

Устройства функциональной электроники

Функциональная электроника

Функциональная электроника представляет собой

- раздел электроники, в которой изучается
 - возникновение и взаимодействие **динамических неоднородностей (ДН)**
 - в **континуальных средах (КС)**
 - под действием **физических полей**,

а также создаются приборы и устройства на основе динамических неоднородностей для целей обработки, генерации и хранения информации.

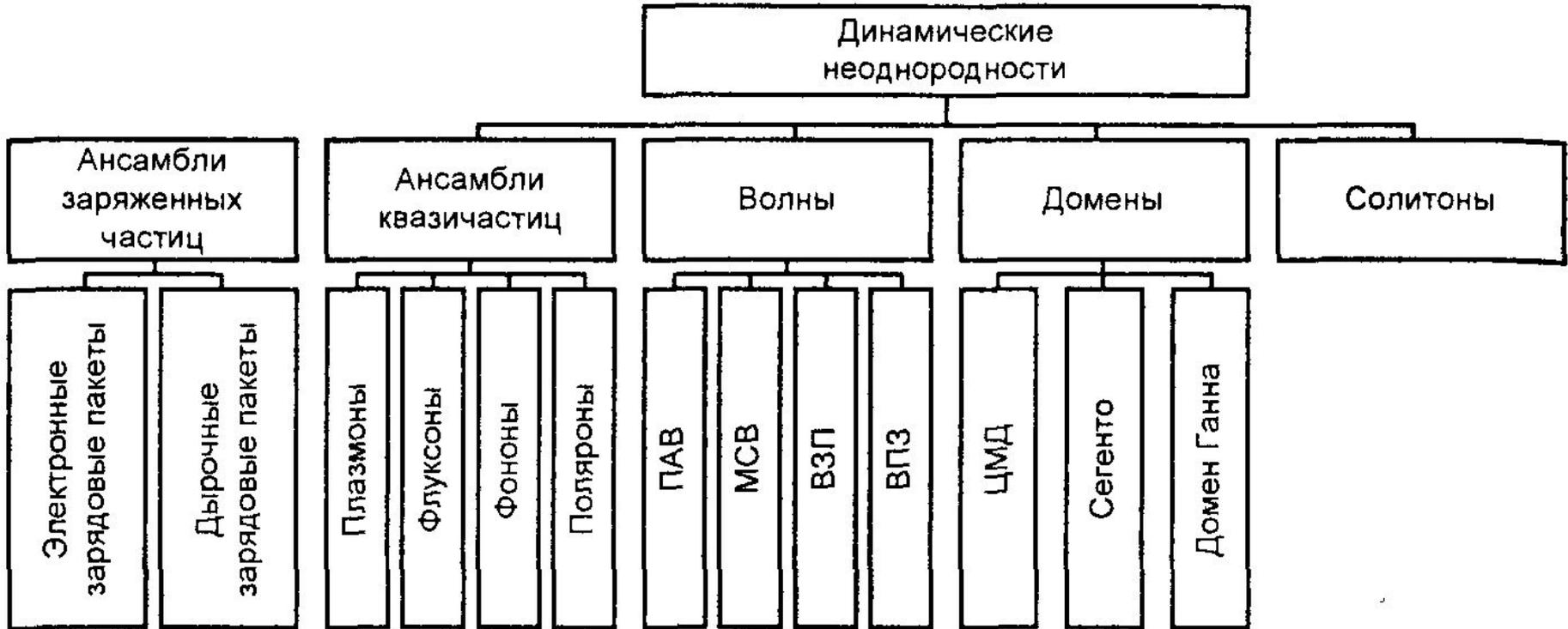
Динамическая неоднородность

Динамическая неоднородность представляет собой

- **локальный объем** на поверхности или внутри среды с **отличными от ее окружения свойствами**,
- не имеет внутри себя статических неоднородностей и
- генерируется в результате определенных физико-химических процессов.

Динамическая неоднородность может быть локализована или перемещаться по рабочему объему континуальной среды в результате взаимодействия с различными физическими полями или динамическими неоднородностями такой же или другой физической природы.

Динамические неоднородности





В функциональной электронике пока не существует принципиальных ограничений, связанных с размерами статических или динамических неоднородностей.

Сравним изделия традиционной схемотехнической и функциональной электроники по быстродействию.

- В изделиях **схемотехнической электроники** перенос информационного сигнала происходит побитово по линиям межсоединений, что снижает помехоустойчивость и надежность изделий.
- В изделиях **функциональной электроники** массив информационных сигналов может быть обработан одновременно весь, целиком, не обязательно в виде отдельных битов информации. Возможно создание устройства, позволяющего производить обработку информации в аналоговом и цифровом видах одновременно, поэтому в устройствах обработки информации на принципах функциональной электроники достигается производительность более 10^{15} операций в секунду.

Устройства ФЭ, использующие **один тип ДН в одной КС**, относятся к изделиям **функциональной электроники первого поколения**.

Если используются **два или более вида динамических неоднородностей** в разных средах, то такие изделия относятся ко **второму поколению**.

Модель устройства ФЭ

Модель устройства ФЭ состоит из 5 элементов:

1. **Динамическая неоднородность (ДН)** – вид динамической неоднородности и ее физическая природа
2. **Континуальная среда (КС)** – физико-химические свойства континуальной среды
3. **Генератор динамических неоднородностей (ГДН)**, предназначенный для ввода ДН в канал распространения, расположенный в континуальной среде
4. **Устройство управления динамическими неоднородностями (УУДН)** в тракте переноса информационного сигнала или в области его хранения
5. **Детектор динамической неоднородности (ДДН)**, предназначенный для вывода или считывания информации, позволяет преобразовать информационный массив, созданный динамическими неоднородностями в двоичный массив информации для устройств цифровой обработки информации

Функциональная акустоэлектроника

Функциональная акустоэлектроника является направлением функциональной электроники, в котором исследуются

- акустоэлектронные эффекты и явления
- в различных континуальных средах,

а также возможность создания приборов и устройств электронной техники для обработки, передачи и хранения информации с использованием динамических неоднородностей акустической и (или) акустоэлектронной, акустооптической природы.

К акустоэлектронным явлениям и эффектам относятся:

- генерация, распространение, преобразование и детектирование объемных (ОАВ) и поверхностных акустических волн (ПАВ);
- преобразование электрического сигнала в акустический и обратно;
- взаимодействие волн электронной плотности и акустических волн, электронное поглощение и усиление акустических волн;
- нелинейные акустоэлектронные явления: генерация гармоник, акустоэлектронные домены, параметрическое и супергетеродинное усиление звука;
- взаимодействие света и звука в твердых телах, дифракция, модуляция и сканирование света звуком.

Функциональная акустоэлектроника

1. Динамические неоднородности

В функциональной электронике используются динамические неоднородности

- акустической,
- акустоэлектронной,
- акустооптической природы.

В твердом теле могут возбуждаться **акустические волны**, представляющие собой **упругое возмущение вследствие деформации материала**. Такие деформации имеют место при движении отдельных атомов и сопряжены с изменением расстояний между ними. При этом возникают внутренние упругие силы, стремящиеся вернуть материал в исходное состояние.

Колебания атомов происходят вблизи положения равновесия, и при этом генерируется **волна механического напряжения и растяжения**.

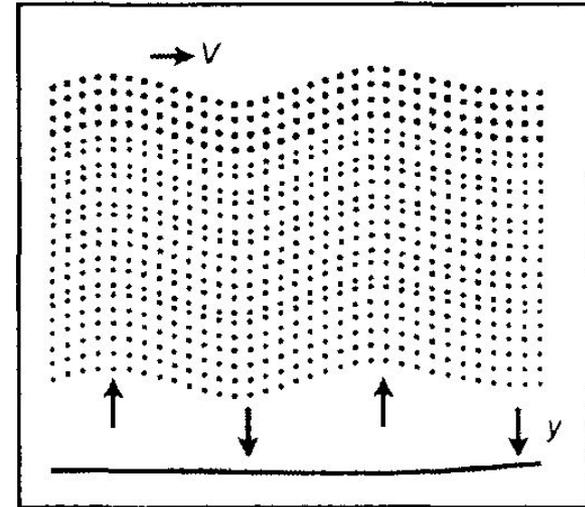
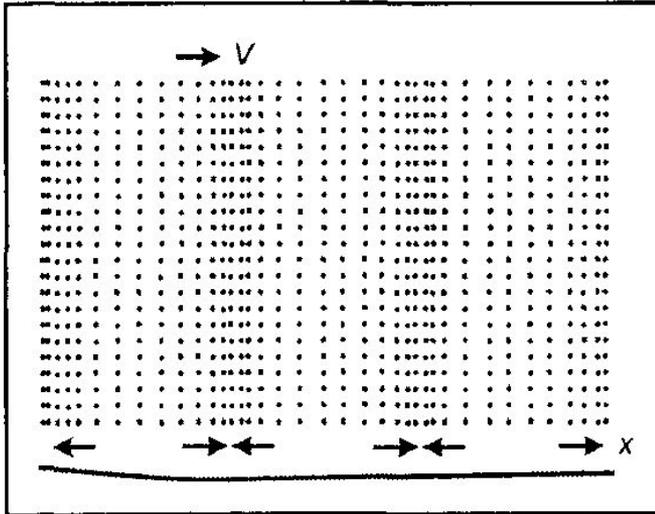
Скорость распространения акустической волны лежит в пределах $(1,5—4,0) \times 10^3$ м/с.

Диапазон частот акустических волн находится в интервале от нескольких герц до 10^{13} Гц, а их распространение сопровождается переносом энергии. Различают продольные и сдвиговые волны в зависимости от характера движения частиц (рис. 2.1).

Функциональная акустоэлектроника

1. Динамические неоднородности

Различают **продольные** и **сдвиговые** волны в зависимости от характера движения частиц.



В ограниченных средах на распространение волн существенное влияние оказывают граничные условия.

В однородной среде со свободной плоской поверхностью существуют **поверхностные акустические волны (ПАВ)**. По вектору поляризации волн ПАВ бывают двух типов:

- для **вертикальной поляризации** характерно расположение вектора колебательного смещения частицы среды в перпендикулярной границе плоскости;
- для **горизонтальной поляризации** вектор смещения частицы среды параллелен границе и перпендикулярен направлению распространения волн.

Функциональная акустоэлектроника

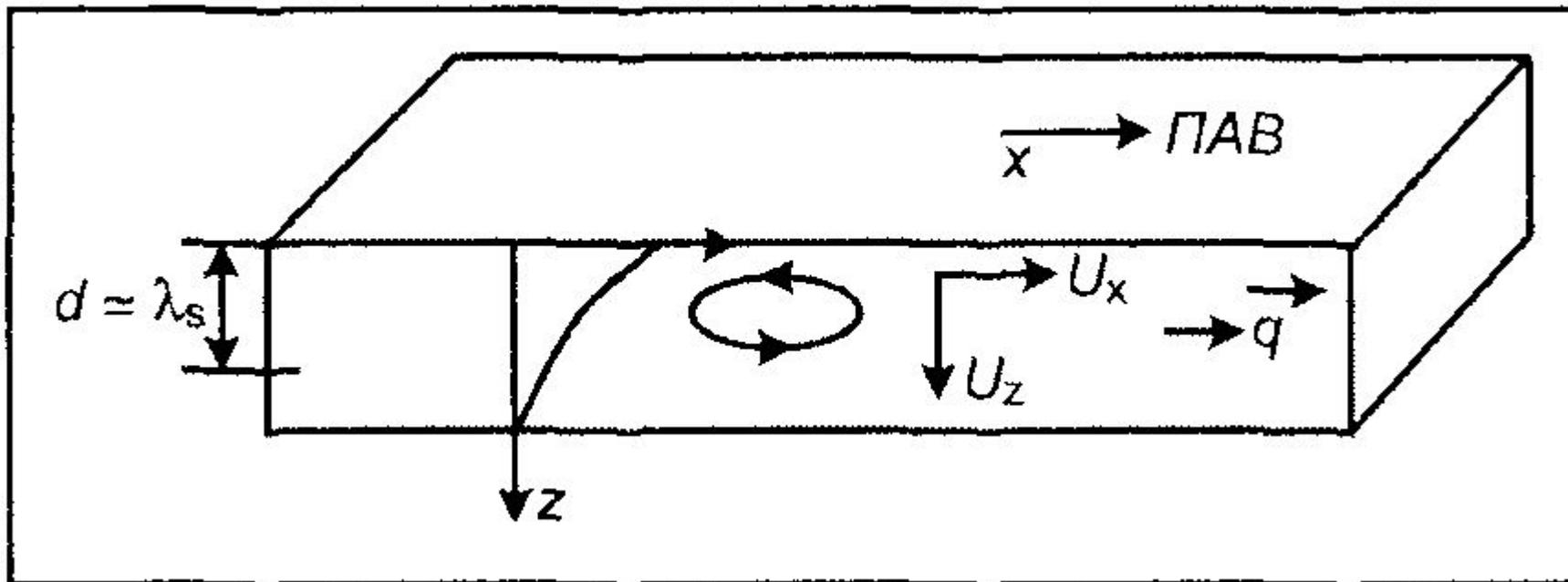
1. Динамические неоднородности

- **ПАВ** являются направленными волнами – их амплитуда экспоненциально убывает с глубиной.
- Поэтому ~90% переносимой энергии сосредоточено в слое глубиной не более одной длины волны.
- Доступность волнового фронта позволяет эффективно управлять распространением ПАВ на всем протяжении звукопровода.
- В устройствах на ПАВ используются УЗ-волны в диапазоне от 19 МГц до 10 ГГц.

Функциональная акустоэлектроника

1. Динамические неоднородности

Простейшим типом ПАВ являются волны с вертикальной поляризацией, распространяющиеся вдоль границы твердого тела с вакуумом **волны Рэлея**. Энергия рэлеевских волн локализована в приповерхностном слое звукопровода на глубине порядка длины волны. Волны Рэлея не обладают дисперсией, т. е. скорость их

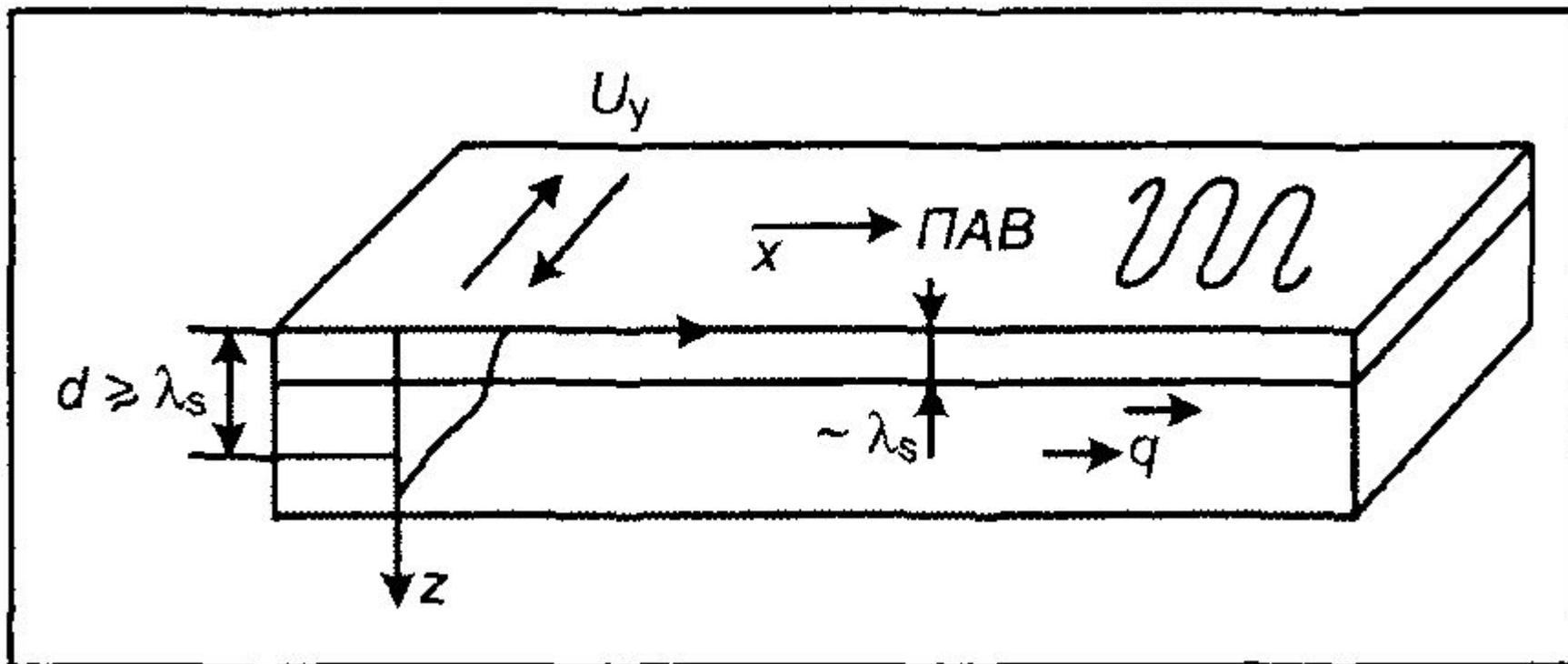


Вдоль границы двух твердых тел могут распространяться **волны Стоунли**, состоящие как бы из двух рэлеевских волн.

Функциональная акустоэлектроника

1. Динамические неоднородности

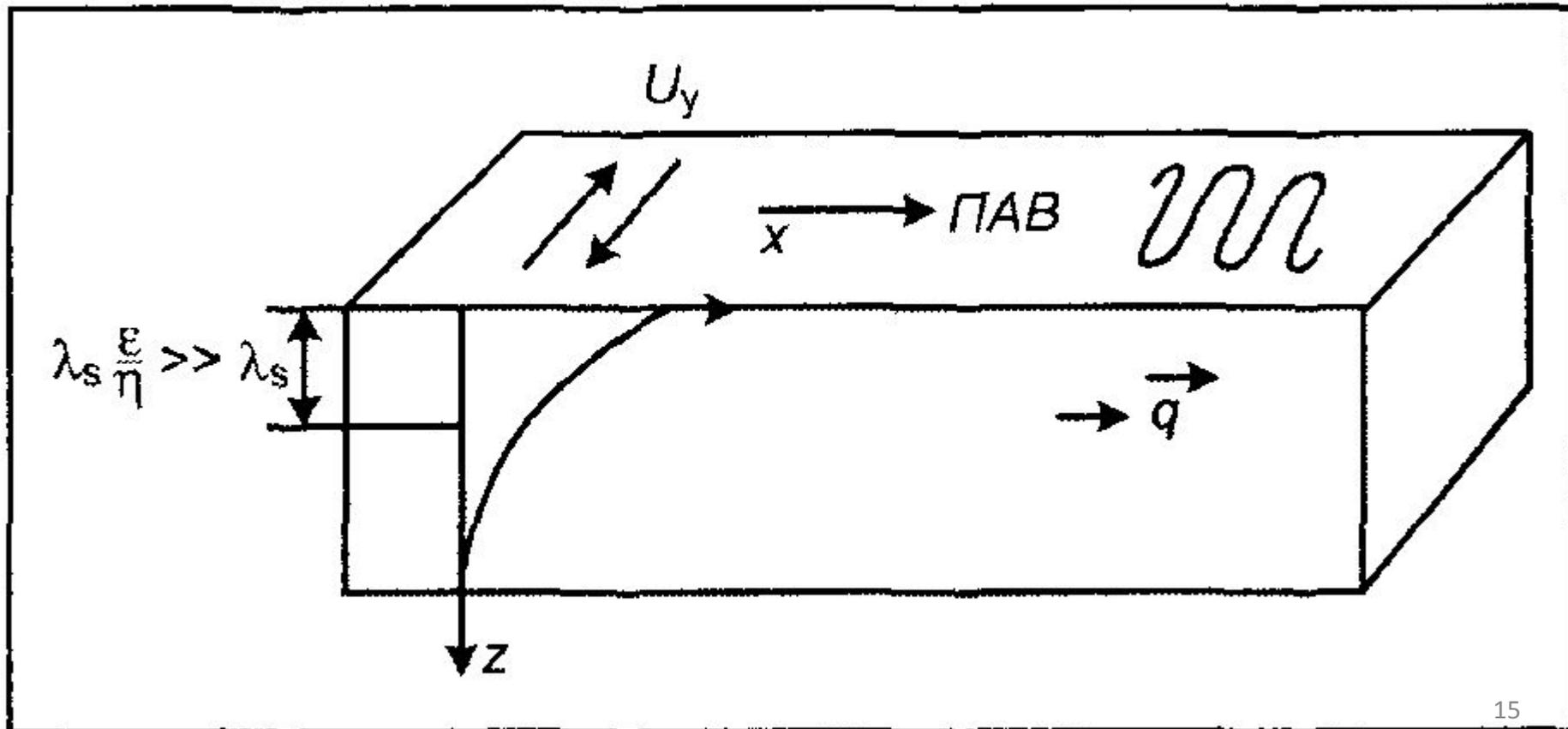
К волнам с горизонтальной поляризацией относятся **волны Лява**. Это сдвиговые волны, существующие в тонком слое на поверхности твердого тела. Волны Лява обладают дисперсией и локализуются в слое, толщина которого больше длины волны.



Функциональная акустоэлектроника

1. Динамические неоднородности

Сдвиговые волны, не обладающие дисперсией, **волны Гуляева — Блюштейна**. Они могут существовать на свободной поверхности пьезоэлектрических кристаллов. Глубина их проникновения в десятки раз превышает длину акустической волны. Применение таких волн позволяет избежать тщательной обработки поверхности материала.



Функциональная акустоэлектроника

1. Динамические неоднородности

Важной особенностью распространения динамических неоднородностей акустической природы (ПАВ) в континуальных средах с различными физическими свойствами является существующий **эффект генерации динамических неоднородностей другой природы**.

Вследствие явления **акустоэлектронного взаимодействия** происходит воздействие акустической волны на электропроводимости в твердых телах.

Результатом такого воздействия является **обмен энергией и импульсом** между акустической волной и электронами проводимости.

- Передача энергии акустической волны электронам приводит к электронному поглощению звука, а передача импульса акустической волны стимулирует возникновение электрического тока.
- Возможно явление усиления звука за счет стимулированного дрейфа электронов в твердом теле и частичной передачи энергии акустической волне.

Функциональная акустоэлектроника

1. Динамические неоднородности

Возникающая при распространении акустической волны деформация вызывает в пьезоматериалах переменное электрическое поле, амплитуда и фаза которого находятся в прямой зависимости от объемного заряда электронов проводимости (**прямой пьезоэффект**).

В свою очередь это поле вызывает деформацию кристалла и соответственно изменение характера распространения волны (**обратный пьезоэффект**).

Акустическая волна генерирует волны электрических полей:

- в местах, где **кристалл сжимается волной**, наведенное электрическое поле **замедляет движение электронов**,
- в местах **растягивания кристалла волной** наблюдается **ускорение электронов** за счет внутреннего электрического поля.

Под действием этих полей возникают затухающие волны объемного заряда, несколько запаздывающие по отношению к акустической волне.

Волны объемного заряда представляют собой динамические неоднородности электрической природы, стимулированные ПАВ.

Функциональная акустоэлектроника

1. Динамические неоднородности

Если звукопровод поместить в постоянное электрическое поле E , то возникает дрейф электронов со скоростью $v = \mu E$.

- Если $v > v_{\text{ПАВ}}$ – электроны будут отдавать свою энергию ПАВ – **усиление ПАВ**.
- Если $v < v_{\text{ПАВ}}$ – электроны будут забирать энергию ПАВ – **затухание ПАВ**.

Обмен энергией между динамическими неоднородностями акустической и электронной природы в пределах одной континуальной среды является фундаментальным эффектом, лежащим в основе приборов акустоэлектроники.

Функциональная акустоэлектроника

2. Континуальные среды

Континуальными средами функциональной акустоэлектроники являются твердотельные материалы:

- **пьезоэлектрики,**
- **пьезополупроводники,**
- **пьезокерамика.**

В настоящее время известно более 1500 веществ, обладающих **пьезоэлектрическими свойствами.**

Выбор континуальных сред определяется природой используемых динамических неоднородностей.

Основные требования к этим материалам сводятся к минимизации уровня потерь для распространения динамических неоднородностей акустической или иной природы, а также к максимальной температурной стабильности.

Другие требования к среде диктуются функциональным назначением прибора, технологией его производства.

Функциональная акустоэлектроника

2. Континуальные среды

1). Классическими материалами являются **пьезоэлектрические монокристаллы**.

- Наиболее широко известный кристалл — **кварц**, представляющий собой кристаллическую модификацию безводной двуокиси кремния SiO_2 . Определенные срезы кварца характеризуются своими параметрами и используются в различных устройствах.
- Наряду с природными кристаллами используются и **синтетические кристаллы**, превосходящие природные по однородности, размерам, а также по стоимости изготовленных из них изделий. Кристаллы **ниобата лития** (LiNbO_3) и **танталата лития** (LiTaO_3) обладают более высоким, чем кварц пьезомодулями и коэффициентами электромеханической связи. Во многих областях приборостроения эти кристаллы вытеснили кварц, особенно в СВЧ-технике.

Функциональная акустоэлектроника

2. Континуальные среды

2). **Пьезополупроводники** – *сульфид кадмия* (CdS), *сульфид цинка* (ZnS), *оксид цинка* (ZnO) используются для пленочных преобразователей электромагнитных колебаний вплоть до СВЧ-диапазона. Технология их получения довольно хорошо отработана, и можно изготовить пленки с заданной симметрией.

Определенный интерес представляют такие пьезополупроводники, как *селениды металлов* (CdSe), *арсенид галлия* (GaAs), *антимонид индия* (InSb), а также кристаллы *йодата лития* (LiIO_3) и *калия* (KIO_3), *германата висмута* ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$).

3). Широкое распространение получили промышленные **пьезокерамические материалы**, как правило, представляющие собой *твердые растворы*. Свойства таких материалов задаются путем подбора соотношений компонентов, введением модифицированных добавок, а также технологией их изготовления.

К пьезокерамическим материалам относятся *титанат бария* (BaTiO_3), *титанат свинца* (PbTiO_3), *цирконат-титанат-свинца* ($[\text{Pb}(\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47})\text{O}_3]$) и др. Вводимые добавки, расширяют двухфазную область составов и усиливают нужные свойства пьезокерамики.

Модификацию пьезокерамики можно осуществить в широком диапазоне свойств за счет введения добавок.

Функциональная акустоэлектроника

2. Континуальные среды

Поверхность используемых в акустоэлектронике континуальных сред должна быть тщательно обработана.

Это связано с тем, что **звукопровод расположен в приповерхностном слое** и тщательная полировка поверхности позволит снизить рассеяние звука и избежать помех.

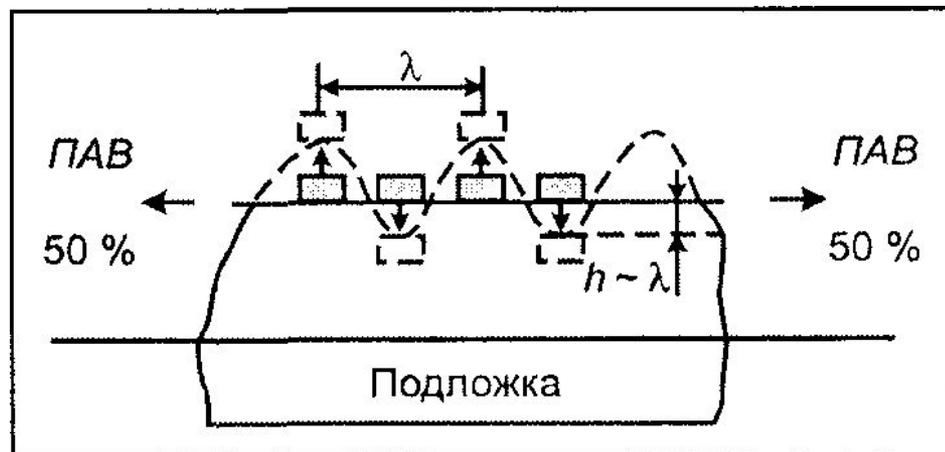
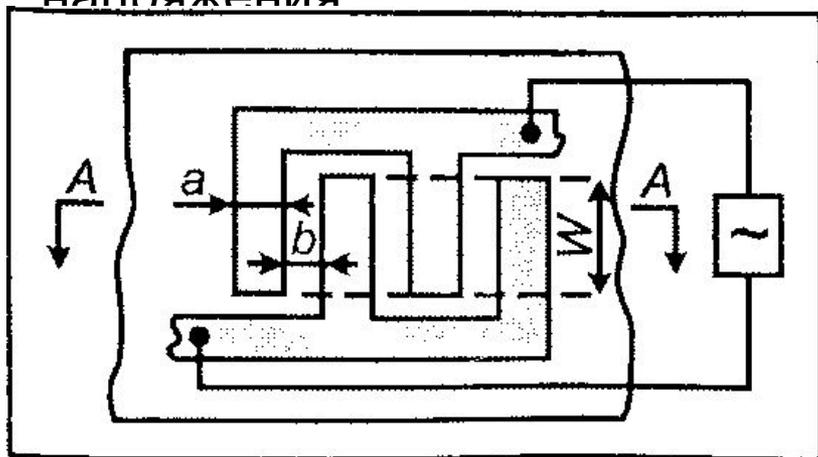
Анизотропность кристаллов приводит к резкой зависимости скорости распространения ПАВ от направления среза. Поэтому срезы необходимо выбирать так, чтобы добиться выполнения условия коллинеарности векторов фазовой и групповой скоростей.

Функциональная акустоэлектроника

3. Генераторы динамических неоднородностей

Возбуждение динамических неоднородностей в виде акустической волны в пьезоэлектрике осуществляется с помощью **вложенных друг в друга групп электродов**, которые получили название **встречно-штыревых преобразователей (ВШП)**.

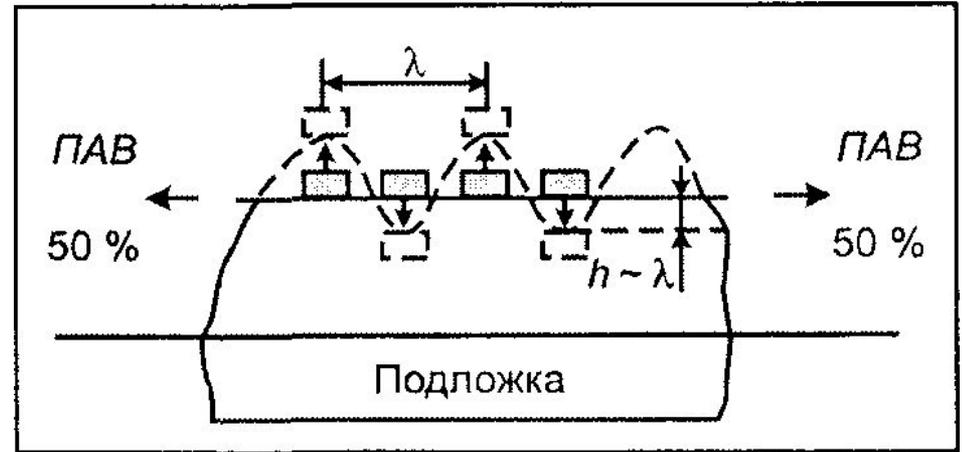
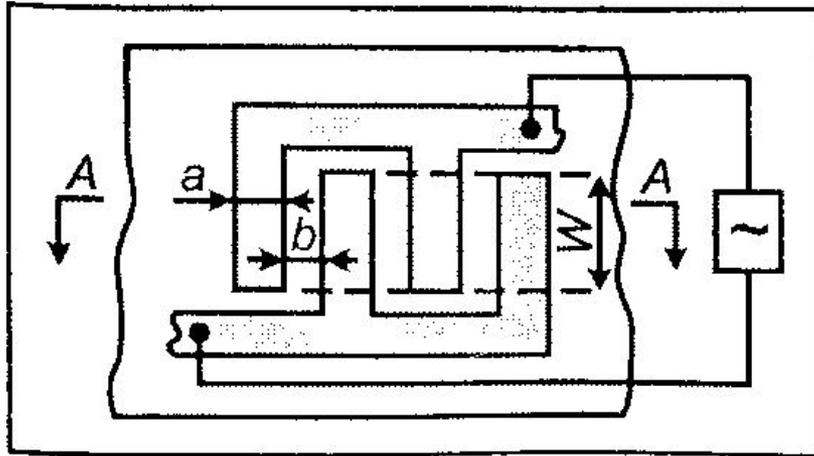
Другое название такой системы электродов — **двухфазный преобразователь ПАВ**. Две группы чередующихся электродов соединены шинами, которые в свою очередь подключены к источнику напряжения



При подаче на ВШП напряжения каждая пара электродов возбуждает ПАВ. Если период преобразователя ($a + b$) равен длине ПАВ, возникает явление акустического синхронизма. В этом случае волны, возбуждаемые каждой парой электродов, имеют одинаковую фазу, и происходит когерентное сложение волн.

Функциональная акустоэлектроника

3. Генераторы динамических неоднородностей



Суммирование происходит за счет локальных деформаций, образующихся под промежутками между электродами. Образовавшаяся деформация начинает перемещаться в оба направления и достигает следующих промежутков как раз в тот момент, когда полуволна внешнего напряжения достигнет максимума и вызовет деформацию под своими электродами.

Сложение деформаций происходит при выполнении условия

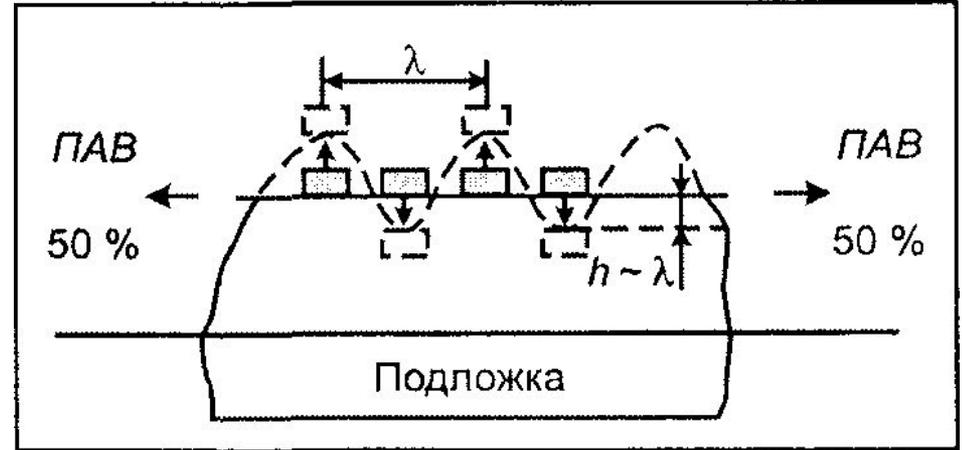
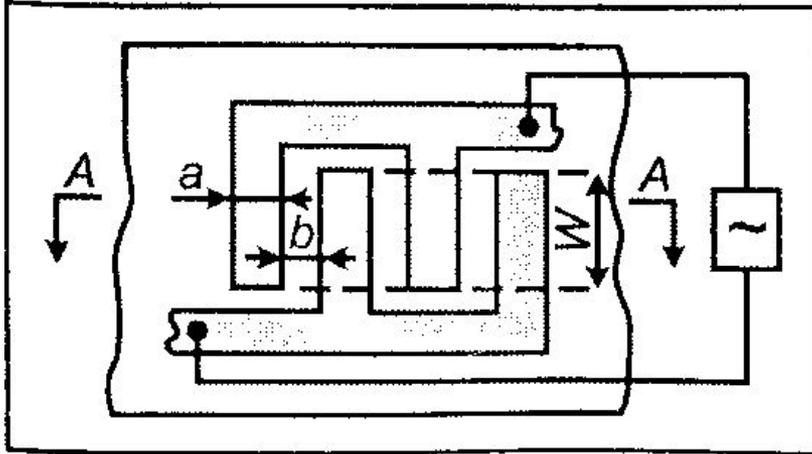
$$\lambda = 2(a + b) = V/f$$

где λ , V , f – соответственно длина, скорость и частота звуковой волны.

Такая картина происходит под каждой парой ВШП. Чем больше штырей содержит преобразователь, тем эффективней происходит преобразование электрической энергии в механическую, и наоборот.

Функциональная акустоэлектроника

3. Генераторы динамических неоднородностей



Частота синхронизации или **центральная (рабочая) частота** определяется выражением

$$f = \frac{V}{\lambda} = \frac{V}{2(a+b)} = \frac{V}{d}$$

где $d = 2(a + b)$ – период структуры электродов.

Большое значение имеет **топологический параметр** W или **апертура**, определяющая степень перекрытия ВШП. Обычно выбирают значение апертуры $W \approx 100\lambda$. Апертура определяет форму импульсного отклика ВШП.

Конструктивно ВШП выполняются в виде тонкопленочных металлических электродов (Au, Al). Толщина электродов h определяется технологией и обычно $h < a$.

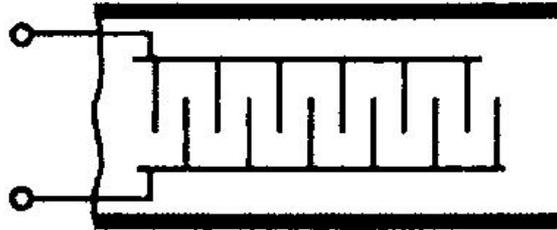
Функциональная акустоэлектроника

3. Генераторы динамических неоднородностей

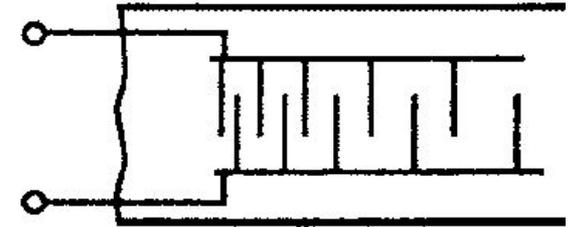
Генерацией динамических неоднородностей можно эффективно управлять путем изменения характеристик преобразователей ПАВ. Существует несколько способов **управления генерацией ПАВ**.

Первый способ управления предусматривает управление генерацией ПАВ путем **изменения топологии ВШП**, включая

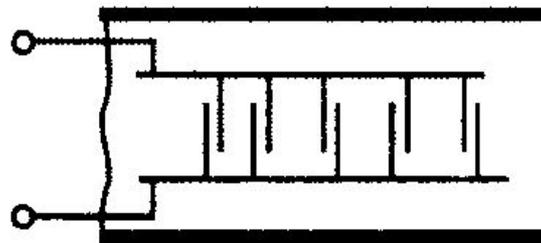
- изменение числа штырей, их расстановку,
- варьирование функции аподизации,
- изменения длины отдельных электродов (штырей) или их групп,
- изменение полярности отдельных штырей или их групп.



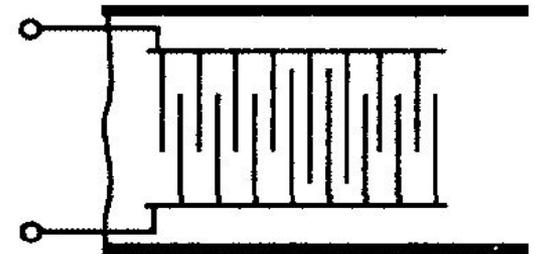
Эквидистантный, неаподизированный ВШП



Неэквидистантный, неаподизированный ВШП



Неэквидистантный, неаподизированный ВШП



Эквидистантный, аподизированный ВШП

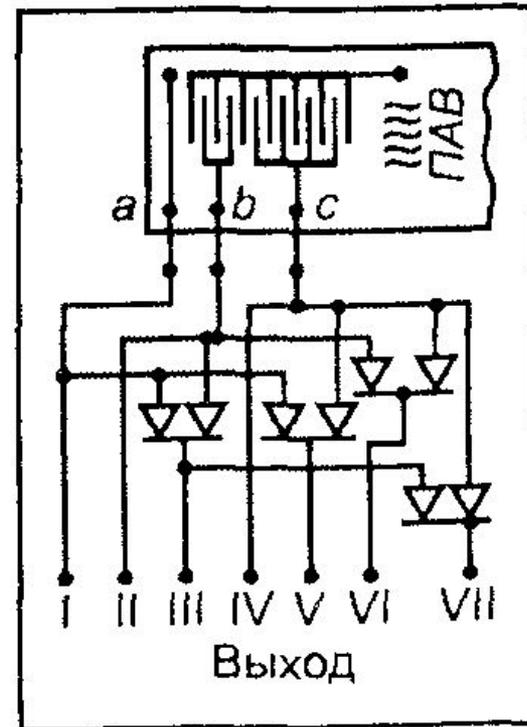
Функциональная акустоэлектроника

3. Генераторы динамических неоднородностей

Второй способ управления генерацией ПАВ связан с операцией «взвешивания» электродов преобразователей, которая реализуется за счет изменения количества активных пар ВШП.

Это позволяет менять ширину полосы генерации ПАВ и, следовательно, изменять характеристики динамических неоднородностей.

Устройство с управляемым «взвешиванием» электродов представляет собой **целенаправленное изменение эффективности преобразования энергии**, осуществляемого каждой парой электродов или их группой путем подключения к электродам управляемых импедансных элементов. Это могут быть резистивные, емкостные или индуктивные элементы, а также их комбинации.



Функциональная акустоэлектроника

3. Генераторы динамических неоднородностей

Третий способ управления опирается на управление электрофизическими свойствами подложки под электродами.

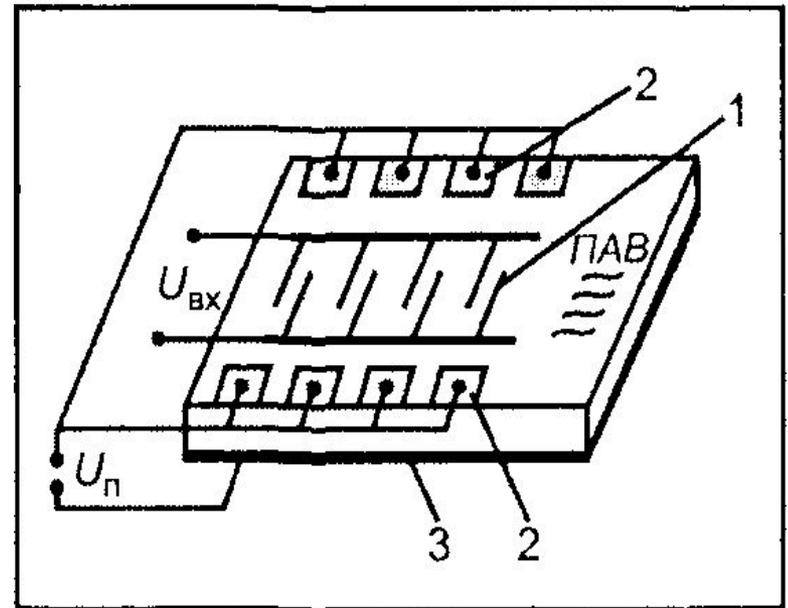
Мгновенная фаза ПАВ, генерируемая каждой парой ВШП, зависит от знака пьезоэлектрического коэффициента.

В пьезоэлектриках знак пьезоэлектрического эффекта можно менять подавая напряжение.

Рядом с электродами ВШП 1 размещены электроды переключения полярности 2, подключенные к источнику поляризующего напряжения.

Это позволяет менять знак поляризации материала звукопровода между металлическим электродом 3 и электродами 2 одновременно или путем перекоммутации локально под каждой парой ВШП.

Варьируя значениями напряжениями входа и поляризации можно эффективно управлять генерацией ПАВ.



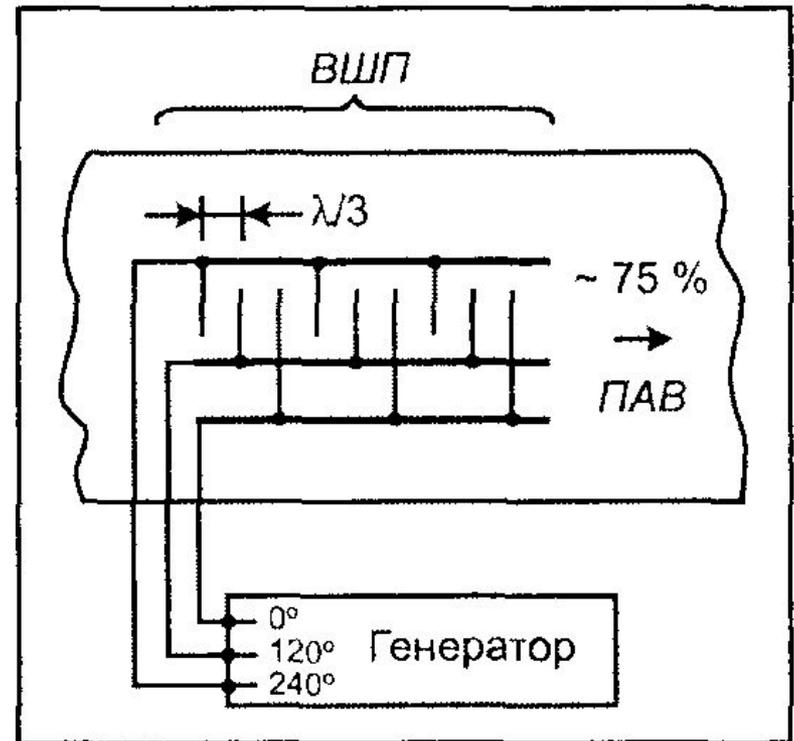
Функциональная акустоэлектроника

3. Генераторы динамических неоднородностей

Двухфазные преобразователи позволяют генерировать колебания в обе стороны звукопровода «симметрично» – 50 % энергии направо и 50 % энергии налево.

Однако можно управлять и направлением генерации ПАВ. С этой целью целесообразно использовать многофазные преобразователи, позволяющие синфазно подпитывать волну в заданном направлении.

Фазовое распределение подбирается так, чтобы в обратном направлении условие синфазности не выполнялось.

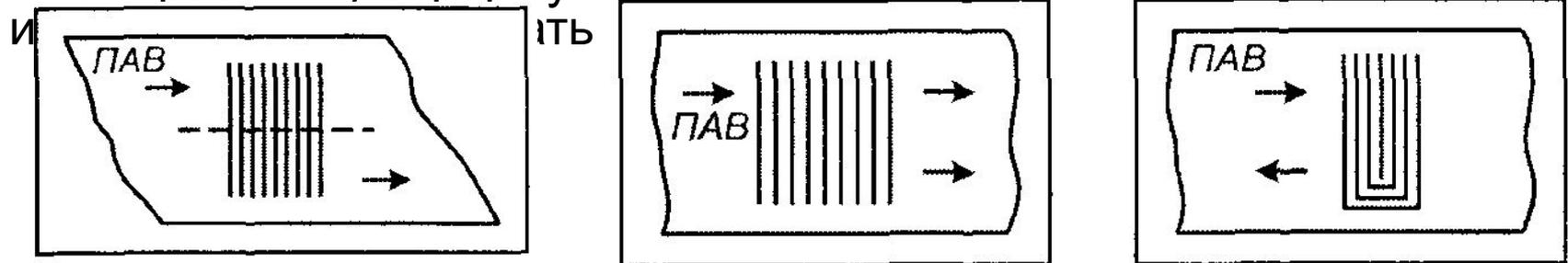


Функциональная акустоэлектроника

4. Устройства управления динамическими неоднородностями

Если используется ПАВ, распространение которой происходит в тонком приповерхностном слое, то для эффективного управления можно использовать интерференцию, дифракцию, отражение, преломление, переизлучение, фокусирование волн. Можно варьировать также параметры звукопровода, изменяя такие характеристики процесса распределения, как скорость ПАВ, дисперсию, удельное затухание и т. п.

1). Наиболее распространенным методом является управление акустическим трактом путем **изменения топологии его элементов**. Эти элементы позволяют сформировать каналы распространения ПАВ. К таким элементам относится *многополосковый ответвитель* (МПО), который конструктивно выполняется в виде системы пленочных металлических электродов, нанесенных на подложку. В зависимости от назначения устройства топология МПО имеет различную форму и способ переизлучать энергию в любой



Функциональная акустоэлектроника

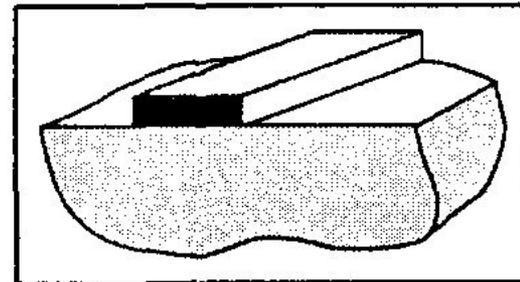
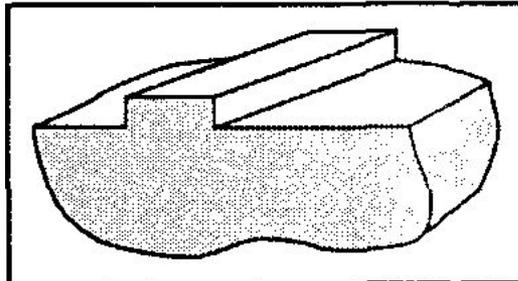
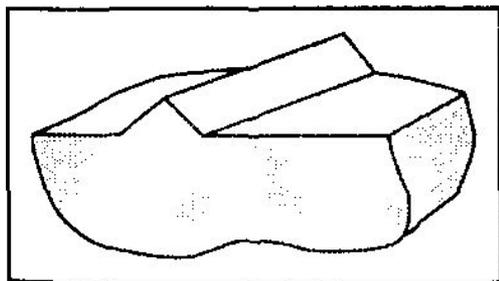
4. Устройства управления динамическими неоднородностями

2) В качестве элементов акустического тракта можно использовать **периодические неоднородности на поверхности звукопровода** в виде пазов, выступов металлических или диэлектрических полосок, а также комбинации этих структур.

Разработаны методы локализации (канализирования) волны в топографическом волноводе. Часто это связано с необходимостью увеличения протяженности тракта, чтобы обеспечить максимальное время задержки.

Помимо топографических волноводов для локализации акустической волны можно применять и плоские слоистые волноводы.

Слоистые волноводы изготавливают путем нанесения вещества, скорость ПАВ в которых отлична от скорости в звукопроводе. Степень локализации волны зависит от соотношения скорости ПАВ в звукопроводе и в слое нанесенного вещества.



Функциональная акустоэлектроника

4. Устройства управления динамическими неоднородностями

3) Третий метод управления свойствами звукопровода основывается на целенаправленном **изменении электрофизических свойств материала звукопровода.**

Возможность управления свойствами материала может быть реализована за счет термодинамической взаимосвязи тепловых, электрических, магнитных и упругих параметров среды. Управление в этом случае осуществляется с помощью полей различной физической природы.

Управление скоростью распространения ПАВ можно осуществлять, используя эффект электроупругого взаимодействия. С этой целью звукопровод помещается в электрическое поле с напряженностью порядка 10^3 В/см.

Скоростью распространения ПАВ можно также управлять, используя термоупругий эффект. Его применение позволяет изменять упругие константы материала в тепловых полях.

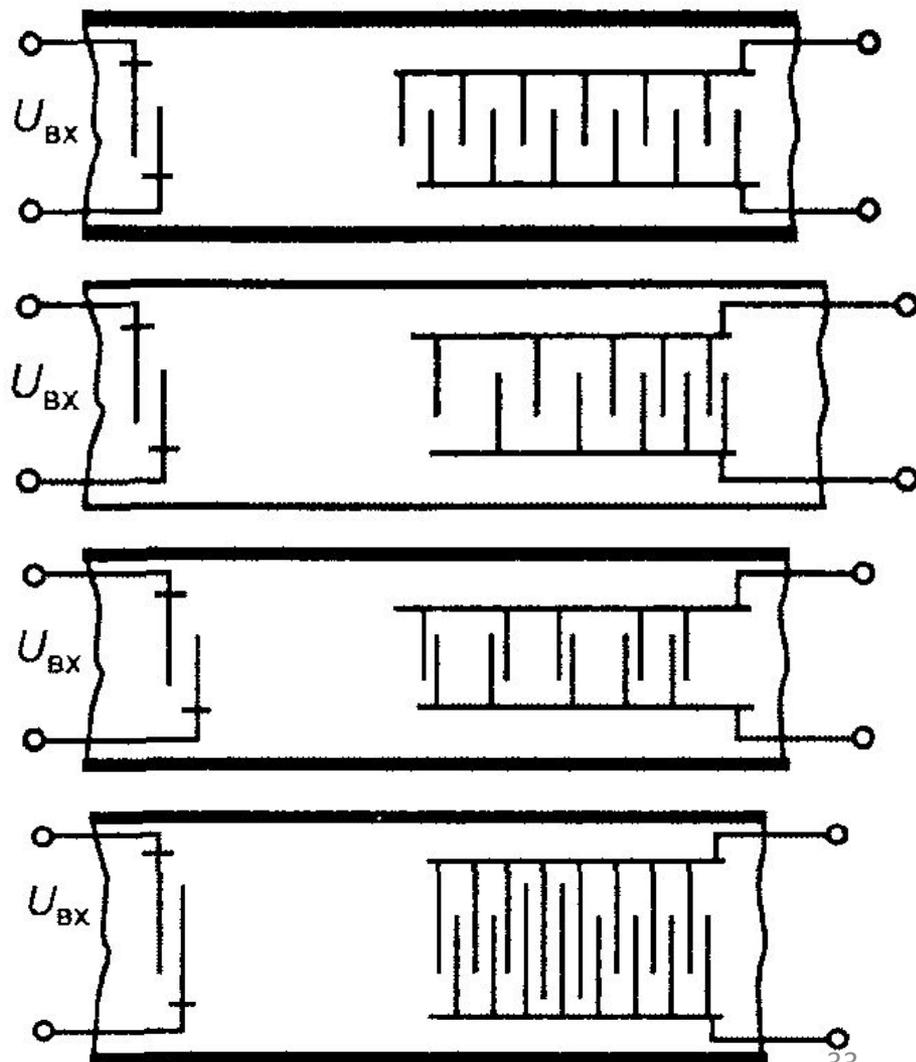
Функциональная акустоэлектроника

5. Детектирование динамических неоднородностей

Детектирование неоднородностей является, как правило, физическим процессом, обратным

Если при генерации ПАВ используется **прямой пьезоэффект**, позволяющий преобразовывать энергию электрического поля в энергию акустической волны, то в процессе **детектирования** используется **обратный пьезоэффект**.

Устройство, позволяющее детектировать ПАВ, аналогично генератору ПАВ и представляет собой ВШП.



Устройства функциональной акустоэлектроники

Приборы функциональной акустоэлектроники предназначены для преобразования, аналоговой обработки и хранения информации.

С помощью акустоэлектронных приборов и устройств можно производить различные операции с сигналами: задерживать по времени, изменять длительность и форму сигналов по амплитуде, частоте и фазе, преобразовывать частоты и спектр сигналов, сдвигать их по фазе, производить модулирование сигналов, производить кодирование и декодирование сигналов, интегрирование сигналов, получать функции свертки и корреляции сигнала



Устройства функциональной акустоэлектроники

Линии задержки

Простейшим устройством на ПАВ является *линия задержки* (ЛЗ), которая предназначена для временной задержки сигналов без заметных их искажений.

Основным преимуществом ЛЗ на ПАВ являются

- небольшие габариты,
- достаточно широкий диапазон частот (до 10^9 Гц),
- хорошая температурная стабильность ($\sim 10^{-6}$ °С).

Эти свойства обусловлены, прежде всего, особенностями ПАВ

- невысокой ($V \sim 10^3$ м/с) скоростью распространения,
- бездисперсионностью,
- эффективным преобразованием электрической энергии в акустическую и наоборот.

Устройства функциональной акустоэлектроники

Линии задержки

Линии с однократной задержкой сигнала предназначены для однократного или единичного съема информационного сигнала и должны обеспечивать заданную задержку и форму АЧХ-сигнала с максимальной точностью в пределах широкого диапазона температур

Шаг электродов d выбирается исходя из заданной центральной частоты

$$d = V / 2f_0,$$

ширина электродов a , как правило, равна расстоянию между ними a ($a = b$) и тогда $d = V / 4f_0$.

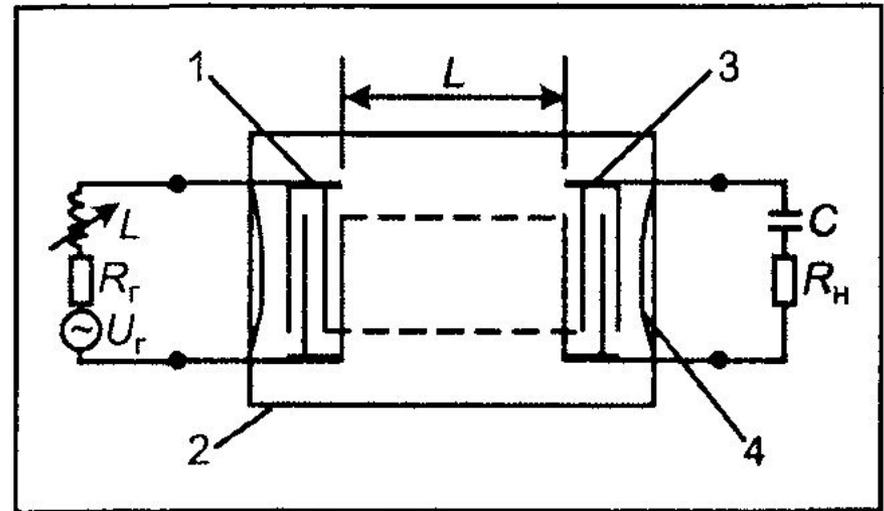
Минимальное значение апертуры ВШП определяется дифракционными потерями и может быть оценено из соотношения:

$$W_{min} \geq \sqrt{V\lambda\tau}$$

Время задержки сигнала $\tau = L / V$, где L – длина звукопровода.

Максимальное значение апертуры ограничивается конечной шириной звукопровода.

При подаче на вход ЛЗ одиночного импульса, обладающего единичной амплитудой и бесконечно малой длительностью, на выходе возникнет акустический сигнал, задержанный на время $\tau = L / V$.

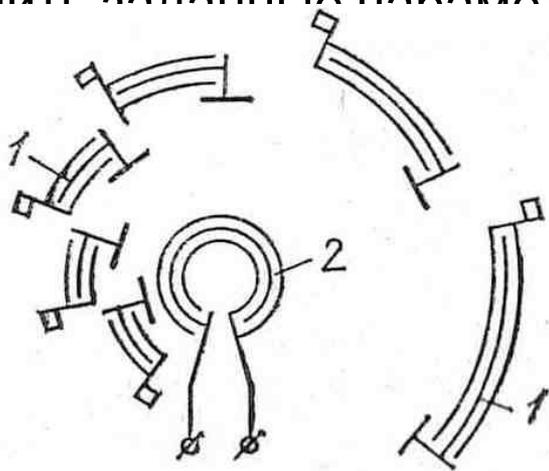


Устройства функциональной акустоэлектроники

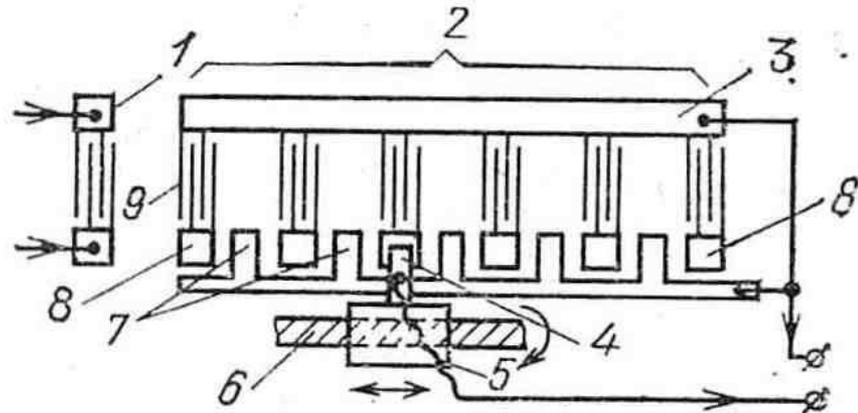
Линии задержки

Многоотводные линии задержки (МЛЗ) предназначены для увеличения максимального времени задержки, увеличения числа дискретных диапазонов задержки, регулировки времени задержки.

Максимальную задержку сигналов можно получить, эффективно управляя распространением ПАВ. Увеличивая траекторию распространения ПАВ в пределах одного звукопровода, можно получить заданные параметры.



Выходные преобразователи 1
концентрически
расположены относительно
сферического входного
преобразователя 2



Линии с дискретной регулировкой задержки. Входной преобразователь 1, выходные преобразователи 2 с общей шиной 3 и контактными площадками 8, разделенные экранами 7, объединенными с общей шиной, съем сигнала производится с пружинного контакта 4

Устройства функциональной акустоэлектроники

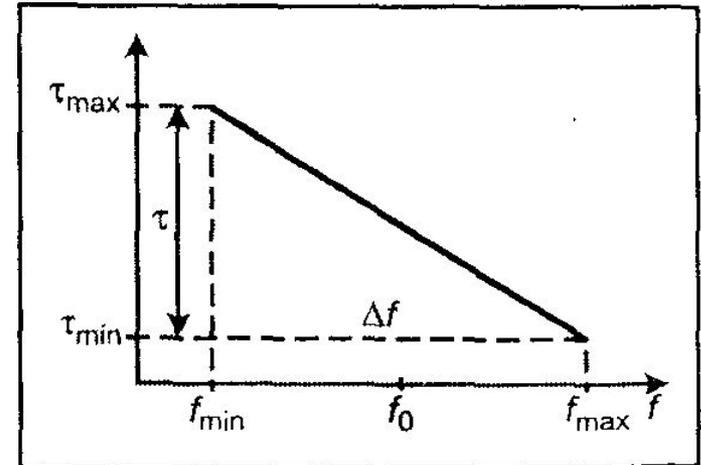
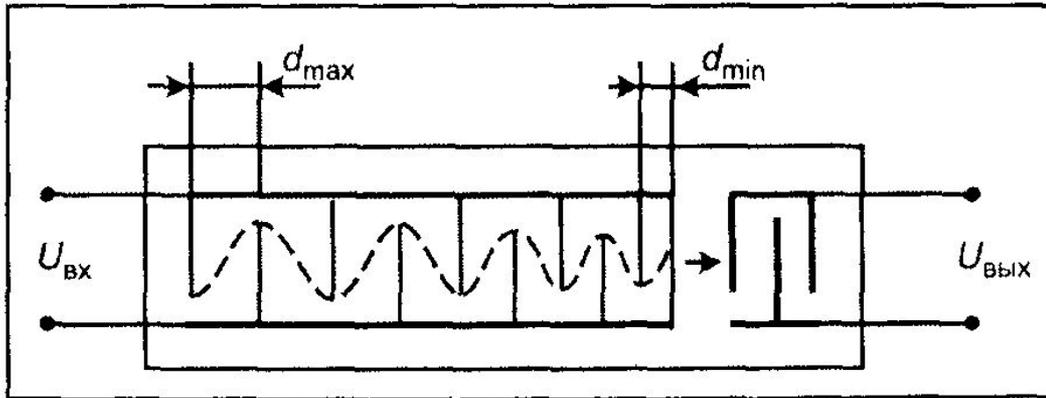
Линии задержки

Дисперсионные линии задержки (ДЛЗ) предназначены для формирования зависимости задержки от частоты сигнала.

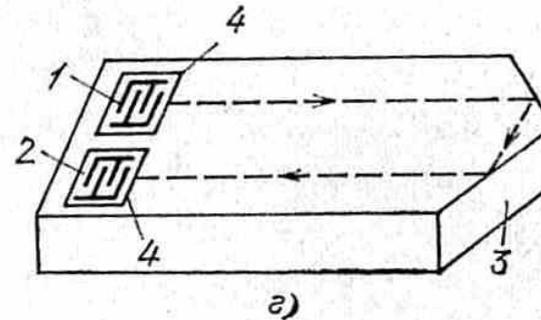
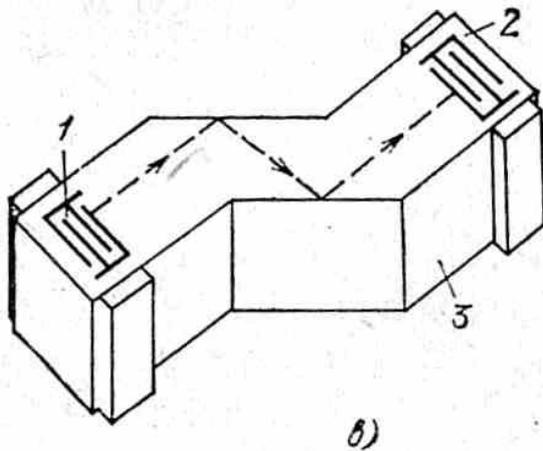
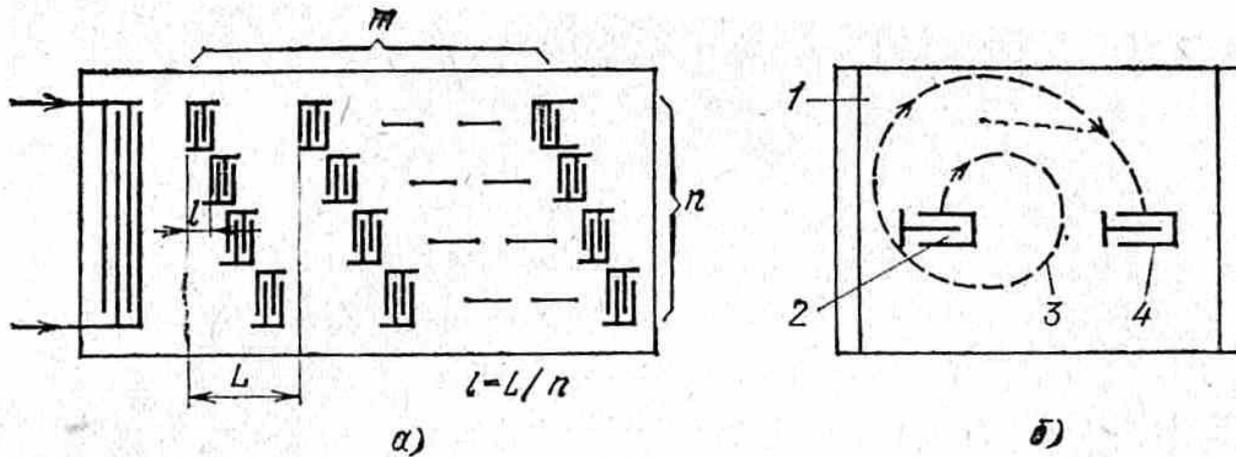
В ДЛЗ используется генерирующий ВШП с неэквидистантным расположением штырей. Шаг электродов меняется

$$\text{от } d_{\max} = \frac{V}{2f_{\min}} \text{ до } d_{\min} = \frac{V}{2f_{\max}},$$

где f_{\min} и f_{\max} – нижняя и верхняя частоты девиации ДЛЗ.



Устройства функциональной акустоэлектроники



- а) Матричная конструкция
- б) ЛЗ со спиральной траекторией
- в), г) ЛЗ с траекторией с отражением от граней звуковода в пленочных конструкциях

Устройства функциональной акустоэлектроники

Устройства частотной селекции (фильтры)

Устройства частотной селекции представляют собой устройства, предназначенные для выделения необходимых сигналов на фоне шумов и помех.

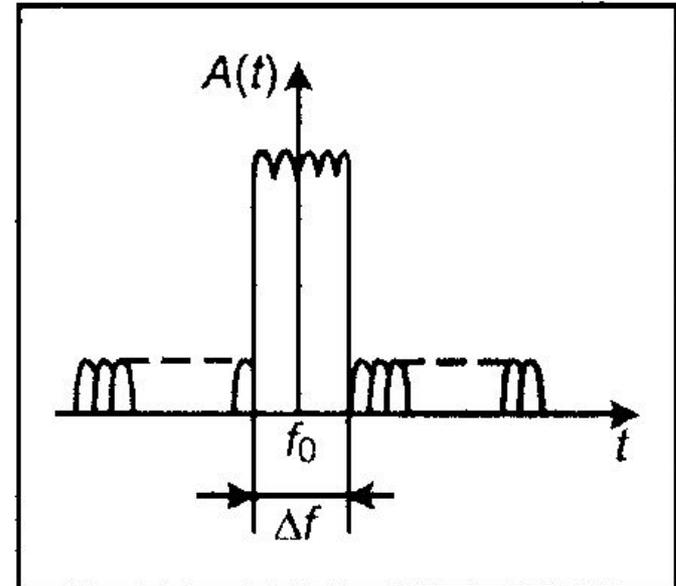
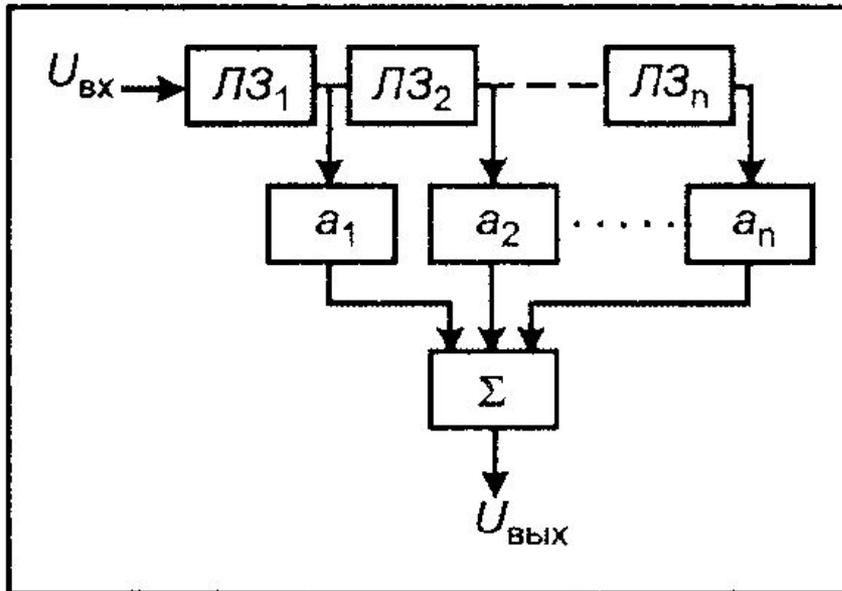
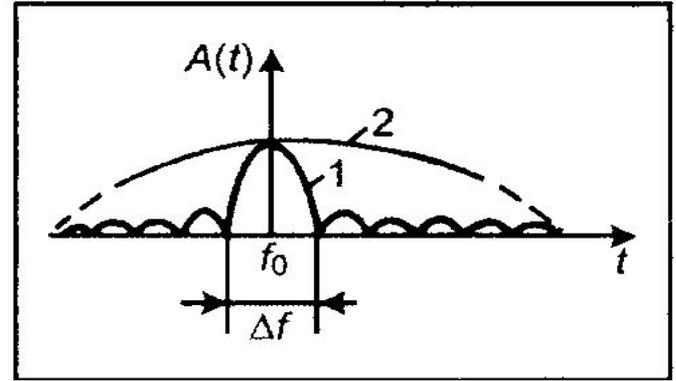
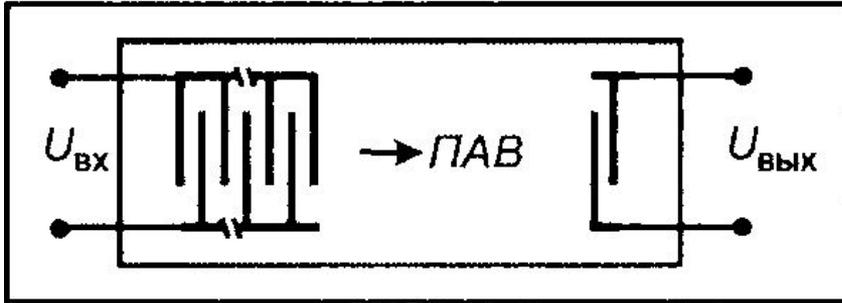
К устройствам частотной селекции относятся фильтры, которые можно классифицировать по следующим независимым признакам:

- **по виду частотной характеристики:** *полосовые* (пропускающие определенную полосу частот), *режекторные* (подавляющие определенную полосу частот), *нижних частот* (пропускающие частоты от 0 до f), *верхних частот* (пропускающие частоты выше f);
- **по физическому принципу:** *резонансные* (по акустическому или электрическому резонансу), *трансверсальные* (по фазо-частотной характеристике), *нетрансверсальные* (по амплитудно-частотной характеристике);
- **по виду обрабатываемых сигналов:** *аналоговые* (обработка сигнала в виде непрерывной функции), *цифровые* (обработка сигнала в виде дискретной функции).

Устройства функциональной акустоэлектроники

Устройства частотной селекции (фильтры)

Самым простым по конструкции из полосовых фильтров является однопроходной фильтр.



Устройства функциональной акустоэлектроники

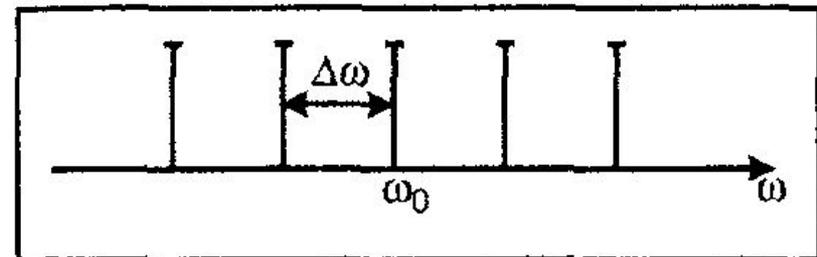
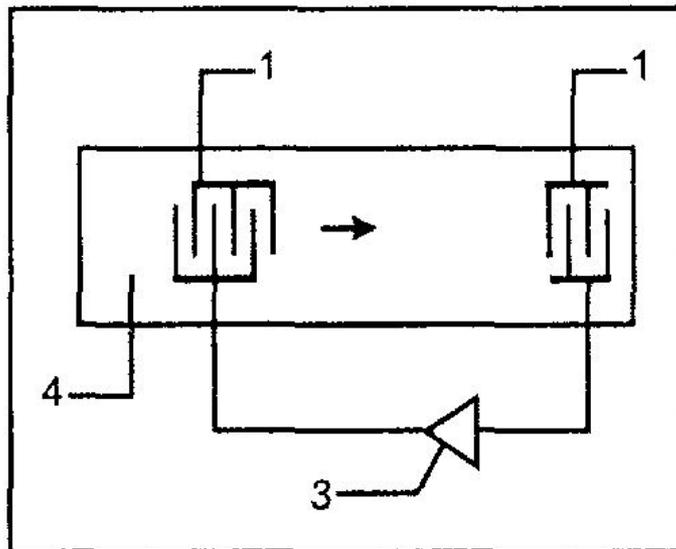
Генераторы на ПАВ

Различают **два типа генераторов на ПАВ** в зависимости от используемого стабилизирующего элемента.

В **первом типе** используется **ПАВ-линия задержки**, включенная в цепь положительной обратной связи усилителя.

Линия задержки позволяет возбудить колебания на частотах ω , определяемых соотношением $\omega = 2\pi V/L$, где L – длина линии задержки.

Для получения одномодового режима необходимо строгое выполнение соотношения $L = n\lambda$, где λ – длина звуковой волны, n – целое число. Частота генераций может быть изменена за счет изменения скорости ПАВ в резонирующей полости или введением фазового сдвига во внешней цепи.



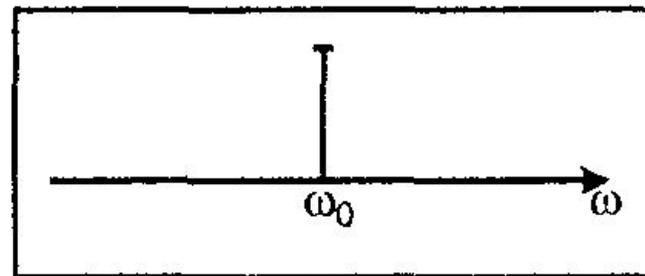
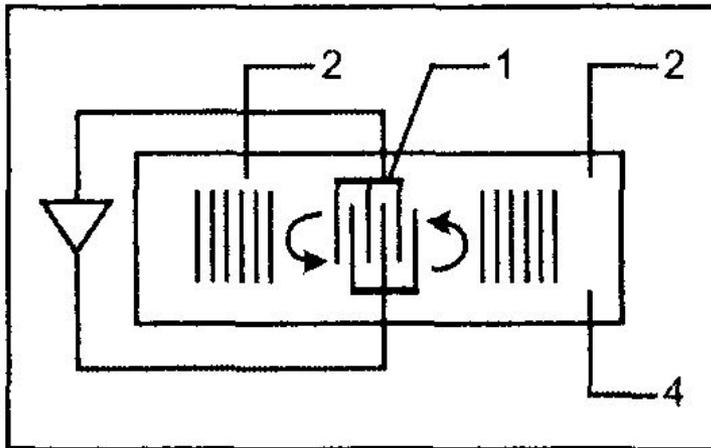
Устройства функциональной акустоэлектроники

Генераторы на ПАВ

В генераторе **второго типа** в качестве стабилизатора частоты используется **ПАВ-резонатор с одним входом**.

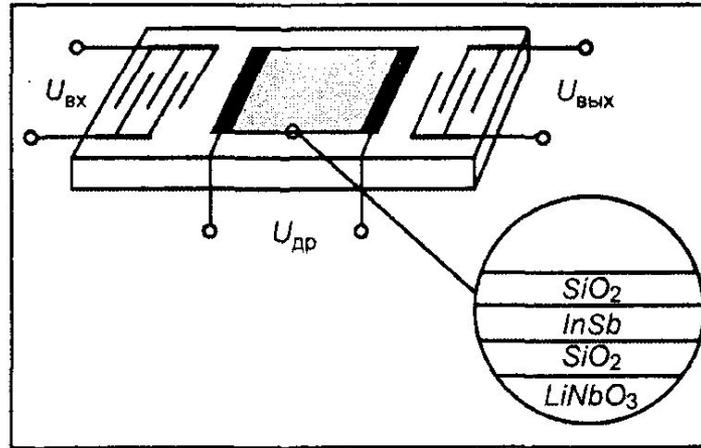
Усилитель подключается между разнополярными шинами преобразователя.

Селективные свойства генератора определяются размерами резонирующей полости и параметрами отражательной структуры. Добротность ПАВ-резонаторов составляет $\sim 10^4$ и это позволяет создавать конкурентоспособные генераторы.

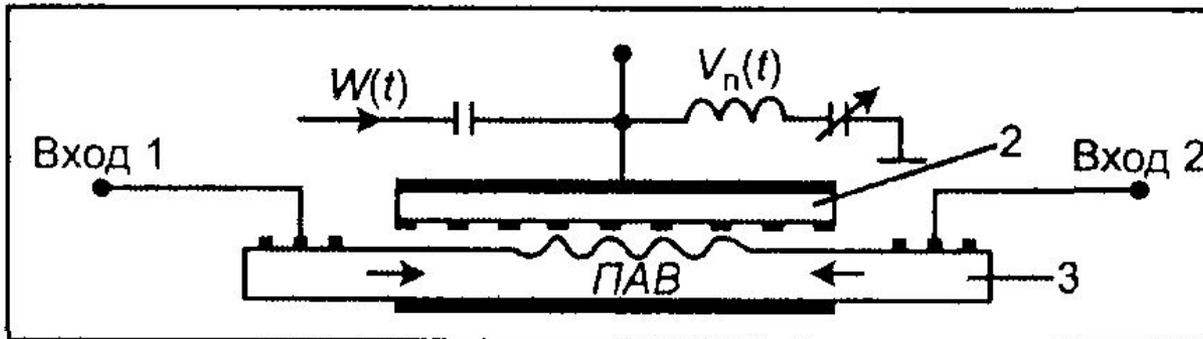


Устройства функциональной акустоэлектроники

Усилители акустических сигналов – за счет «перекачки» энергии из волн зарядовой плотности



Устройства памяти (акустические запоминающие устройства – АЗУ) – аналогично голографии в оптике – путем нелинейного взаимодействия акустической несущей волны с опорной акустической или электрической



- 1 – полупроводниковая пластина;
- 2 – матрица диодов Шоттки;
- 3 – пьезоэлектрическая пластина