

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«РОСТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Глушанин С.В.
Тополов В.Ю.
Панич А.Е.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**“Приборы и компоненты акустоэлектроники.
Методы возбуждения и приёма поверхностных
акустических волн. Встречно-штыревой
преобразователь”**

*для студентов дневного отделения
факультета высоких технологий*

Ростов-на-Дону
2006

Авторы :

Глушанин С.В., старший научный сотрудник проблемной лаборатории перспективных технологий и процессов Центра исследования проблем безопасности Российской академии наук при Южно-Российском государственном университете экономики и сервиса, аспирант кафедры физики полупроводников физического факультета Ростовского государственного университета (2002 – 2005 г.г.)

Тополов В.Ю., профессор кафедры физики полупроводников физического факультета Ростовского государственного университета

Панич А.Е., директор-главный конструктор НКТБ «Пьезоприбор», декан факультета высоких технологий Ростовского государственного университета

ВВЕДЕНИЕ

В 1885 г. лорд Рэлей (Дж. Стретт) впервые показал, что вдоль плоской свободной границы изотропного твердого полупространства могут распространяться упругие поверхностные волны, амплитуда которых быстро уменьшается с глубиной. Такие волны, названные впоследствии рэлеевскими, стали интенсивно изучаться и использоваться в различных приложениях. Например, в диапазоне $\sim (1 \dots 100)$ Гц они использовались в сейсмологии и сейсморазведке. Это связано с тем, что рэлеевские волны являются основным типом волн, наблюдающихся при землетрясениях, так как при распространении по поверхности рэлеевские волны затухают с расстоянием медленнее, чем объемные волны.

В 50-х годах прошлого века рэлеевские волны ультразвукового диапазона с частотами $\sim 10^6$ Гц стали интенсивно использоваться в устройствах всестороннего неразрушающего контроля поверхности и поверхностного слоя образцов и материалов, например, при определении дефектов, степени и глубины термической закалки, остаточных механических напряжений, качества обработки поверхности различных твердотельных материалов и т.д. Скорость, затухание и структура рэлеевской волны неразрывно связаны с физико-механическими характеристиками поверхностного слоя образца, в котором она распространяется. Поэтому по скорости и затуханию рэлеевской волны можно получать информацию о состоянии поверхностного слоя твердотельного материала. Впоследствии применение рэлеевских волн в ультразвуковой дефектоскопии сделало ультразвуковой контроль универсальным, т.е. применимым для деталей и заготовок любой формы.

В 60 – 70-х годах прошлого века рэлеевские волны с частотами $\sim (10^7 \dots 10^9)$ Гц нашли применение в миниатюрных твердотельных устройствах (ультразвуковые линии задержки, полосовые фильтры, ответвители сигналов, конвольверы, фазовращатели и т. д.). Применение рэлеевских волн в таких устройствах вызвано следующими тремя особенностями данных волн:

- 1) возможностью «вывести» звуковой сигнал из любой точки поверхности образца, по которому распространяется волна;

2) удачным сочетанием поверхностной локализации волны с планарностью современных устройств твердотельной электроники;

3) относительно большой концентрацией энергии в волне вследствие малости слоя локализации волны.

Рэлеевские волны также широко используются в чисто физических экспериментах как эффективный инструмент для изучения свойств поверхности и поверхностного слоя твердого тела, включая его «электрические» характеристики. Среди них, например, электронные поверхностные состояния в полупроводниковом кристалле.

Высокочастотные поверхностные акустические волны (ПАВ) и в первую очередь рэлеевские волны способствовали появлению пьезоакустоэлектроники на стыке высокочастотной акустики и электроники твердого тела. Пьезоакустоэлектроника изучает процессы и явления, связанные с возбуждением, распространением и приемом ультра- и гиперзвуковых волн различных типов в твердых телах и их взаимодействием с электронами проводимости в кристаллах. В техническом плане без знания пьезоакустоэлектроники невозможно создание новых типов миниатюрных твердотельных приборов и внедрение новых способов обработки информации. Основу акустоэлектроники составляют ПАВ с частотами ($10^6 \dots 10^{10}$) Гц.

Целью настоящих методических указаний является описание способов возбуждения ПАВ рэлеевского типа, а также изучение характеристик одного из основных элементов современных пьезоакустоэлектрических устройств – встречно-штыревого преобразователя (ВШП).

1. МЕТОДЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Как известно, ПАВ подразделяются на два класса – волны с вертикальной поляризацией (вектор смещения частиц среды и направление распространения волны лежат в плоскости, перпендикулярной к границе

раздела) и волны с горизонтальной поляризацией (вектор смещения частиц среды параллелен плоскости границы и перпендикулярен направлению распространения волны). Рэлеевские волны являются основным и наиболее широко используемым на практике типом ПАВ с вертикальной поляризацией. Для возбуждения ультразвуковых рэлеевских волн существует целый ряд методов. Следует отметить, что методы возбуждения, описываемые в данном разделе, можно обратить и на случай приёма.

Например, пластинка кварца X-среза, опирающаяся на ребро прямоугольного упругого клина (рис. 1, а), возбуждает на его гранях так называемые слабые поверхностные волны. Наилучшее возбуждение получается, если развитые грани пластинки наклонены под углом 45° к плоскостям клина. Возбуждение рэлеевских волн можно также проводить пластинкой Y-среза, имеющей акустический контакт с поверхностью твёрдого тела посредством тонкого слоя масла (рис. 1, б). Такая пластинка возбуждает две рэлеевские волны, бегущие в отрицательном и положительном направлениях оси OX с одинаковыми амплитудами. Амплитуды максимальны при отношении ширины $2a$ пластинки к толщине d , равном $7 : 1$. При этом основная доля механической энергии пластинки расходуется на излучение поперечных ультразвуковых волн в объём образца.

Для возбуждения рэлеевских волн можно использовать бесконтактный магнитный метод, основанный на магнитоакустическом эффекте. В этом методе электрический сигнал звуковой частоты подаётся на специальную магнитную катушку, расположенную у поверхности образца и наводящую на ней периодические в пространстве вихревые токи. Для этого следует использовать металлический образец или на поверхность образца должна быть нанесена металлическая плёнка. Взаимодействие вихревых токов с магнитным полем катушки приводит к колебаниям поверхности и возбуждению рэлеевской волны.

Наиболее распространённым методом возбуждения рэлеевских волн является так называемый метод клина, основанный на преобразовании продольных волн в рэлеевские. В этом методе (рис. 1, в) пластмассовая призма вдоль одной своей грани имеет акустический контакт с поверхностью

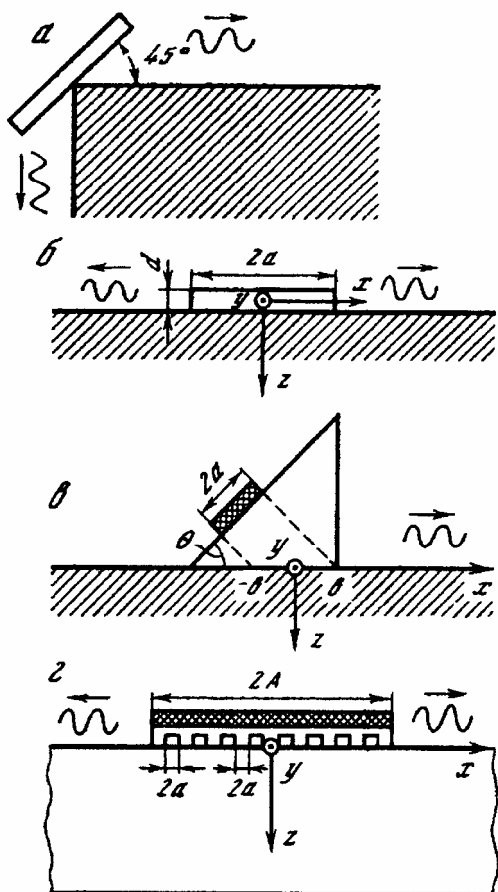


Рис. 1. Методы возбуждения и приёма ультразвуковых рэлеевских волн: а – с ребра клина; б – кварцевой пластинкой Y-среза; в – клином; г – гребенчатой структурой [2].

твёрдого тела. На наклонной грани призмы располагается пьезоэлектрическая пластинка, излучающая плоскую продольную волну, которая падает под углом θ_R на границу твёрдого тела с призмой. Угол θ_R выбирается из условия оптимального возбуждения $\sin \theta_R = v_{\text{кл}} / v_R$, где $v_{\text{кл}}$ – скорость продольных волн в материале клина, а v_R – скорость рэлеевских волн в образце. Очевидно, материал призмы должен обеспечивать выполнение неравенства $v_{\text{кл}} < v_R$, поэтому призма обычно делается из пластмассы. При этом на границе твёрдого тела и призмы создаётся периодическое возмущение с пространственным периодом, равным длине рэлеевской волны в образце. Поскольку угол $\theta_R = \arcsin (v_{\text{кл}} / v_R)$ больше угла полного внутреннего отражения как для продольной, так и для поперечной

волн, прошедшие в образец волны являются однородными и возмущение затухает с глубиной. Это возмущение возбуждает рэлеевскую волну, распространяющуюся по поверхности образца в направлении положительной оси OX . Наилучшее возбуждение получается тогда, когда проекция ребра призмы на наклонную грань совпадает с передним краем пьезопластинки, как показано на рис. 1, в. В методе клина возбуждается практически только одна рэлеевская волна, причем уровень возбуждаемых объёмных волн лежит на (20 ... 30) дБ ниже. В настоящее время метод клина распространяется на высокие частоты в интервале (10 ... 60) МГц.

В 1958 г. А.Г. Соколинским предложен метод возбуждения рэлеевских волн гребенчатой структурой, создающей на поверхности твёрдого тела (подобно клину) периодическую совокупность нормальных возмущений с пространственным периодом, равным длине рэлеевской волны λ_R (при отличии пространственного периода от λ_R возбуждение менее эффективно). Такая структура проще всего может быть выполнена в виде металлической пластинки гребенчатого профиля с периодическим чередованием выступов и пазов шириной $\lambda_R / 2$ (рис. 1, г) и пластинки кварца X-среза, лежащей на ней. Гребенчатой структурой можно весьма эффективно возбуждать рэлеевские волны в образце из любого материала, достаточно только сделать её пространственный период равным λ_R . Прецизионное изготовление гребенчатых структур позволяет применять этот метод для возбуждения и приёма рэлеевских волн и на высоких частотах (~ 100 МГц и выше). Недостатком метода гребенчатой структуры является высокий уровень паразитных сигналов, связанных с излучением структурой объёмных волн.

Отметим также ещё один способ возбуждения рэлеевских волн, представляющий практическую ценность в области высоких частот. Луч от мощного лазера проходит через решётку, состоящую из прозрачных и непрозрачных полос и создаёт на поверхности кристаллического образца периодическое чередование освещённости, которое из-за теплового эффекта приводит к появлению периодических механических напряжений, генерирующих рэлеевскую волну. В этом случае мы имеем дело с разновидностью метода гребенчатой структуры.

Отдельного описания требует ещё один важный с практической точки зрения метод возбуждения ПАВ – возбуждение металлическими

электродами. Возбуждение ПАВ гребенчатыми металлическими электродами за счет собственного пьезоэффекта среды позволяет получить поверхностные акустические волны с частотой ($10^9 \dots 10^{10}$) Гц. Идея данного метода возбуждения (приема) ПАВ заключается в следующем. На плоскую хорошо обработанную поверхность пьезоэлектрического кристалла наносится двухфазная система периодических гребенчатых металлических электродов, к которым подводится переменное электрическое напряжение круговой частоты ω (рис. 2). Вследствие пьезоэффекта это напряжение создает периодическую совокупность механических возмущений на поверхности и в поверхностном слое кристалла. Механические возмущения, как и в методе гребенчатой структуры, возбуждают поверхностную волну.

Данный метод возбуждения имеет целый ряд существенных преимуществ. Во-первых, для возбуждения волны не требуется механического (акустического) контакта пьезопреобразователя с образцом. Эта особенность, а также развитие технологии нанесения металлических электродов позволяют в настоящее время возбуждать и принимать ПАВ рекордно высоких частот, вплоть до 10^{10} Гц. Во-вторых, применяя неэквидистантную систему электродов, а также электроды переменной длины (т.е. проводя так называемую аподизацию), можно получать амплитудно-частотные характеристики электродных преобразователей прак-

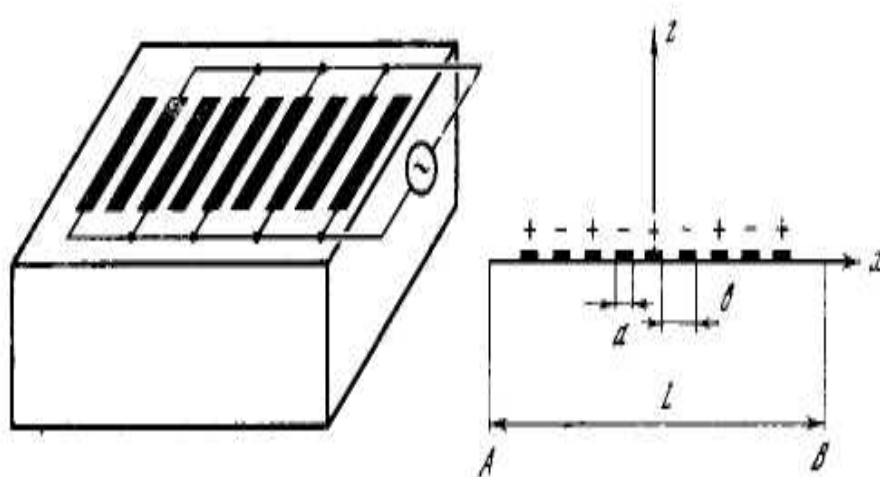


Рис. 2. Гребенчатый электродный преобразователь поверхностных волн [2].

тически любой формы, что очень важно для различных приложений. В-третьих, несколько видоизменяя метод и усложняя технологию изготовления преобразователя, можно возбуждать и принимать поверхностные волны и в пьезопассивных образцах. Для этого на поверхность такого образца наносится тонкая пьезоэлектрическая пленка, а металлические электроды делаются над или под этой пленкой. Совершенствование данного метода возбуждения и приёма ПАВ позволило создать множество пьезоакустоэлектронных приборов для обработки информации, нашедших в настоящее время широкое техническое применение. К ним относятся ультразвуковые линии задержки и фильтры, усилители электрических сигналов, корреляторы, кодирующие и декодирующие устройства, фазовращатели и пр.

2. ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

В настоящее время в устройствах на ПАВ для приёма и возбуждения акустических волн используют, в основном, электродные типы преобразователей (рис. 3). При этом на рабочей поверхности пьезоэлектрического кристалла создаётся жёстко соединённая с этой поверхностью решётка штырей из проводящего материала.

ВШП – это акустоэлектронное устройство, предназначенное для преобразования электромагнитных волн в ПАВ и наоборот. ВШП состоит из двух групп металлических электродов (штырей), вложенных навстречу друг другу и расположенных на поверхности пьезоактивного звукопровода. ВШП впервые подробно описан Уайтом и Волтмером в 1965 году.

Технология нанесения штырей на поверхность пьезоактивного материала обычно основывается на фотолитографических методах. Место расположения электродов вначале покрывается тонкой металлической плёнкой (например, путём вакуумного напыления) чаще всего из алюминия или золота. Затем на плёнку наносится фоторезист, на который через фотомаску экспонируется рельеф электродов. После этого в результате

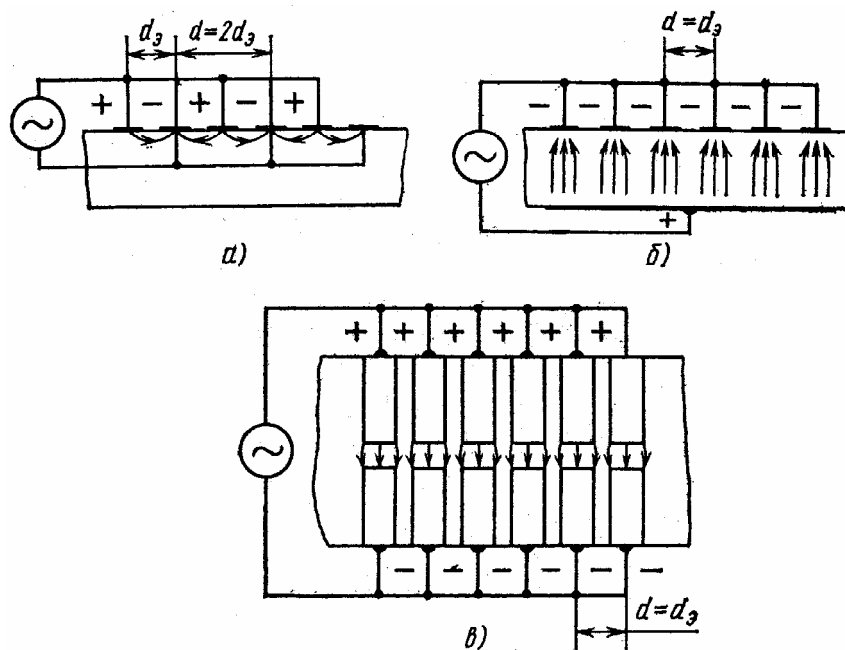


Рис. 3. Основные типы электродных преобразователей ПАВ: а – встречно-штыревой; б – однофазный; в – торцевой [1].

травления получается требуемая структура. С помощью оптических методов засветки фоторезиста удаётся получить минимальную ширину штырей ~ 1 мкм (ограничение за счёт дифракционных искажений), что соответствует основной рабочей частоте преобразователей $\sim (1 \dots 2)$ ГГц. Для изготовления более преобразователей, работающих в области более высоких частот, необходимо использовать методы электронной или рентгеновской литографии.

Как видно из рис. 3, решётчатые преобразователи подобны антенным решёткам. Эта аналогия свойственна и принципу их действия. Так, решётчатый преобразователь ПАВ наиболее эффективно работает тогда, когда ПАВ, возбуждаемые отдельными электродами преобразователя, складываются синфазно.

Наиболее часто применяют эквидистантные электродные преобразователи. При этом межэлектродные расстояния по длине всего преобразователя остаются одинаковыми и равными d_3 . На так называемой частоте акустоэлектрического синхронизма ω_a , при которой длина ПАВ λ

равна периоду решётки d , ПАВ, возбуждаемые отдельными электродами, складываются синфазно и преобразователь работает наиболее эффективно. Эта частота определяется скоростью распространения поверхностной волны v и пространственным периодом решётки d :

$$\omega_a = 2\pi v / d. \quad (1)$$

Синфазное или близкое к нему сложение поверхностных акустических волн и, следовательно, эффективная работа преобразователя возможны только в некоторой полосе частот вблизи ω_a . Ширина этой полосы обратно пропорциональна количеству электродов в преобразователе. Следствием решётчатой структуры преобразователей является также то, что в отсутствие дисперсии чётные гармоники основной ПАВ складываются противофазно и не распространяются по поверхности пьезопластины.

Как следует из формулы (1), при одном и том же межэлектродном расстоянии d , частота акустоэлектрического синхронизма у однофазного (рис. 3, б) и торцевого (рис. 3, в) преобразователей в 2 раза выше, чем у ВШП (рис. 3, а). Однако ВШП имеет значительно большую эффективность акустического преобразования и меньший уровень возбуждения паразитных объёмных волн. Поэтому однофазный и торцевой преобразователи используются в основном лишь в диапазоне частот свыше 1 ГГц, где возрастающие требования к качеству изготовления электродных схем затрудняют применение ВШП. На более низких частотах в большинстве случаев применяются ВШП.

Для обеспечения полного преобразования мощности электрического сигнала, поступающего от генератора, в мощность излучаемых акустических волн, необходимо осуществить электрическое согласование ВШП с внутренним сопротивлением R_z , в роли которого обычно выступает коаксиальная линия передач с волновым сопротивлением 50 Ом.

Возбуждённые преобразователем ПАВ распространяются перпендикулярно штырям в двух противоположных направлениях (рис. 4). Это является следствием симметрии штырей. Свойство двунаправленности является нежелательным, если подобные преобразователи используются, например, в линиях задержки ПАВ. В этом случае двунаправленность

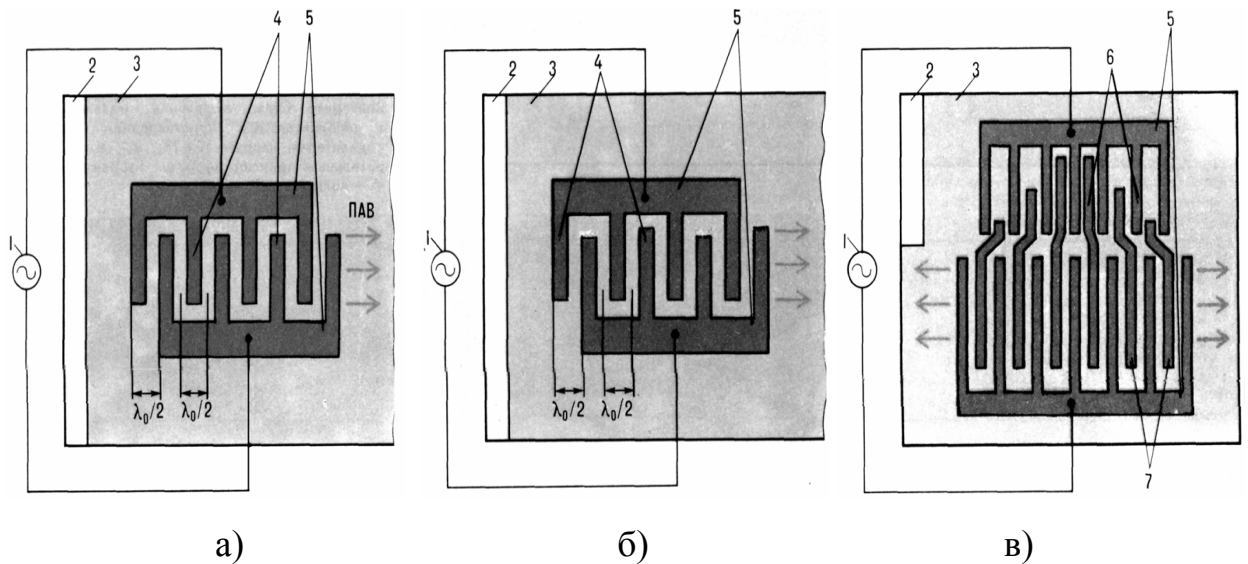


Рис. 4. Схематическое изображение двунаправленного ВШП: а – неаподизованного; б – аподизованного; в – с емкостным «взвешиванием» электродов. 1 – источник переменного электрического сигнала, 2 – поглотитель ПАВ, 3 – звукопровод, 4 – металлические электроды, 5 – контактные площадки, 6 – часть преобразователя, осуществляющая модуляцию амплитуды ПАВ, 7 – часть преобразователя, генерирующая ПАВ, λ_0 – длина ПАВ. Стрелками указано направление распространения ПАВ [4].

преобразователей ведет к существенному увеличению потерь линии задержки и необходимости применения специальных мер по подавлению влияния излучения преобразователей в нежелательном направлении. Двунаправленность излучения не ухудшает характеристик излучения преобразователя, используемого в резонаторе на ПАВ. Это объясняется тем, что в резонаторах с одинаковой эффективностью используется как прямое, так и обратное возбуждение волн преобразователями ПАВ. Для подавления помех, вносимых ПАВ, отражёнными от края звукопровода, на его поверхности вблизи этого края создаются поглотители ПАВ.

Однонаправленное распространение ПАВ (рис. 5) достигается включением двух ВШП через фазосдвигающее устройство (которое обеспечивает сдвиг фаз на 90°) на расстоянии $(n + 1/4) \lambda_0$, где n – целое число. Такую конструкцию называют однонаправленным ВШП. В этом ВШП на частоте акустического синхронизма происходит сложение по фазе ПАВ,

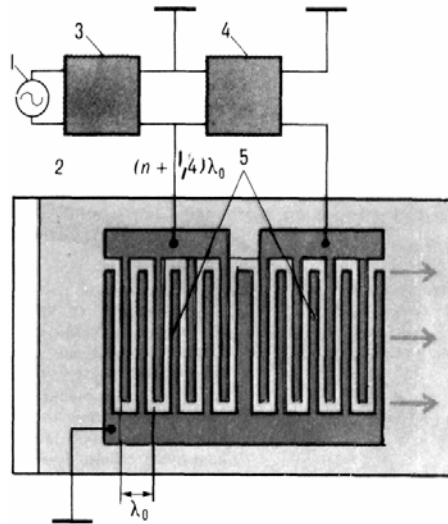


Рис. 5. Схематическое изображение однонаправленного ВШП: 1 – источник переменного электрического сигнала, 2 – звукопровод, 3 – согласующее устройство, 4 – фазосдвигающее устройство, 5 – двунаправленный ВШП, n – целое число, λ_0 – длина ПАВ. Стрелками указано направление распространения ПАВ [4].

возбуждённых двунаправленными ВШП и распространяющихся в одном направлении, и взаимное гашение ПАВ, распространяющихся в противоположных направлениях.

Использование ВШП для создания акустоэлектронных устройств (например, полосовых фильтров) ограничено. Это связано с тем, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), имеющая вид $(\sin x) / x$, где $x = \pi N (f - f_0) / f_0$, а N – количество пар электродов в преобразователе, для большинства практических применений имеет неудовлетворительную форму. Для получения ВШП с заданной АЧХ используют при его изготовлении так называемые методы взвешивания, суть которых заключается в том, что интенсивность ПАВ, возбуждаемых каждой парой электродов, меняется в соответствии с заданной функцией (функцией «взвешивания»). Наиболее распространённым является ВШП, созданный на основе метода взвешивания, называемый аподизацией, который заключается в изменении перекрытия каждой пары электродов в соответствии с заданной функцией «взвешивания» (рис. 4, б). таком ВШП (по сути аподизованном преобразователе) каждая пара электродов генерирует ПАВ с одинаковой

амплитудой, но с различной шириной акустического луча. Основным недостатком аподизованного ВШП является дифракционная расходимость ПАВ, генерируемых электродами с малым перекрытием (порядка длины ПАВ). Среди аподизованных преобразователей выделяют ВШП, изготовленные на основе методов непосредственного взвешивания, в которых получение заданной АЧХ обеспечивают, например, созданием емкостей между контактными площадками ВШП и его электродами (рис. 4, в). Такой ВШП состоит из двух частей (секций), одна из которых генерирует ПАВ, а другая осуществляет модуляцию их амплитуды в соответствии с функцией взвешивания.

Если пренебречь влиянием конечной ширины штырей, то частотную характеристику периодического ВШП можно представить как характеристику эквидистантной антенной решетки. Очевидно, что количество N элементов решетки при этом соответствует числу пар штырей. Относительная полоса пропускания по уровню 3 дБ при этом определяется выражением $2\Delta\omega / \omega_a \approx 1 / N$, а добротность $Q_{ак} \approx N$. Оптимальное число пар электродов $N_{опт}$, которое обеспечивает максимальную полосу эффективной работы согласованного ВШП в выбранном направлении и материале, оценивается по формуле $N_{опт} \approx \sqrt{\pi / 4k_{yi}^2}$, где k_{yi} - коэффициент электромеханической связи. Например, для возбуждения ПАВ в направлении ХУ-среза кристаллического кварца квадрат коэффициента электромеханической связи $k_{yi}^2 \approx 0,0018$ и оптимальное число пар электродов $N_{опт} \approx 18$, а для направления YZ-среза кристалла ниобата лития (YZ – LiNbO₃) $k_{yi}^2 \approx 0,05$ и $N_{опт} \approx 4$.

Отметим, что величина N определяет не только значение полосы пропускания ВШП, но и влияет на условие электрического согласования. Поэтому после определения $N_{опт}$ необходимо обеспечить выполнение равенства между сопротивлением излучению и внутреннего сопротивления генератора с помощью выбора длины электродов b . В частности, для рассмотренного выше случая кристаллического кварца соответствующее значение длины $b_{опт} \approx 19 \lambda$, а для YZ-среза LiNbO₃ это же значение равно $b_{опт} \approx 108 \lambda$. Чрезмерное уменьшение длины электродов b нежелательно, так как это приводит к уменьшению прожекторной зоны и к увеличению дифракционной расходимости возбуждаемой ПАВ. Такая ситуация может

иметь место в случае очень слабых пьезоэлектриков, например, для кристалла окиси бериллия (расчетные значения для этого кристалла $N_{\text{опт}} \approx 256$ и $b_{\text{опт}} \approx \lambda$). Чтобы избежать таких нежелательных явлений, в ряде случаев приходится прибегать к использованию согласующего трансформатора.

Следует напомнить, что все приведенные выше соотношения являются приближенными. Особенно это относится к сильным пьезоэлектрикам, в которых существенную роль играют взаимное влияние электродов, переизлучение и рассеяние энергии.

2. ПОДХОДЫ К ОПИСАНИЮ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Теоретическое описание возбуждения ПАВ металлическими электродами может основываться на различных физических представлениях, схемах и подходах.

Первый и наиболее простой подход связан с использованием модельного представления распределения заряда на электродах в виде δ -функций. Такое представление позволяет описать наиболее характерные частотные свойства электродных преобразователей на кристалле с малым коэффициентом электромеханической связи. В силу своей простоты данный подход эффективен при синтезе фильтров с заданными частотными характеристиками. К его недостаткам относится слабая теоретическая обоснованность и принципиальная невозможность учесть эффекты второго порядка (например, переотражение волн электродами).

Второй подход связан с использованием эквивалентных электрических схем типа схемы Мэсона или ее модификаций. В этом случае каждая секция ВШП представляется эквивалентной электрической схемой Мэсона (рис. 6), на которой первый (1 – 1') и второй (2 – 2') входы являются акустическими, а третий (3 – 3') – электрическим. Со стороны акустических входов данная схема является аналогом длинной линии с характеристическим сопротивле-

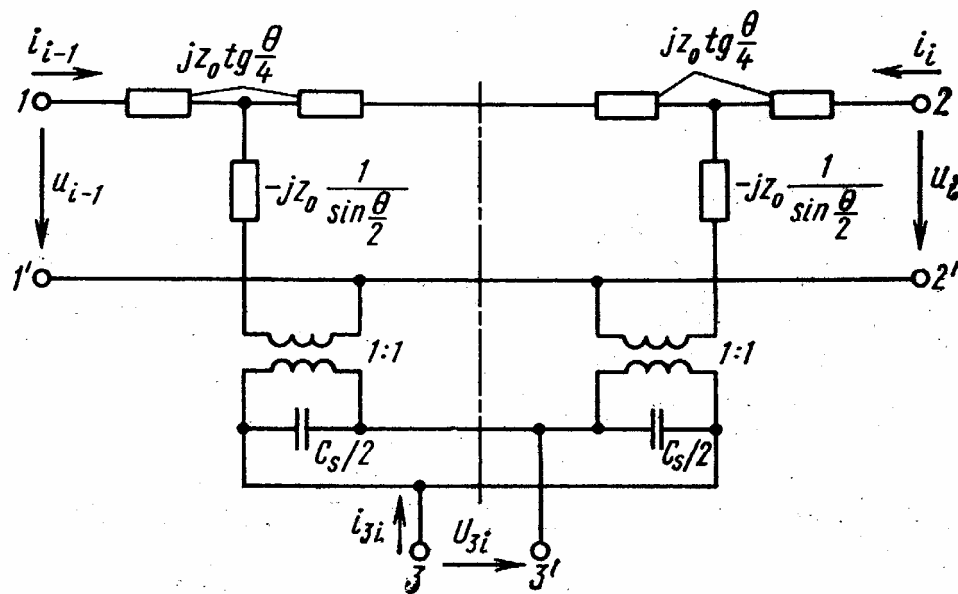


Рис. 6. Эквивалентная электрическая схема Мэсона для одной секции ВШП [1].

нием z_0 и фазовым углом θ , где ω – частота сигнала, ω_a – частота распространяющейся поверхностной волны.

Эффект преобразования электромагнитной энергии в энергию ПАВ отражается в эквивалентной схеме идеальный трансформатор. Напряжение u_i на i -м акустическом входе является электрическим аналогом акустической силы F_i поверхностной волны, а ток i_i – электрическим эквивалентом скорости частиц среды V_c . Указанные величины связаны следующим образом:

$$u_i = F_i / \Phi; \quad i_i = V_c \Phi, \quad (2)$$

где $\Phi = h C_s / 2$ выражается через пьезоконстанту h материала подложки и статическую ёмкость секции преобразователя C_s . Произведение тока и напряжения на акустических входах характеризует мощность акустической волны, а отношение напряжения к току – электрический эквивалент механического сопротивления упругой среды z_0 .

Эквивалентную электрическую схему преобразователя, состоящего из N пар электродов, можно получить из N эквивалентных электрических схем отдельных секций (рис. 6), соединяя их акустические входы последовательно, а электрические – параллельно (рис. 7).

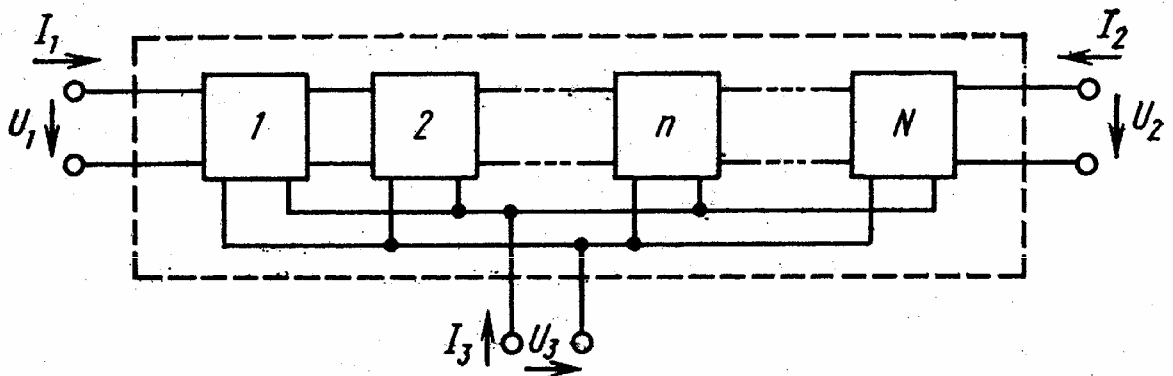


Рис. 7. Эквивалентная схема ВШП [1].

Эта эквивалентная схема описывается матрицей Y -параметров, которая имеет вид

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{12} & Y_{11} & -Y_{13} \\ Y_{13} & -Y_{13} & Y_{33} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $Y_{11} = -j G_0 \operatorname{ctg}(N \theta)$, $Y_{12} = j G_0 / \sin(N \theta)$, $Y_{13} = -j G_0 \operatorname{tg}(\theta / 4)$ и $Y_{33} = j \omega C_T + j \cdot 4G_0 \operatorname{tg}(\theta / 4)$, $j = \sqrt{-1}$, $G_0 = 1 / z_0$, C_T - статическая ёмкость преобразователя, θ - фазовый угол.

Полученные выражения Y -параметров позволяют определить характеристики ВШП со стороны электрического входа, например, его входную проводимость. Рассмотрим ВШП, излучающий ПАВ в бесконечную акустическую среду. Это соответствует подключению к акустическим входам преобразователя на схеме (рис. 8) электрического эквивалента механического сопротивления упругой среды z_0 .

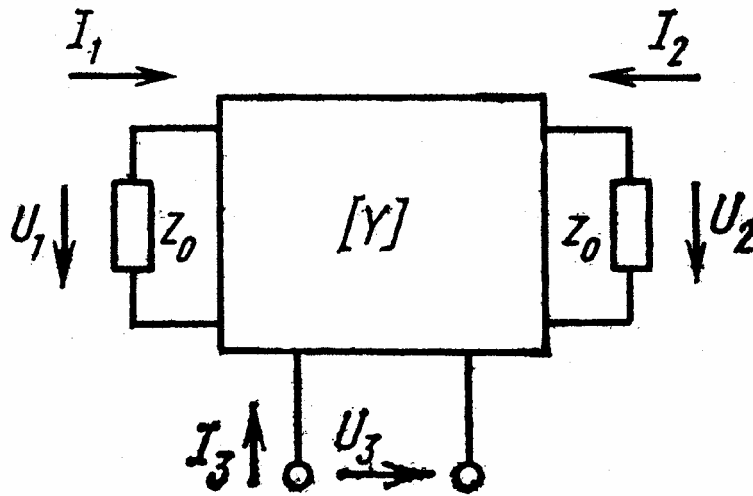


Рис. 8. Эквивалентная схема ВШП, излучающего в бесконечно протяженную акустическую среду [1].

Используя матрицу (3) и схему рис. 8, определим входную проводимость ВШП как

$$Y_{\text{вх}} = j \omega C_T + j b_a(\omega) + G_a(\omega), \quad (4)$$

где $G_a(\omega) = 2 G_0 [\text{tg}(\theta / 4) \sin(N \theta / 2)]^2 \approx G [(\sin x) / x]^2$ – активная составляющая проводимости излучения,

$b_a(\omega) = 2 G_0 \text{tg}(\theta / 4) [4 N + \text{tg}(\theta / 4) \sin(N \theta)] \approx G (\sin(2x) - 2x) / (2 x^2)$ – реактивная составляющая проводимости излучения,

$G = (4 / \pi) k^2 \omega_a C_s N^2$ – значение G_a на частоте акустической волны ω_a ,

$x = N\pi (\omega - \omega_a) / \omega_a$,

k – коэффициент электромеханической связи в выбранном кристаллографическом направлении.

Приближения в выражениях $G_a(\omega)$ и $b_a(\omega)$ справедливы лишь вблизи ω_a в полосе частот, удовлетворяющих условию $|\omega - \omega_a| < 0,2 \omega_a$. Частотные зависимости активной и реактивной составляющих проводимостей излучения преобразователя для двух значений N приведены на рис. 9.

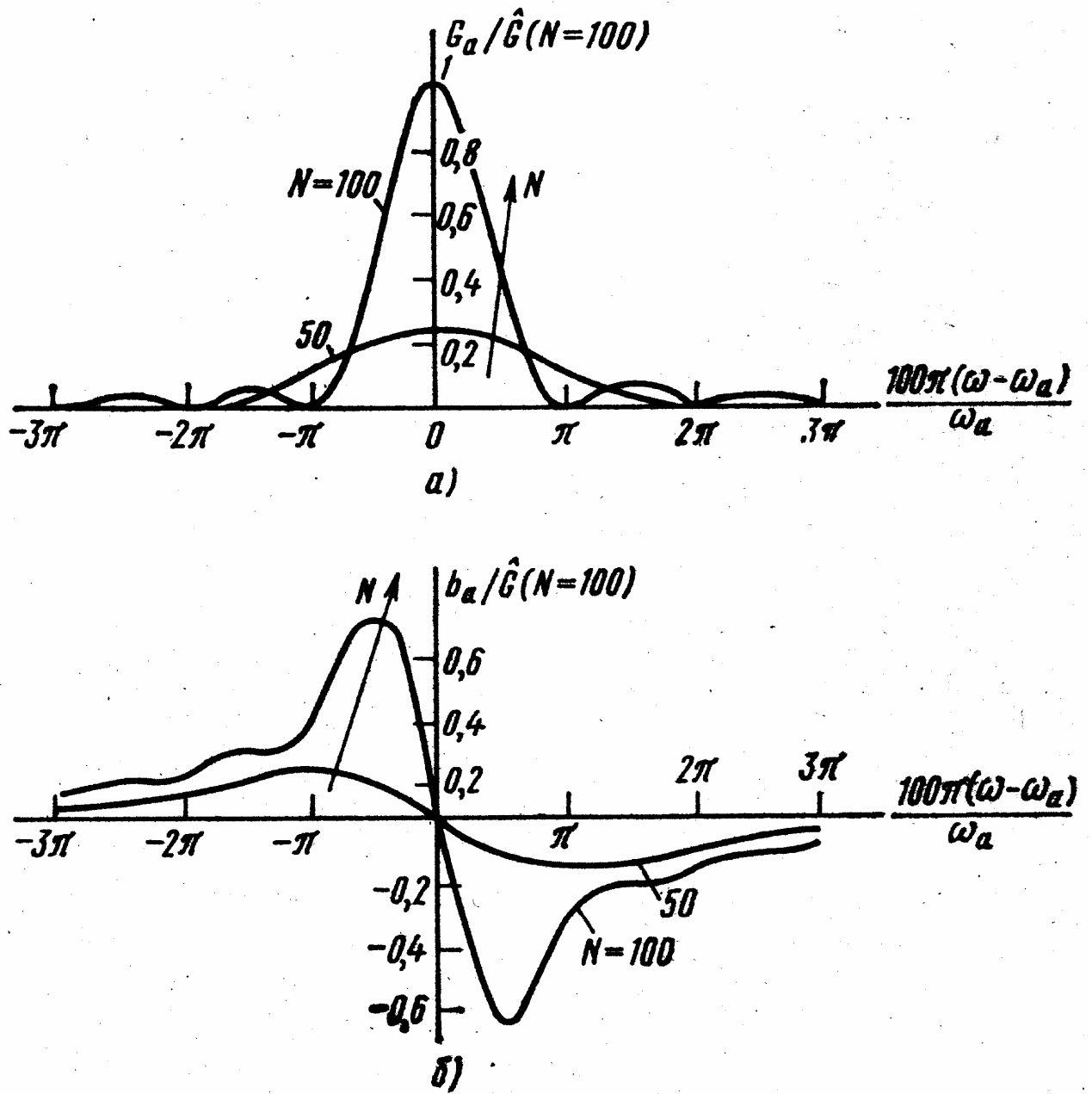


Рис. 9. Зависимости активной G_a (а) и реактивной b_a (б) составляющих проводимостей излучения ВШП от частоты [1].

Следует отметить, что эквивалентная схема Мэзона (рис. 6) не учитывает разницы в скоростях распространения ПАВ на свободной и металлизированной поверхностях пьезоэлектрика при прохождении волны вдоль ВШП и, следовательно, не учитывает влияния, связанного с отражением ПАВ от граней штырей преобразователя. Влияние этих отражений возрастает с увеличением количества пар электродов в преобразователе, и при большом их числе амплитудно- и фазочастотная характеристики преобразователя значительно искажаются. Кроме того, следует помнить, что используемая модель ВШП основана на грубой (поперечной) аппроксимации реальных электрических полей в преобразователе и поэтому мало пригодна для описания работы преобразователя на обертонах частоты ω_a .

Схема Мэзона была введена для описания упругих колебаний в образцах, где имеется система плоских стоячих объёмных волн (т.е. присутствует одномерное распределение упругого и электрического полей). Поэтому при использовании схемы Мэзона для расчета существенно двумерных электродных преобразователей ПАВ сразу же возникают принципиальные ограничения, которые не устраняются практически никакими модификациями. Это является основным недостатком данного подхода.

Третий, более строгий и физический, чем первые два, подход связан с решением электрической и упругой задач для полупространства с системой металлических электродов по методу последовательных приближений. При строгой постановке задачи для возбуждающих электродов на поверхности полупространства должны быть заданы лишь разности потенциалов на них и их геометрия. Ни распределения электрического поля на поверхности кристалла, ни распределения зарядов (токов) на электродах невозможно задать. Эти поля, заряды и токи сами зависят от возбуждаемых ими упругих колебаний полупространства. Поэтому задача должна решаться как самосогласованная. В методе последовательных приближений сначала решается электрическая (упругая) задача без учета пьезоэффекта, а затем в первом приближении теории возмущений определяются характеристики упругого или электрического поля. Естественно, что получаемое решение приближенно и применимо только при малости коэффициента

электромеханической связи и при не очень большом количестве металлических электродов.

Наконец, четвертый, самый корректный в настоящее время подход связан с попыткой строгого решения задачи о возбуждении «кристаллического» полупространства системы металлических электродов. Здесь следует отметить два приема – использование функций Грина и построение точного решения электрической задачи с дальнейшим использованием для решения введенного Ингебригтсеном понятия поверхностного импеданса. В обоих случаях довольно длительная и сложная процедура решения приводит к интегральному или интегродифференциальному уравнению, решение которого в общем случае возможно только численными методами. Для ряда частных случаев (например, для узких по сравнению с длиной волны электродов) решение может быть получено в аналитической форме.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. На какие два класса подразделяются ПАВ?
2. Что такое рэлеевские волны? В каких частотных диапазонах они находят практическое применение?
3. Перечислите основные способы возбуждения ПАВ.
4. Дайте определение ВШП.
5. Какие подходы используются при описании физических свойств ВШП? Перечислите и кратко охарактеризуйте их.
6. Что такое аподизованный ВШП?
7. Возможно ли возбуждение ПАВ металлическими электродами в непьезоактивных средах?
8. Что такое эквидистантный ВШП?
9. Перечислите основные достоинства и недостатки метода возбуждения ПАВ металлическими электродами.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. – М.: Радио и связь, 1983. – 136 с.
2. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. – 287 с.
3. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1984. – 400 с.
4. Электроника: Энциклопедический словарь / Гл. ред. В.Г. Колесников. – М.: Сов. энциклопедия, 1991. – 688 с.