**Введение**

К линейным пассивным акустоэлектронным устройствам относят устройства частотной фильтрации (фильтры), акустические линии задержки, согласованные (оптимальные) фильтры, или дисперсионные линии задержки, кодирующие и декодирующие устройства. Наибольшее распространение получили акустические фильтры (пьезоэлектрические, электромеханические, фильтры на объемных волнах и ПАВ). Они применяются в различных системах связи от радиовещания и телевидения до космической связи и радиолокации для выделения полезного сигнала на фоне помех, для интегрирования (накапливания) сигнала с определенными характеристиками, для изменения частотного спектра сигнала. Акустические линии задержки изготавливаются на времена задержки от нескольких нс до десятков мс с рабочими частотами от нескольких МГц до нескольких ГГц. Дисперсионные линии задержки, в которых время задержки зависит от частоты, применяются в качестве оптимальных фильтров для обработки линейно частотно-модулированных сигналов. Включение активных элементов в акустические линии задержки позволяет усиливать акустические сигналы и превращает их в активные устройства. Усиление УЗ-сигнала может осуществляться сверхзвуковым дрейфом носителей. Режим усиления при определенных условиях может быть переведен в режим генерации УЗ-волны. Этот эффект используется для создания акустоэлектронных генераторов монохроматических сигналов и сигналов со сложным спектром.

1. **Технические параметры линий задержки на ПАВ**

Основные параметры линий задержки на ПАВ - вносимое затухание, входное и выходное сопротивление, частотная избирательность, полоса пропускаемых частот. Все эти параметры зависят главным образом от устройства ВШП. Важной проблемой при создании высокоэффективных акустоэлектронных компонентов является уменьшение вносимого затухания путем рационального конструирования ВШП. Необходимо также, чтобы преобразование электрических сигналов в акустические и обратно происходило в заданной полосе частот. Это особенно важно широкополосных линий задержки. Геометрические размеры и форма входного ВШП определяют эффективность преобразования электрического сигнала в акустическую волну. Для каждой частоты наиболее эффективное преобразование получается при определенных размерах ВШП. Число штырей ВШП определяет относительную полосу пропускаемых частот. Самая широкая полоса будет при ВШП, состоящем из двух штырей. Чем больше штырей, тем меньше ширина полосы пропускания. Работа преобразователей на ПАВ ухудшается из-за различных вторичных явлений, к которым, к примеру, относится отражение волн от границ электродов. Это отражение - главная причина искажений выходного сигнала и ухудшения параметров прибора. Вредным следует также считать прямое прохождение электрического сигнала с входа на выход и передачу сигнала объемной акустической волной. При снижении затухания и уменьшении отражений за счет особых конструкций ВШП достигается однонаправленная передача. Линии задержки на ПАВ обычно вносят затухания 0,5-1,5 дБ. Верхняя частота, на которой работают такие линии, достигает 2 ГГц. Относительная полоса пропускания может быть весьма различной: от долей процента до 100%. Длительность задержки в зависимости от расстояния между ВШП и от конструкции составляет единицы-сотни микросекунд. Задержка может быть фиксированной или регулируемой. На торцы звукопровода обычно наносят звукопоглощающие покрытия, чтобы уменьшить отражение волн.

Динамический диапазон линий задержки 80-120 дБ. Для хорошей работы линии задержки важна температурная стабильность её параметров. Температурный коэффициент задержки (ТКЗ), близкий к нулю, получают, либо применяя специальный материал для звукопровода (например, кремний с примесями фосфора), либо делая звукопровод из двух частей, имеющих ТКЗ разного знака, что создает взаимную компенсацию. Диапазон рабочих температур линий задержки составляет десятки градусов. Для увеличения времени задержки путь волны делают в виде ломанной линии, либо соединяют последовательно несколько линий задержки. Регулируемые линии задержки имеют несколько ВШП, расположенных на разных расстояниях. Включая тот или иной ВШП, можно изменять время задержки. В бытовой РЭА линии задержки на ПАВ используют для задержки сигнала цветности в телевизионных приемниках (рис.1).

Рис.1 - Линии задержки сигнала цветности в телевизионных приемниках

Условное обозначение типа линии задержки состоит из трех элементов: ПЕРВЫЙ ЭЛЕМЕНТ - три (четыре) буквы. "УЛЗ" - ультразвуковая линия задержки; "ЛЗЯ" - линия задержки яркостная; "ЛЗЯС" - линия задержки яркостного сигнала.

ВТОРОЙ ЭЛЕМЕНТ - две (три) цифры, означающие время задержки в мкс.

ТРЕТИЙ ЭЛЕМЕНТ - цифра (несколько цифр): для УЛЗ - порядковый номер разработки; а для ЛЗЯ (ЛЗЯС) - волновое сопротивление в Омах. Для обозначения линий задержки зарубежные фирмы применяют собственную маркировку. Фирма "PHILIPS" обозначает двумя буквами "DL" (delay lines), что означает "линия задержки" и двумя (тремя) цифрами, указывающими на порядковый номер разработки. Ниже для сравнения даны параметры некоторых распространенных типов УЛЗ:

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| тип линии задержки | система цветного телевид. (примен.) | средняя номинальн. частота,МГц (Fmin-Fmax) | время задержки, в мкс.(по ур.-3дб) | затухание ложного канала в дб. | Rвx.= Rвых в Омах | Lвx./Lвых.в мкГ  |
| УЛ3-64-5 | SECAM (CTV) | 4,433619  (3,9 ... 4,75) | 63943 +30   | -26   | 390   | 4,3/8,3   |
| DL63   | PAL-Braal (CTV) | 3.575611 (2,8...4,5) | 63486 ±5   | -30   | 560   | 18   |
| DL680   | PAL (VLP) | 7,00000 (5,5.. 8.5) | 64400 ±50   | -30   | 150   | 2,2   |
| DL701   | PAL-Europe (CTV/VCR) | 4.433619 (3,43...5,23) | 6394315   | -33   | 390   | 10   |
| DL703   | PAL-Europe (VCR) | 4.433619 (3,03.. 5,43) | 63935 ±5   | -26   | 390   | 18   |
| DL711   | PAL-SECAM (CTV) | 4.433619 (3,43 5,23) | 63943 ±5   | -33   | 390   | 10   |
| DL720   | PAL-Argent. (CTV) | 3,582056 (2,8...4,5) | 63929 ±5   | -28   | 560   | 18   |
| DL722   | PAL-Argent. (CTV) | 3,582056 (2,8 ..4,5) | 64069 ±5   | -28   | 390   | 10   |
| DL750   | NTSC (CTV/VCR) | 3.579545 (2,8...4,5) | 63555 ±5   | -28   | 560   | 18   |
| DL872 (CF873) | PAL-Europe (VCR comb) | 4433619 (3,93 ...4,93) | 128   | -23   | 560   | 18   |

Основные параметры приборов на ПАВ:

1) время задержки Т, определяемое длиной пути L, проходимого упругими волнами в звукопроводе от входного преобразователя до выходного, и скоростью распространения УЗ v, т.е. T =Lv;

2) рабочая частота f0, приблизительно равная резонансной частоте преобразователей, причем частота задерживаемого радиосигнала должна совпадать с f0, а в случае задержки видеосигнала его надо сначала преобразовать в радиосигнал с частотой заполнения f0, а затем выделить огибающую (продетектировать);

3) полоса пропускания f, определяемая добротностью преобразователей и частотной характеристикой потерь в звукопроводе;

4) уровень ложных сигналов - отношение амплитуды наибольшего из ложных сигналов к амплитуде задержанного сигнала;

5) температурный коэффициент задержки, определяемый зависимостью скорости распространения упругих волн в звукопроводе от температуры.

**2. Физические основы работы линий задержки на ПАВ**

Работа различных приборов пьезоэлектроники основана на пьезоэлектрическом эффекте, который был открыт в 1880 г. французскими учеными братьями П. Кюри и Ж. Кюри. Слово "пьезоэлектричество" означает "электричество от давления". Прямой пьезоэлектрический эффект или просто пьезоэффект состоит в том, что при давлении на некоторые кристаллические тела, называемые пьезоэлектриками, на противоположных гранях этих тел возникают равные по величине, но разные по знаку электрические заряды. Если изменить направление деформации, т.е. не сжимать, а растягивать пьезоэлектрик, то заряды на гранях изменят знак на обратный. Акустоэлектроника - сравнительно новая область электроники, посвященная теории и практике создания устройств, основанных на акустоэлектронном взаимодействии и служащих для преобразования и обработки сигналов. Это могут быть преобразования временные (например, задержка сигналов или изменение их длительности), частотные и фазовые (например, преобразование частоты и спектра, фазовый сдвиг), амплитудные (усиление и модуляция), такие сложные преобразования, как кодирование и декодирование, интегрирование и т. п. В ряде случаев акустоэлектронные методы более удобнее обычных, чисто электронных, а иногда даже единственно пригодны. На основе акустоэлектронного взаимодействия могут быть созданы пассивные устройства, например линии задержки, фильтры, и активные - усилители, генераторы, модуляторы и др.

**Принцип устройства линии задержки на ПАВ**

Наиболее широкое применение получают акустоэлектронные приборы на ПАВ. К ним относятся линии задержки, полосовые фильтры, резонаторы, различные датчики т. п. Принцип устройства таких приборов показан на рис. 2.

Рис. 2 - Принцип устройства электронного прибора на ПАВ

В качестве звукопровода 1 обычно применяется пластина, или стержень, или провод из пьезоэлектрического материала (например, ниобат лития LiNbO3, пьезокварц SiO2, германат висмута Bi12GeO20, пьезокерамика) с тщательно отполированной поверхностью, на которой расположены электромеханические преобразователи: входной 2 и выходной 3. Эти преобразователи обычно выполняются в виде гребенчатых электродов из тонкой металлической пленки толщиной 0,1-0,5 мкм. Их называют встречно-штыревыми преобразователями (ВШП). К входному ВШП подключен источник электрического сигнала, и в звукопроводе возникает ПАВ. А в выходном преобразователе, к которому подключена нагрузка, возникает электрический сигнал. Края на обоих концах пластинки искажаются или нагружаются абсорбционной резиной для подавления отражения в направлении распространения первичной волны. Если на одну из систем ВШП подается высокочастотное напряжение, то на поверхности пластинки за счет обратного пьезоэффекта генерируется поверхностно-акустическая волна. Эта волна затем распространяется вдоль поверхности пластинки до тех пор, пока не попадет на другую систему ВШП, где она преобразуется обратно в высокочастотное напряжение. Время задержки между входным и выходным электрическими сигналами определяется по формуле: , где l - среднее расстояние между системами ВШП,

v - скорость распространения поверхностно-акустической волны.

Максимальное акустоэлектрическое взаимодействие систем ВШП имеет место при характеристической частоте , определяемой следующим соотношением:

, где h - шаг ВШП.

**Физика ПАВ.**

Поверхностные акустические волны (ПАВ), упругие волны, распространяющиеся вдоль свободной поверхности твердого тела или вдоль границы твердого тела с другими средами и затухающие при удалении от границ. ПАВ бывают двух типов: с вертикальной поляризацией, у которых вектор колебательного смещения частиц среды расположен в плоскости, перпендикулярной к границе (вертикальная плоскость), и с горизонтальной поляризацией, у которых вектор смещения частиц среды параллелен границе и перпендикулярен направлению распространения волны. Простейшим и наиболее часто встречающимся на практике ПАВ с вертикальной поляризацией являются Рэлея волны, распространяющиеся вдоль границе твердого тела с вакуумом или достаточно разряженной газовой средой. Фазовая скорость волн Рэлея cR=0,9 ct ;где ct – фазовая скорость плоской поперечной волны. В простом случае изотропного твердого тела эта волна содержит продольную и поперечную компоненты, сдвинутые по фазе на p/2 и лежащие в плоскости, определяемой волновым вектором и нормалью к поверхности. Таким образом, в общем случае рэлеевская волна является эллиптически поляризованной. Толщина слоя вещества, приводимого в движение волной Рэлея составляет величину порядка длины волны l.

 Y

 uX

 uZ

Ширина электродов и промежутков между ними в направлении распространения ПАВ обычно равна l/4, где l - длина ПАВ. Толщина электродов обычно не превышает 0.1 - 0.2 мкм.

**Метод возбуждения и приема ПАВ с помощью ВШП.**

Линия задержки на поверхностных акустических волнах (ПАВ) (рис. 2) является твердотельным функциональным устройством и представляет собой подложку из пьезоэлектрика 1, на поверхность которой методом фотолитографии наносятся системы токопроводящих элементов. Одна из таких систем – излучающий преобразователь ПАВ 2 – подключается к источнику входного сигнала, другая – приемный преобразователь ПАВ 3 – к нагрузке. Под действием высокочастотного электрического напряжения источника сигнала в зазорах между смежными электродами излучающего преобразователя возникает переменное электрическое поле, которое вследствие пьезоэффекта материала подложки вызывает механические колебания в ее поверхностном слое. Эти колебания распространяются в тонком приповерхностном слое подложки в направлениях, перпендикулярных электродам в виде поверхностных акустических волн. Между смежными электродами приемного преобразователя вследствие обратного пьезоэффекта механические колебания ПАВ обуславливают появление электрического напряжения, которое и является выходным сигналом. С целью устранения нежелательных отражений ПАВ от торцов подложки, а также с целью ослабления других типов акустических волн, которые могут быть возбуждены излучающим преобразователем ПАВ, все нерабочие грани и ее торцы покрываются специальным звукопоглощающим покрытием.

Схемы ультразвуковых линий задержки.

Схема включения линий задержки на ПАВ, работающих "на проход".

Рис. 3. 1 и 2 - преобразователи; 3 - звукопровод.

В зависимости от характера включения линий задержки на ПАВ могут работать “на проход” (рис. 3) или “на отражение” (рис. 4), причем во втором случае один и тот же преобразователь выполняет функции как излучателя, так и приемника ультразвука (УЗ).

Схема включения задержки на ПАВ, работающих "на отражение".

Рис. 4

Для электромеханического преобразования сигнала в линиях задержки на ПАВ используют в основном пьезоэлектрические, реже магнитострикционные преобразователи. Звукопроводом в линии задержки на ПАВ служит твердая среда, в которой упругие волны распространяются с относительно малыми потерями.

Схема линий задержки на ПАВ с преобразователями в виде эквидистантных (а) и неэквидистантных (б) решеток.

Рис. 5

Схема спиральной линии задержки на ПАВ.

Рис. 6

Задержка таких линий задержки достигает 2000мкс на частотах 50 - 60 МГц. В дисковых линиях задержки на ПАВ (рис. 7) увеличение акустического пути достигается многократной циркуляцией пучка вокруг замкнутой поверхности тонкого диска из монокристалла пьезоэлектрика.

Схема  дисковой линии задержки на ПАВ.

Рис. 7

3. Расчетная часть

Исходные данные:

Возьмем материал LiTaO3.

- скорость распространения волны в LiTaO3 v = 3290 м/с

- t – время задержки ЛЗ на ПАВ, t = 20 мкс

- - частота подаваемого на линию задержки сигнала 7 МГц.

Время задержки между входным и выходным электрическими сигналами определяется по формуле:

,

где l - среднее расстояние между системами ВШП,

v - скорость распространения поверхностно-акустической волны.

Вычислим расстояние между ВШП:

l = t\*v;

l = 3290\*0.00002 = 0,0658 м

l = 65.8 мм

Рассчитаем шаг ВШП , определяемой следующим соотношением:

, где h - шаг ВШП

h = v/ = 3290/7000000 = 0,00047 м = 0.47 мм

**Заключение**

Всякое акустоэлектронное устройство состоит из простейших элементов - электроакустических преобразователей и звукопроводов. Кроме того, применяются отражатели, резонаторы, многополосковые электродные структуры, акустические волноводы, концентраторы энергии и фокусирующие устройства, а также активные, нелинейные и управляющие элементы. Для возбуждения и приема объемных волн в акустоэлектронике используются пьезоэлектрические преобразователи: пьезоэлектрические пластинки (на частотах до 100 МГц), пьезополупроводниковые преобразователи с запирающим или диффузионным слоем (в диапазоне частот 50-300 МГц), пленочные преобразователи (на частотах выше 100 МГц). Гиперзвуковые волны часто возбуждаются с поверхности пьезоэлектрического звукопровода, торец которого для этих целей помещают в зазор СВЧ-резонатора или замедляющую СВЧ-систему. Для возбуждения и приема ПАВ используются главным образом встречно-штыревые преобразователи, представляющие собой периодическую структуру металлических электродов, нанесенных на пьезоэлектрический кристалл. На основе перечисленных элементов создаются различные акустоэлектронные устройства.

**Литература**

1. Щука А.А. Функциональная электроника: Учебник для вузов: - М.: МИРЭА, 1998.

2. Викторов И. А. «Звуковые поверхностные волны в твердых телах», М., 1991.

3. «Поверхностные акустические волны». Под редакцией А.Олинера, Москва : Мир 1981.

4. Рычина, Т.А. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы / Т.А. РЫЧИНА, А.В. ЗЕЛЕНСКИЙ. – М. : РАДИО И СВЯЗЬ, 1989. – 352 С.

5. Свитенко, В.Н. Электрорадиоэлементы: курсовое проектирование : учебное пособие для вузов / В.Н. Свитенко. – М. : Высшая школа, 1987. – 207с.