al}_3\text{PO}_4$  [4]. Например, в повернутом срезе tantalата лития дифракция ослабляется в 20 раз по сравнению с изотропным случаем.

Потери на распространение являются одним из основных источников общих вносимых потерь на частотах выше 1 ГГц.

Суммарные потери на распространение обусловливаются в основном: 1) взаимодействиями с тепловыми фононами; 2) рассеянием на кристаллических дефектах и трещинах поверхности звукопровода; 3) наличием газа над поверхностью звукопровода.

Первый механизм характерен для кристаллических материалов.

Температурная зависимость потерь для кварца и ниобата лития в рассматриваемых диапазонах частот до нескольких гигагерц и температур до 300 К имеет монотонный характер и не превышает нескользких децибел.

Поверхность звукопровода устройств на ПАВ должна быть идеально полированной, поскольку шероховатость поверхности порядка 0,25 длины волны обуславливает увеличение затухания ПАВ почти на 50 %. Однако существующие методы механической обработки и химической полировки позволяют уменьшить размер шероховатостей до 0,1 мкм или меньше. Такая обработка поверхности звукопровода позволяет почти полностью устранить потери, связанные с этим механизмом в диапазоне частот до 1 ГГц.

Распространение ПАВ вдоль границы между звукопроводом и газовой средой сопровождается как затуханием вдоль направления распространения волны, так и изменением ее фазовой скорости по сравнению со скоростью ПАВ в вакууме. В СВЧ диапазоне

Таблица 1

Материал	Ориентация	Константы, 1/ГГц	
		A	B
Ниобат лития, $\text{LiNbO}_3$	$Y, Z$	0,88	0,19
	$16\frac{1}{2}$ , дважды поворнутый	0,94	0,21
	$41\frac{1}{2}$	0,75	0,30
Германат висмута, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	(001), [110]	1,45	0,19
	(111), [110]	1,45	0,19
Танталат лития, $\text{LiTaO}_3$	$Z, Y$	0,77	0,23
	$Y, Z$	0,94	0,20
Кварц, $\text{SiO}_2$	$Y, X$	2,15	0,45
	$ST, X$	2,62	0,47

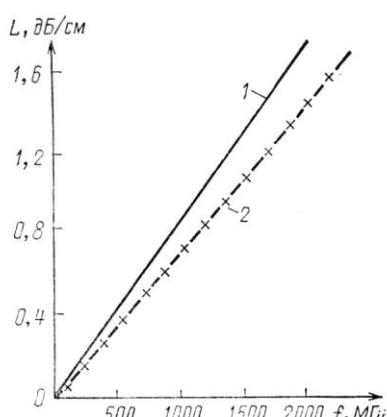


Рис. 5. Частотная зависимость затухания ПАВ, обусловленного нагружением аргоном

зоне затухание ПАВ, связанное с этим механизмом может быть весьма значительным:

$$\alpha = fP/\rho V^2 (\gamma \mu / RT)^{1/2},$$

где  $\mu$  — молекулярная масса;  $P$  — давление;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура;  $\gamma$  — адиабатическая постоянная;  $\rho$  — плотность газовой среды.

На рис. 5 приведена частотная зависимость затухания ПАВ, обусловленного нагружением аргоном при температуре 298 К и давлении  $10^6$  Па. Некоторое различие теории (1) и эксперимента (2) объясняется несоответствием модели условиям эксперимента.

Таким образом, потери на распространение, как правило, определяются первым и третьим механизмом. Последний линейно зависит от частоты, а первый имеет квадратичную зависимость, т. е.

$$\alpha = Af^2 + Bf \text{ дБ/мкс}.$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  для наиболее распространенных материалов приведены в табл. 1 [4]. Из этих данных следует, что высокочастотные приборы на ПАВ должны помещаться в вакуумированные корпуса. При этом значительно снижается скорость старения приборов.

### ИЗЛУЧЕНИЕ И ПРИЕМ ПАРАЗИТНЫХ СИГНАЛОВ

Часть энергии, подводимой ко входному преобразователю устройства на ПАВ, может быть передана на выходной преобразователь, минуя акустический канал, электромагнитной и электростатической наводкой. В зависимости от конструкции устройства и его корпуса эти наводки могут быть основным источником искажений характеристик устройства на ПАВ. Взаимное влияние электрических схем на входе и выходе можно устранить соответствующим экранированием [1]. Однако при этом остается паразитная связь между преобразователями внутри устройства, обусловливаемая: 1) проходной ѹмкостью; 2) взаимной индуктивностью; 3) излучением электромагнитной энергии входным ВШП.

Искажение электрических характеристик устройств на ПАВ связано не только с электростатической наводкой, но и с излучением и приемом объемных волн, а также отражениями поверхностных и объемных волн от краев звукопровода.

Как известно, ВШП обладают двунаправленностью излучения. Это приводит к тому, что ПАВ, отраженные от обоих краев звукопровода, детектируются на выходном ВШП, что приводит к появлению паразитных импульсных откликов, а это, в свою очередь, приводит к искажению АЧХ.

Уменьшить уровень отражений ПАВ от краев звукопровода можно: скашиванием или скруглением торцов звукопровода, нанесением поглотителя между ВШП и краями

звукопровода, размещением между ВШП и торцами звукопровода полосок, перекрывающих половину акустического потока. Приведенные выше конструктивные решения позволяют практически полностью устраниТЬ искажения электрических характеристик устройств на ПАВ из-за отражений от краев звукопровода.

Встречно-штыревой преобразователь наряду с ПАВ возбуждает объемные акустические волны (ОАВ), которые распространяются вглубь кристалла. Отражаясь от грани звукопровода, объемные волны могут попасть на выходной преобразователь и вызвать на нем искажающие отклики. Кроме того, генерация объемных волн приводит к дополнительным потерям на их излучение. Эти потери зависят от материала звукопровода и уменьшаются с сужением полосы пропускания устройств на ПАВ. Так, для ST-резца кварца потери, связанные с излучением объемных волн в устройстве с относительной полосой пропускания 3 %, не превосходят 1 дБ [16]. Скорость объемной волны и угол, под которым эта волна распространяется, связаны соотношением  $\cos \theta = v/fd$ , где  $d$  — период ВШП.

Поскольку скорость ПАВ, как правило, меньше скорости объемных волн, распространяющихся в пьезоэлектрике, частоты акустического синхронизма для всех продольных и поперечных объемных волн лежат выше частоты акустического синхронизма ПАВ.

Из всех типов волн, возбуждаемых ВШП, наибольшее влияние на электрические характеристики устройств на ПАВ оказывают квазипоперечные волны, скорость которых близка к скорости ПАВ. Интенсивность квазипоперечных объемных волн зависит от материала звукопровода и его ориентации. В [15] приведены результаты исследования ПАВ в повернутых Y-резцах ниобата лития. Показано, что для повернутого на 127,86° вокруг оси  $x$  ниобата лития квазипоперечные волны практически не излучаются. Кроме того, у данного резца высокий коэффициент электромеханической связи и отсутствуют отклонения потока энергии вдоль поверхности звукопровода. Этот срез ниобата лития наиболее широко используется в технике ПАВ.

На частотах много выше частоты акустического синхронизма ПАВ объемные волны можно частично подавить, подстраивая входной и выходной преобразователи с помощью индуктивности так, чтобы амплитуда сигнала на высоких частотах была достаточно малой. Уменьшить искажающее влияние объемных волн можно также с помощью соответствующей обработки граней звукопровода. Для этой цели нижняя поверхность звукопровода изготавливается шероховатой или рифленой и покрытой вязким проводящим покрытием, которое поглощает и рассеивает объемные волны.

Уменьшить влияние объемных волн на электрические характеристики устройств на ПАВ можно, изготовляя грани звукопровода не плоскопараллельными. Тогда фронт отражающихся от граней звукопровода объемных волн будет асимметричным и его различные участки будут наводить на электродах входного ВШП компенсирующие напряжения. Это, очевидно, приводит к уменьшению искажающих откликов, связанных с объемными волнами, и совершенно не влияет на поверхностные волны.

Уменьшить влияние объемных волн можно также установкой между входным и выходным преобразователями проводящего экрана, ширина которого равна половине апертуры перекрытия электродов ВШП. Чтобы уравнять время задержки в обеих частях устройства, соответствующую половину выходного ВШП сдвигают в сторону входного ВШП. Объемные волны, возбуждаемые входным ВШП, практически не испытывают влияния проводящего экрана и подавляются на выходном ВШП за счет фазовой интерференции.

Другим конструктивным методом подавления сигнала с излучением объемных волн является использование многополоскового ответвителя. При определенном числе электродов МПО переизлучает из одного канала в другой только поверхностную волну. Более подробно о принципах действия МПО и применении его в устройствах на ПАВ написано в [16]. Описанные выше методы позволяют практически полностью устраниТЬ искажение объемных волн на электрические характеристики устройств на ПАВ.

Устройства на основе сегнетопьезоматериалов являются малошумящими. Виды шумов, возможных в пьезоэлектриках, их природа и количественная оценка рассмотрены в [16].

Для диэлектриков характерны шумы: пробоя, циклической переполяризации и Баркгаузена.

Шумы пробоя обусловливаются различными неоднородностями структуры и геометрическими факторами и наблюдаются при краевом пробое из-за искажения поля у края образцов; неполном пробое внутри объема, из-за поверхностных разрядов и т. д. Такие шумы существенно зависят от величины приложенного к сегнетоэлектрику электрического поля, а также продолжительности его воздействия и температуры.

Уровень шумов пробоя в керамических сегнетоэлектриках выше, чем в кристаллических. Объясняется это меньшей неоднородностью структуры последних. Действительно, керамику можно представить состоящей из кристаллической, стекловидной и газообразной фаз. При этом различным образом ориентированные кристаллиты разделяются аморфной прослойкой. Газовая фаза беспорядочно распределена по всему объему в виде микро- и макропор. Таким образом, поле в керамике всегда неоднородно, и в объеме сегнетокерамического элемента возникают локальные увеличения напряженности электрического поля.

При циклической поляризации сегнетоэлектрика ток, протекающий через него, имеет сложный дискретно-сплошной спектр: он содержит как гармоники частоты переполяризации, так и сплошную шумовую составляющую. Это объясняется тем, что сегнетоэлектрики обладают доменной структурой. Поэтому при приложении к сегнетоэлектрику переменного электрического поля, поляризация в нем будет меняться не строго периодически из-за непериодичности процессов переориентации отдельных доменов. Непериодическое изменение поляризации приводит к непериодичности тока через сегнетоэлектрик, а значит, спектр тока будет содержать сплошную (шумовую) составляющую.

Отношение шумовой составляющей тока к эффективному значению всего тока составляет обычно  $10^{-7}...10^{-8}$ , что на 1,5...2 порядка меньше соответствующей величины для одного из самых малошумящих ферромагнитных элементов.

Согласно эффекту Баркгаузена при перестройке доменной структуры под влиянием внешних воздействий поляризация изменяется скачкообразно.

Шумы Баркгаузена, как и шумы циклической поляризации, неразрывно связаны с доменной структурой сегнетоэлектрического материала. Хотя природа скачков Баркгаузена до конца не ясна, есть предположение, что они определяются зарождением новых доменов в образце и скачкообразным изменением стенки.

Эксперименты, проведенные на генераторах с линиями задержки и резонаторами ПАВ [17], показали также, что устройства на ПАВ обладают собственными шумами. Шумы вблизи центральной частоты, называемые фликкер-шумами, вызваны флуктуациями фазы с частотной зависимостью  $1/\Delta f$  в каком-либо из элементов генератора. Эти флуктуации фазы вызывают частотную модуляцию генератора и дают частотную зависимость  $1/\Delta f^3$  для уровня частотно-модулированных шумов. Спад уровня шумов ограничен белым фазовым шумом, не зависящим от частоты. Граница между областями с частотной зависимостью  $\Delta f^{-3}$  и  $\Delta f^0$  находится для линий задержек и резонаторов на ПАВ в диапазоне 1...100 кГц. Для генераторов с резонаторами на ПАВ порог фазового шума значительно меньше, чем у генераторов с линиями задержки, и составляет 160 дБс/Гц.

Было обнаружено, что уровень фликкер-шума значительно зависит от способа обработки и герметизации устройства на ПАВ. Лучшие результаты получены при сборке с применением кремнийорганического каучука. Этот эффект объясняется взаимодействием летучих кремнийорганических соединений гидроксильными группами с ненасыщенными связями на поверхности кварца. Интересно отметить, что образцы резонаторов на ПАВ с поверхностью, покрытой несколькими монослоями кремнийорганического компаунда, имели наименьшие скорости старения (порядка  $10^{-6}$  в год).

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВ НА ПАВ

Электрические параметры устройств на ПАВ определяются структурой преобразователей и зависят от характеристик используемого материала звукопровода.

В технологический процесс изготовления как звукопроводов, так и электродов устройств на ПАВ входит много разнообразных операций, что вызывает появление производственных погрешностей их размеров и свойств. Поэтому входные параметры устройств неизбежно отличаются от средних значений, рассчитанных при номинальных размерах и характеристиках.

Производственные погрешности можно разделить на систематические и случайные. Систематические погрешности могут быть учтены при расчете и компенсированы, поэтому они обычно не рассматриваются.

К случайным погрешностям, возникающим при изготовлении структур фильтров, относятся: погрешности по ширине электродов, их длине, взаимному расположению, толщине, неровности краев электродов, разрывы и замыкания электродов, взаимная разориентация преобразователей фильтра и т. д.

К погрешностям, связанным с операциями изготовления звукопроводов, относятся отклонения скорости акустической волны, отклонение коэффициента электромеханической связи, разброс диэлектрической проницаемости и т. д.

Погрешности, возникающие при изготовлении структур устройств, обусловлены дефектами фотолитографического процесса.

Погрешности, возникающие при изготовлении звукопроводов, обусловлены разбросами характеристик используемых монокристаллов и отклонениями от заданной кристаллографической ориентации при распиловке.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Под влиянием случайных производственных погрешностей АЧХ и ФЧХ становятся несимметричными, «заплывающими» нули частотных характеристик, ухудшается затухание боковых лепестков АЧХ, появляются пульсации в полосе пропускания. При одних и тех же значениях производственных погрешностей среднеквадратичные и абсолютные ошибки затухания максимальны в нулях АЧХ, значительны в боковых лепестках и минимальны в полосе пропускания. Отклонения затуханий в нулях и в боковых лепестках АЧХ тем больше, чем больше номинальные значения этих затуханий.

При существующей технологии изготовления устройств на ПАВ с помощью фотолитографии наибольшее влияние на ошибки затухания оказывает погрешность по ширине и длине электродов. Очевидно, чем выше рабочая частота ВШП, тем больший вклад в разброс его частотных характеристик будут вносить погрешности одинаковой величины из-за роста соответствующих относительных погрешностей.

Весьма частым дефектом при изготовлении структур фильтров ПАВ является обрыв электродов в преобразователях вследствие проколов в пленках фоторезиста и металлического покрытия.

В широкополосных ( $\Delta f/f_0 > 10\%$ ) преобразователях обрыв даже единичного электрода недопустим, так как в результате существенно изменяются все параметры устройства: полоса пропускания, коэффициент прямоугольности и уровень боковых лепестков. Особенно сильное искажение параметров наблюдается при обрыве электродов в зоне главного лепестка функции аподизации.

Существующие при промышленном росте монокристаллов разбросы скорости ПАВ и коэффициента связи в пределах 0,1 % не вызывают значительных искажений формы АЧХ и ФЧХ, но приводят к сдвигу их средних частот. При использовании слоистых структур, таких как пленки ZnO на стекле, большое значение имеет воспроизводимость толщины пленки пьезоэлектрика [18].

Влияние отклонений в ширине штырей снижается в конструкциях с различной шириной разнополярных штырей [19], но при этом уменьшается эффективность преобразования ПАВ. Для уменьшения влияния обрывов штырей предложена конструкция аподизированного преобразователя с перемычками между смежными штырями и с приближениями к области перекрытий контактными шинами [20]. Это позволяет уменьшить площадь ВШП, чувствительную к обрывам штырей. Отклонения центральной частоты в фильтрах ПАВ, как правило, не превышают заданных допусков. Для узкополосных устройств, таких как резонаторы ПАВ, применяется подстройка частоты с помощью плазмохимического травления алюминиевой металлизации или кварцевой подложки в процессе изготовления прибора [21].

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Наибольший интерес среди приборов на ПАВ вызывают узкополосные устройства обработки радиосигналов, такие как резонаторы, генераторы и узкополосные фильтры. Для них на первый план выходят требования к независимости характеристик от внешних дестабилизирующих факторов. Чтобы успешно конкурировать с резонаторами и фильтрами на объемных волнах, устройства на ПАВ должны обладать температурной стабильностью, сравнимой со стабильностью широко применяемых АТ-срезов кварца.

Наиболее сильный дестабилизирующий фактор — изменение температуры окружающей среды. Самым распространенным термостабильным срезом для поверхностных волн является ST-срез кварца, температурная зависимость которого такая же, как у кварцевых резонаторов ВТ-среза. У ST-среза нулевой температурный коэффициент первого порядка, а коэффициент второго порядка равен  $3,15 \cdot 10^{-8} \text{ } 1/\text{C}^2$ . Хотя устройства на ПАВ, изготовленные из ST-среза кварца, обладают относительно хорошей стабильностью, в некоторых случаях они могут быть неприменимы из-за малого коэффициента электромеханической связи.

Широкополосные устройства на ПАВ, работающие в большом температурном диапазоне, зачастую не удается сделать малогабаритными, дешевыми и не потребляющими энергии потому, что для работы таких устройств необходимы термостаты или различные термостабилизирующие схемы.

Поиск термостабильных материалов и ориентаций для устройств на ПАВ ведется в нескольких направлениях [4]:

1. Продолжаются исследования кварца с целью нахождения ориентаций и срезов с наилучшими температурными характеристиками.

2. Изучаются новые материалы с большим, чем у кварца, коэффициентом электромеханической связи.

3. Исследуются слоистые структуры с различными по знаку температурными коэффициентами и большим коэффициентом электромеханической связи.

При выборе срезов и направлений распространения ПАВ должны быть обеспечены:

1. Коэффициент электромеханической связи, отличный от нуля, и возможно даже меньший, чем у ST-среза кварца, поскольку высокое значение  $k^2$  существенно лишь для относительно широкополосных приборов, в которых предельно высокая температурная стабильность обычно не требуется.

2. Меньшая степень дифракции и небольшое отклонение вектора потока энергии вдоль поверхности и вглубь ее. В противном случае структура ВШП должна иметь наклон с целью компенсации отклонения луча. Это приводит к более сложной конструкции и возможности появления погрешностей в процессе изготовления устройства на ПАВ.

3. Простота изготовления пьезоподложек и меньшая чувствительность к кристаллографической разориентации.

Наилучшие результаты были получены для срезов, близких к повернутому на  $46^\circ$  X-срезу с направлением распространения под углом  $64^\circ$  к оси  $y$  и для двухповоротных

срезов кварца в диапазоне углов ( $\chi\psi\varphi$ )  $0...30^\circ/-90...+90^\circ/0...180^\circ$ . Показано, что для двух ориентаций в интервале температур от  $-50$  до  $+125^\circ\text{C}$  температурные коэффициенты более чем в два раза лучше, чем у ST-среза, а для одной из ориентаций ( $\chi\psi\varphi=6,57^\circ/Q=26,68^\circ/\psi=134,9^\circ$ ) превосходят характеристики повернутого на  $46^\circ$  X-среза.

Стремление к разработке устройств на ПАВ с относительной полосой пропускания  $\Delta f/f_0 > 3\%$  и малыми вносимыми потерями, не зависящими от температуры рабочими характеристиками, привело к поиску температурно-компенсированных пьезоэлектриков с большим, чем у кварца, коэффициентом электромеханической связи. Особое внимание уделялось производным кварца — берлиниту ( $\text{Al}_3\text{PO}_4$ ) и бета-эвкриптиту ( $\beta\text{-LiAlSiO}_4$ ).

Из однократно повернутых срезов берлинита наиболее перспективен срез, повернутый вокруг оси  $x$  на  $80,4^\circ$ . Этот срез является аналогом ST-среза, но значение  $\Delta V/V$  у него в 4 раза больше.

Таблица 2

Материал	Углы Эйлера, град			Угол отклонения вектора потока энергии, град	Коэффициент анизотропии, $\gamma$	$\frac{\Delta V}{V} \times 10^{-2}$	Скорость ПАВ, $\text{м}/\text{с}$
	$\lambda$	$\mu$	$\theta$				
Кварц, $\text{SiO}_2$	0	132,75	50	0	0,378	0,058	3158
Берлинит, $\text{Al}_3\text{PO}_4$	0	80,4	0	0	0,901	0,245	2751
	76,8	90,0	11,5	0	0,372	0,250	2756
	79,7	90,0	15,5	0	0,221	0,247	2758
Бета-эвкриптиит, $\beta\text{-LiAlSiO}_4$	90,0	90,0	69,0	18	—	0,100	3662
	0	57,0	62,0	0	0,32	0,035	3258
$\text{Tl}_3\text{VS}_4$ , $\text{TlTaSe}_4$	—45	90,0	70,0	—17	—	1,0	900
	45	24,0	90,0	0	—	0,617	1010
	45	54,0	90,0	0	—	0,508	879

Из табл. 2 видно, что коэффициент анизотропии  $\gamma$  для этого среза берлинита больше, чем у ST-среза кварца. Это означает, что дифракционные свойства ST-среза лучше, чем у повернутого вокруг оси  $x$  на  $80,4^\circ$  среза берлинита.

Поиски температурно-компенсированных срезов берлинита с лучшими дифракционными свойствами привели к рассмотрению дважды повернутых срезов. Были найдены два среза с нулевым углом отклонения потока мощности вдоль поверхности и лучшими, чем у ST-среза кварца, дифракционными характеристиками. Величина  $\Delta V/V$  в обоих случаях составляет 0,25 %.

В бета-эвкриптиите найдена однократно повернутая температурная ориентация. Эта величина для одного среза почти в 2 раза выше, чем у ST-среза кварца. Недостатком является отличный от нуля угол отклонения вектора потока мощности. Дважды повернутый срез этого кристалла обладает нулевым углом отклонения потока мощности, но его коэффициент электромеханической связи меньше, чем у кварца.

Другими перспективными материалами являются сульфосоли вида  $\text{Tl}_3BX_4$ , где  $B$  может означать  $V$ ,  $Nb$  или  $Ta$ , а  $X=S$  или  $Se$ . Так, например, для кристалла  $\text{Tl}_3\text{VS}_4$  величина  $\Delta V/V$  приблизительно в 10...15 раз выше, чем у известных срезов кварца. Кроме того, у кристалла  $\text{Tl}_3\text{VS}_4$  имеется ориентация, имеющая нулевой угол отклонения вектора потока энергии. Из табл. 2 видно, что скорость ПАВ в  $\text{Tl}_3\text{VS}_4$  приблизительно в 3 раза меньше скорости ПАВ в кварце. Это затрудняет его использование в высокочастотных устройствах на ПАВ.

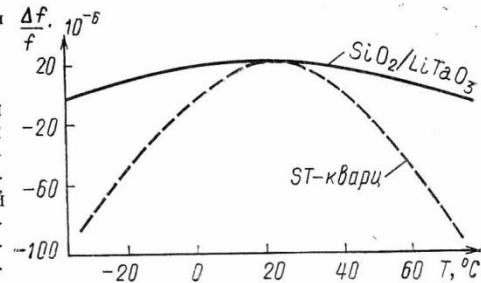
Аналогичными свойствами обладает один из срезов кристалла  $\text{Tl}_3\text{TaSe}_4$ .

Другим методом получения хорошей температурной стабильности при высоком коэффициенте электромеханической связи является использование различных слоистых или компенсированных структур с противоположными по знаку температурными коэффициентами. Из приведенных выше методов только этот дал возможность получить материалы для подложки звукопровода, по всем параметрам превосходящий ST-срез кварца.

Наиболее перспективной оказалась пленка  $\text{SiO}_2$ . Это покрытие аморфно; гораздо менее, чем другие покрытия, чувствительно к примесям и изменениям параметров напыления. Кроме того, пленка  $\text{SiO}_2$  обладает отрицательным температурным коэффициентом первого порядка, а почти все материалы для устройств на ПАВ имеют положительные температурные коэффициенты.

Результаты исследований показали: температурная стабильность структуры  $\text{SiO}_2$  на ниобате лития аналогична известной для ST-среза кварца. Однако у нее плохая долговременная стабильность и высокий уровень потерь на распространение и отражение ПАВ.

Рис. 6. Температурные зависимости  $\Delta f/f$  для структуры с тонкопленочным покрытием  $\text{SiO}_2/\text{LiTaO}_3$  и ST-среза кварца



Многообещающие результаты были получены на структуре  $\text{SiO}_2$ , выполненной на tantalате лития. Она обладает нулевым температурным коэффициентом первого порядка при  $h/\lambda=0,59$ . При меньшей толщине пленки получается положительный температурный коэффициент задержки, при большей — отрицательный. Измененное значение  $\Delta V/V=1,4\%$ .

На рис. 6 показана температурная стабильность линии задержки, изготовленной на слоистой структуре  $\text{SiO}_2$  на tantalате лития. Для сравнения на этом же рисунке приведена температурная зависимость для подложки из ST-среза кварца. Из рисунка следует, что слоистая структура обладает гораздо лучшей термостабильностью, чем ST-срез кварца. Температурный коэффициент второго порядка у исследуемой структуры составляет  $3 \cdot 10^{-9}/^{\circ}\text{C}^2$ , что примерно на порядок лучше, чем у ST-среза кварца.

Важной особенностью слоистой структуры является зависимость температурного коэффициента от толщины подложки. Так, с ростом слоя температурный коэффициент первого порядка увеличивается с коэффициентом  $0,14 \cdot 10^{-6}/\text{МГц}$ . Очевидно, что для широкополосных устройств температурный коэффициент задержки первого порядка, равный нулю, не может быть получен на всех частотах одновременно. Однако для узкополосных устройств на ПАВ это не является проблемой, поскольку температурный коэффициент второго порядка практически не зависит от частоты.

Таким образом, слоистая структура  $\text{SiO}_2$  на ниобате лития обладает почти в 10 раз большей эффективностью возбуждения ПАВ, чем ST-срез кварца, и одновременно дает десятикратное улучшение температурной стабильности устройства.

К недостаткам такой структуры следует отнести некоторое усложнение технологии изготовления, несколько большие потери на распространение ПАВ и наличие дисперсии. Однако для узкополосных фильтров и генераторов на ПАВ эти недостатки имеют малое значение.

### ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ НА ПАВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА

На основании вышеизложенного можно выделить следующие этапы проектирования высококачественных устройств на ПАВ с учетом эффектов второго порядка. Этап 1 содержит составление требований на устройства, которые чаще всего задаются в частотной области. Поэтому в первый этап включаются требования к параметрам амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристикам (АЧХ и ФЧХ) или к групповому времени запаздывания (ГВЗ). На первом этапе обычно задаются также сопротивление генератора и нагрузки, между которыми будет работать устройство, уровень входного сигнала, интервал рабочих температур, габариты, масса, стоимость и т. д. При проектировании фильтров, предназначенных для селекции импульсных сигналов, задаются также длительность фронтов и величина выбросов переходной характеристики или же вид сигнала и величина его допустимых искажений.

Одним из основных параметров, фигурирующих в спецификации требований к устройствам на ПАВ для обработки импульсных сигналов, должен быть уровень ложных сигналов, измеряемый обычно во временной области и представляющий отношение наибольшего паразитного сигнала на выходе фильтра к основному сигналу ПАВ. Как уже указывалось, паразитные или ложные сигналы в устройствах на ПАВ определяются, в основном, электромагнитной наводкой, отражениями ПАВ и генерацией ОАВ и следуют с различным запаздыванием относительно основного сигнала. При этом не следует путать понятие уровня ложных сигналов с понятием динамического диапазона, который определяется как отношение максимального и минимального напряжений, соответствующих линейному участку амплитудной характеристики устройства на заданной средней частоте.

Без принятия каких-либо мер уровень ложных сигналов в устройствах на ПАВ составляет обычно  $-(25..30)$  дБ. При использовании же различных конструктивных или схемотехнических решений, рассмотренных выше, уровень может быть доведен до  $-(50..60)$  дБ.

Динамический диапазон фильтров ПАВ зависит, с одной стороны, от уровня внутренних шумов, обусловленных, в основном, термодинамическими флуктуациями концентраций микродефектов на поверхности звукопровода, в его кристаллической решетке и металлической пленке преобразователей, а с другой стороны — от величины напряжения пробоя конструкции используемых преобразователей и может составлять более  $90..100$  дБ.

На этапе 2 производится выбор материала звукопровода, поскольку последним определяются основные параметры устройства: средняя частота, вносимое затухание,

затухание в полосе заграждения, уровень ложных сигналов, температурная и временная стабильность, стоимость и т. д. Требования к материалу звукопровода, одновременно отвечающему перечисленным параметрам, достаточно противоречивы, поэтому прежде всего необходимо определить, какой набор характеристик материала является решающим для реализации конкретного устройства. Для типовых конструкций устройств на ПАВ при выборе материала чаще ориентируются на величину вносимого затухания и температурную стабильность.

На этапе 3 устанавливается структурная схема устройства на ПАВ. Поскольку передаточные свойства устройства на ПАВ определяются в основном преобразователями, то в первую очередь необходимо выбрать типы и конструкции преобразователей, их количество, способ включения, а также методы взвешивания электродов преобразователей, от которых зависят предельные реализуемые параметры последних.

Для реализации конкретных требований в состав устройства могут быть включены элементы акустического тракта: многополосковые ответвители, повышающие ослабление паразитных ОАВ; фокусирующие волноводы; линзы, снижающие дифракционные искажения; отражатели, предназначенные для режекции отдельных частот, дифракционные решетки; электростатические экраны, фазовращатели, акустические поглотители, пленочные покрытия, формирующие АЧХ и ФЧХ или акустически согласующие ВШП и т. д. Звукопровод как передаточная среда для акустического сигнала также должен быть включен в структурную схему устройства.

В результате третьего этапа должны быть составлены технические требования на каждый из этих элементов акустического тракта.

После определения структурной схемы задача синтеза устройства на ПАВ, выполняемая на этапе 4, сводится к синтезу преобразователей и других элементов акустического тракта по заданным характеристическим параметрам. На этом этапе выбирается физико-математическая модель (или модели), описывающая работу преобразователей и других элементов акустического тракта устройства с необходимой для конкретного случая точностью, методы расчета частотных и временных характеристик, а также топологии элементов акустического тракта и критерии близости рассчитанных характеристик к заданным.

Обычно сопротивления устройств на ПАВ отличаются от сопротивлений нагрузок, и на их входе и выходе используются активные или пассивные согласующие цепи. Поэтому основной целью этапа является выбор типа согласующей цепи и расчет рабочих параметров фильтра при нагружении на реальные сопротивления.

Результатом пятого этапа проектирования должны быть электрические схемы входной и выходной согласующих цепей, расчет их элементов, частотных и временных характеристик, а также определение рабочих передаточных функций, импульсных характеристик, сопротивлений и расчет топологии всех элементов акустического тракта и устройства в целом, отвечающих заданным требованиям.

Как уже указывалось, эффекты второго порядка оказывают существенное влияние на частотные и временные характеристики устройства на ПАВ, поэтому практически невозможно создание высококачественного устройства без учета и компенсации этих эффектов.

Характер эффектов второго порядка зависит, в основном, от материала звукопровода, конструкции преобразователей и режимов согласования. Поэтому учет эффектов второго порядка производится на этапе 6 после определения топологии устройства и вида согласующих цепей.

Причины возникновения этих эффектов, методы расчета и способы их уменьшения весьма разнообразны и часто для различных эффектов противоречат друг другу. Поэтому уже на первом этапе проектирования необходимо выделить сравнительно узкий перечень параметров, наиболее важных для конкретного устройства, например, затухание в полосе заграждения, а на втором и третьем этапе определить конструктивные или расчетно-аналитические методы уменьшения искажений из-за каждого эффекта, влияющего на выделенные параметры.

Суть конструктивных методов состоит в выборе типов преобразователей, других элементов акустического тракта и конструкций устройства в целом, слабо подверженных влиянию какого-либо эффекта, например, дифракции при излучении и приеме ПАВ или же, наоборот, использующих этот эффект для реализации заданных характеристик устройства. Примерами применения побочных явлений или формирования заданных характеристик является противофазное совмещение одной из гармоник толщинно-сдвиговых колебаний ОАВ в звукопроводе с частотой соседнего канала изображения телевизионного фильтра на ПАВ с целью увеличения режекции в этой точке, использование дифракционных решеток для разделения пучка ПАВ на отдельные каналы и формирования фильтровых характеристик одного из этих каналов, применение приверхностных акустических волн в фильтрах и резонаторах и т. д.

Суть расчетно-аналитических методов состоит в компенсации искажений на основе анализа того или иного эффекта и уже выбранной конструкции устройства. Компенсация при этом может осуществляться как путем корректировки топологии спроектированных преобразователей, так и введением в заданные характеристики преобразователей или устройства в целом предыскажений, противоположных влиянию данного эффекта.

Возможно также использование специальных методов синтеза с низкой чувстви-

тельностью к заданному эффекту. Примером может служить синтез эквидистантных аподизованных ВШП по методу свертки с функциями двойной ортогональности или по оптимальному методу на основе алгоритма Ремез. По сравнению с другими указанные методы обеспечивают большие перекрытия электродов при заданных характеристиках, что позволяет снизить дифракционные искажения.

Очевидно, при проектировании высококачественных устройств на ПАВ следует совместно использовать как конструктивные, так и расчетно-аналитические методы борьбы с эффектами второго порядка, поскольку не существует конструкций звукопровода, преобразователя или устройства на ПАВ в целом, полностью свободных от всех этих эффектов, а при одновременной компенсации влияния нескольких побочных явлений, например, по расчетно-аналитическому методу предыскажений, могут потребоваться взаимоисключающие корректировки топологии.

На шестом этапе следует оценить степень влияния того или иного эффекта на заданные параметры преобразователей и устройства в целом.

Результатом проектирования на шестом этапе должно быть определение окончательной структурной схемы устройства на ПАВ, согласующей цепи; расчет рабочих параметров с учетом эффектов второго порядка и расчет топологии всех элементов акустического трека, в том числе топологии преобразователей, спроектированной для компенсации влияния некоторых из эффектов.

Наконец, на этапе 7 осуществляется получение управляющих перфолент или других машинных носителей информации для технологического оборудования с целью изготовления фотошаблонов или непосредственно топологии, устройства на ПАВ и выпуска конструкторской документации.

Разумеется, составной частью каждого этапа приведенного процесса проектирования устройств на ПАВ является логическая операция анализа получаемых результатов и определение их правильности или сравнение с заданными параметрами по выбранным критериям близости. Если на каком-либо этапе получены неудовлетворительные результаты, следует вернуться к предыдущим этапам, например, модифицировать структурную схему устройства или конструкции его элементов, изменить используемую физико-математическую модель или метод расчета на более совершенные, в крайнем случае, снизить исходные требования к параметрам устройства.

Кроме того, при необходимости в процессе проектирования может быть введен самостоятельный этап оптимизации конструкции устройства на ПАВ, стоимости, габаритов, массы, чувствительности к технологическим погрешностям, времени изготовления фотошаблонов или выпуска документации и т. д. После этого можно изготовить и испытать лабораторный образец в качестве прототипа для дальнейших экспериментальных исследований и доработки устройства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фильтры на поверхностных акустических волнах** (расчет, технология и применение) / Дж. Фарнелл, Р. Милсон, М. Реквуд и др. Пер. с англ. / Под ред. Г. Мэттьюза; пер. под ред. В. Б. Акпамбетова. — М.: Радио и связь, 1981.
2. **Лэм Г.** Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация: Пер. с англ. / Под ред. И. Н. Теплюка. — М.: Мир, 1982.
3. **Peach R. C.** — IEEE Trans., 1981, v. SU-28, № 2.
4. **Поверхностные акустические волны** / А. Олинер, Дж. Фарнелл, Г. Джерард и др. Пер. с англ. / Под ред. А. Олинера; пер. под ред. И. С. Реза. — М.: Мир, 1981.
5. **Rosenberg R. L.** — IEEE Trans., 1981, v. SU-28, № 1.
6. **Panasic C. M., Hunsinger B. J.** — IEEE Trans., 1981, v. SU-28, № 2.
7. **Datta S., Hunsinger B. J.** — IEEE Trans., 1980, v. SU-27, № 6.
8. **Yen K. H., Stokes R. B.** — Electron. Lett., 1982, v. 18. № 10.
9. **Shibayama K.** — IEEE Trans., 1981, v. SU-28, № 2.
10. Пат. 55—23490 (Япония), МКИ Н03Н 9/145.
11. **Urabe S., Asakawa K.** — Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1981.
12. **Mader W., Stoker H., Tobolka G.** — Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1980.
13. **Savage E. B., Matthaei G. L.** — IEEE Trans., 1981, v. SU-28, № 6.
14. **Kodama T.** — IEEE Trans., 1983, v. SU-30, № 3.
15. **Milson R. F., Murray R. J., Redwood M.** — Electron. Lett., 1981, № 2.
16. **Дъелесан Э., Руайе Д.** Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов: Пер. с франц. / Под ред. В. В. Леманова. — М.: Наука, 1982.
17. **Penavaire L., Seguinnes D.** — Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1980.
18. **Yamasaki O., Mitsuyu T., Wasa K.** — IEEE Trans., 1980, v. SU-27, № 6.
19. **Almar R., Lewis B., Paige E. G. S.** — IEEE Trans., 1983, v. SU-30, № 1.
20. Пат. 4030050 (США), МКИ Н03Н 9/04.
21. **Tansky W.** — Appl. Phys. Lett., 1981, v. 39, № 1.