

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

534.321.9(023)

АКУСТИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ *)

Г. Кайно, Дж. Шоу

Ультразвуковые электронные приборы — новый класс электронных устройств обработки информации, способных запоминать и распознавать сигналы, отделять один сигнал от другого и выполнять другие операции, обычно доступные только ЭВМ.

В 1885 г. лорд Рэлей теоретически исследовал акустические волны, распространяющиеся вдоль поверхности Земли и возникающие при землетрясении. В последнее время эти акустические «поверхностные» волны стали широко исследовать с целью создания на их основе устройств обработки сигналов в системах связи. В этих устройствах электрические сигналы преобразуются в акустические поверхностные волны, или, как их теперь называют, — в рэлеевские волны, распространяющиеся по поверхности кристалла, имеющего длину обычно порядка сантиметра и толщину один-два миллиметра **). Акустические поверхностные волны могут быть непосредственно использованы для различной обработки сигналов: разделения сигналов, усиления слабых сигналов, запоминания сигналов с целью их дальнейшего исследования через некоторое время и т. д. Более того, с помощью акустических поверхностных волн можно производить и такие операции, как распознавание сигналов известной формы, что очень трудно сделать с помощью электронных устройств.

Все мы хорошо знакомы с обычными звуковыми волнами в частотном диапазоне от 50 до 15 000 гц. Легко возбудить звуковые волны еще более высокой частоты, и эти ультразвуковые волны распространяются в жидкостях и твердых телах так же, как и обычные звуковые волны. Ультразвуковые волны частотой до нескольких миллионов герц применяются для обнаружения объектов под водой и для исследования внутренней структуры тел (аналогично рентгеновским лучам). Сравнительно недавно

*) Gordon S. Kino, John Shaw, Acoustic Surface Waves, Scientific American 227 (4), 50 (October 1972). Перевод А. В. Медведя.

Гордон С. Кайно является профессором электротехники, Джон Шоу — старшим научным сотрудником Стэнфордского университета США и директором Лаборатории микроволновой физики.

**) Рэлеевская волна является не единственным возможным типом поверхностных акустических волн, которые могут распространяться вдоль поверхности однородного твердого тела. Недавно Ю. В. Гуляевым в СССР и независимо Дж. Блэштейном в США был теоретически предсказан новый тип поверхностных акустических волн в пьезоэлектрических материалах — чисто сдвиговые поверхностные волны (волны Гуляева — Блэштейна, как их называют в литературе), которые затем были экспериментально обнаружены советскими и французскими учеными и сейчас широко исследуются. (Прим. перев.)

Г. Бёммель и К. Дрансфельд в лаборатории фирмы «Белл телефон» показали, что ультразвуковые волны частотой в миллиард герц и выше могут распространяться в твердых телах на расстояния в несколько сантиметров. Можно было бы думать, что благодаря тому, что звук вызывает механическую вибрацию кристалла, силы трения приведут к сильному затуханию звука, если частота вибраций станет слишком большой. Оказывается, однако, что для очень твердых кристаллов, таких, например, как сапфир, затухание распространяющихся в нем звуковых волн остается поразительно малым вплоть до частот 10^{10} гц. В настоящее время акустические устройства работают и на такой частоте.

Первыми акустическими устройствами, работающими на частоте выше 10^7 гц, явились линии задержки, «запоминающие» сигнал и воспроизводящие его через некоторое время. В последние несколько лет начали исследовать акустические волны ВЧ диапазона для использования их во многих других устройствах: устройствах обработки и распознавания сигналов, сканирования визуальной информации в виде фотографий, рисунков и в устройствах для усиления электрических сигналов.

Благодаря тому, что скорость акустических волн обычно в 10^5 раз меньше скорости света, акустические волны очень подходят для использования их в линиях задержки. Электрический сигнал, проходящий через кабель длиной в один километр, испытывает задержку 3 мксек — время, требуемое на прохождение сигналом расстояния от одного конца кабеля до другого. Если точно такой же сигнал «запустить» в акустическую линию задержки на поверхностных волнах, представляющую собой небольшую кристалл кварца, скорость распространения волны в котором только 3 км/сек, то эта же задержка в 3 мксек будет получена в структуре длиной всего лишь 1 см.

Старым примером, где нужна обработка информации и где для этой цели хорошо подходит акустическое устройство на поверхностных волнах, является телетайпный аппарат, соединенный с телеграфной линией. По мере прохождения сигналов по телеграфной линии аппарат «задерживает» их, пока все точки и тире, представляющие отдельную букву или число, не будут приняты, после чего делается «решение» и печатается соответствующий знак на бумаге. Имеется и еще одна задержка — на время, пока все сообщение не будет напечатано; лишь после этого кто-либо должен прочесть это сообщение и принять решение на основании его.

В современной системе обработки данных скорость поступления информации в сто миллионов раз больше. Последовательность данных поступает в форме, напоминающей точки и тире телетайпного аппарата, только отдельные «биты» во много раз короче и по-другому закодированы. Последовательность данных может содержать около 10 000 таких бит информации в тысячную долю секунды, и решение о том, печатать или нет эту последовательность, должно быть сделано электронным устройством за тысячную долю секунды. Механическое печатающее устройство совершенно не в состоянии справиться с такой задачей, так же как и человеческий мозг. Для этой цели необходимо электронное считывающее устройство, способное выполнять соответствующие операции в тысячную долю секунды. Для распознавания сигнала это устройство должно получить все 10 000 бит и сравнить их с реперным сигналом. Только после этого устройство вырабатывает команды «выходной сигнал» или «нет выходного сигнала», означающие, что сигнал совпадает или не совпадает с реперным. В следующую тысячную секунду устройство вырабатывает решение относительно следующих 10 000 бит информации и т. д. Для того чтобы можно было обрабатывать информацию таким образом, необходимо задержать и запомнить сигнал на такое время, пока все 10 000 бит информации

не будут приняты. И именно здесь раскрываются возможности и преимущества акустических линий задержки на поверхностных волнах, которые

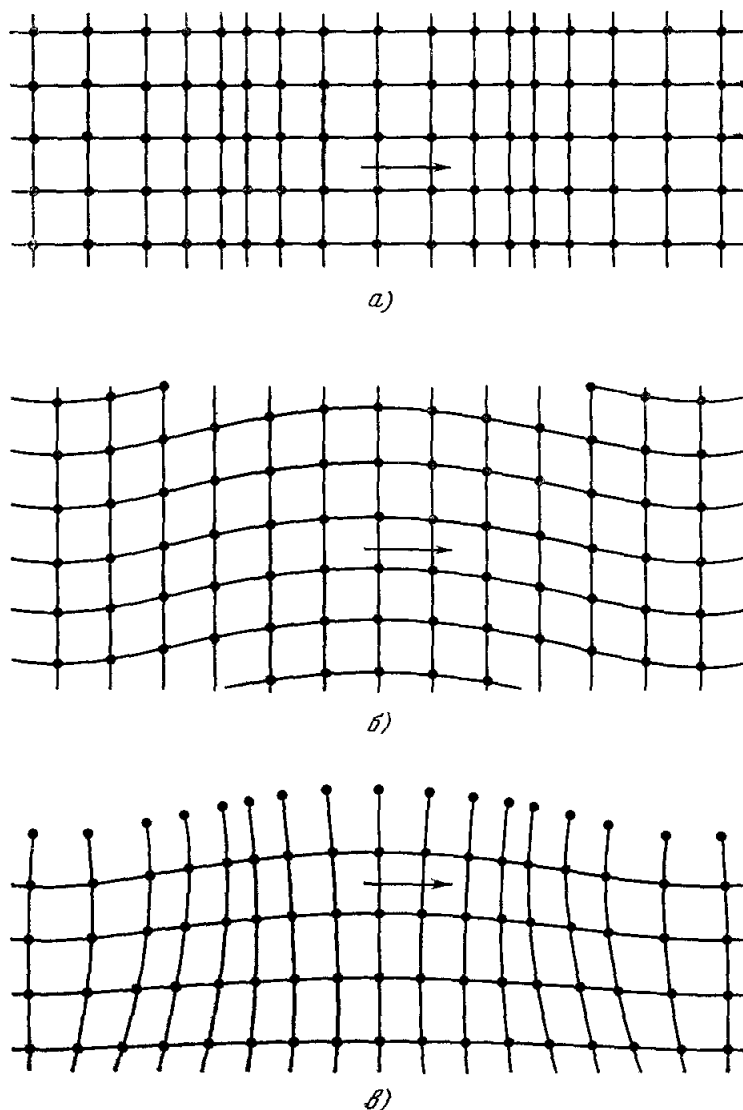


Рис. 1. а) Продольная волна — простейший вид акустической волны, распространяющейся в упругом материале (материал при прохождении этой волны испытывает попеременное сжатие и растяжение); б) поперечная волна — или сдвиговая волна — представляет собой другой способ распространения акустической энергии в твердом теле (частицы твердого тела осциллируют в направлении, перпендикулярном к направлению распространения волны); в) рэлеевская волна (акустическая поверхностная волна) — более сложный тип волны, который может существовать только вблизи свободной поверхности твердого тела (волна имеет две компоненты — продольную и поперечную).

могут быть использованы не только для запоминания сигнала, но и для распознавания определенных сигналов и сравнения одного сигнала с другим.

Рассмотрим свойства некоторых наиболее важных типов упругих волн, которые могут распространяться в твердом теле. Простейшим

типом упругой волны является продольная волна, при распространении которой среда испытывает попеременные сжатие и растяжение. Вторым типом акустических волн является поперечная или сдвиговая волна. Частицы твердого тела при распространении этой волны совершают колебательное движение в направлении, перпендикулярном к направлению распространения волн.

Третьим принципиальным типом волн является рэлеевская волна, распространяющаяся вдоль свободной поверхности твердого тела. Рэлеевская волна содержит продольную и поперечную компоненты механического смещения, что необходимо для удовлетворения граничных условий на свободной поверхности — равенства нулю нормальной к поверхности твердого тела компоненты механической силы. Эта волна обладает определенным сходством с волнами, распространяющимися по поверхности воды в пруду (рис. 1) *).

ВОЛНЫ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

В первых акустических приборах, применявшихся в электронике, использовались продольные либо сдвиговые волны, распространяющиеся в толще твердого тела. Эти приборы были названы устройствами на объемных волнах. Большое преимущество рэлеевских, а также и всех других типов поверхностных акустических волн по сравнению с объемными заключается в том, что рэлеевская волна, распространяясь вдоль поверхности, доступна на всем пути распространения, и, таким образом, для изготовления акустических устройств на рэлеевских волнах как нельзя лучше подходит технология изготовления микросхем в тонких плоских структурах. В типичных применениях большая часть энергии поверхностной волны локализована в тонком, порядка сотни микрон, приповерхностном слое кристалла. Эти волны легко возбуждаются и принимаются в любой точке поверхности кристалла. Поэтому гораздо проще сконструировать линию задержки на акустических волнах, распространяющихся по поверхности кристалла, чем на волнах, распространяющихся в его объеме. Кроме того, благодаря доступности рэлеевской волны на всем пути ее распространения, на ней может быть сделана линия задержки с отводами, с которых снимаются сигналы, имеющие разное время задержки.

До недавнего времени вообще было не ясно, стоит ли заниматься поверхностными акустическими волнами. В начале не было даже эффективных способов преобразования электрических сигналов в акустические поверхностные волны. Существовала опасность, что неоднородности поверхности кристалла и примыкающий к ней слой воздуха будут в значительной степени рассеивать энергию волны. К счастью, это рассеяние оказалось не столь существенным.

Изучение физики поверхностных звуковых волн и их технических приложений быстро двинулось вперед после того, как был создан электро-механический преобразователь встречно-штыревого типа — устройство, эффективно преобразующее электрический сигнал в поверхностную звуковую волну и обратно.

*) Четвертым принципиальным типом поверхностных акустических волн являются сдвиговые поверхностные волны в пьезоэлектрических материалах, где выполнение граничных условий на свободной поверхности обеспечивается наличием электрических полей, вызванных пьезоэффектом. Если на поверхности твердого тела лежит тонкий (порядка длины акустической волны) слой материала с меньшей скоростью звука, чем в подложке, то вдоль такой поверхности возможно распространение чисто сдвиговых поверхностных акустических волн. Выполнение граничных условий обеспечивается наличием указанного слоя другого материала. (Прим. перев.)

Преобразователь встречно-штыревого типа обычно помещается на поверхность пьезоэлектрического материала. Механические напряжения в таких материалах вызывают внутренние электрические поля. В свою очередь электрические поля, приложенные к таким материалам,

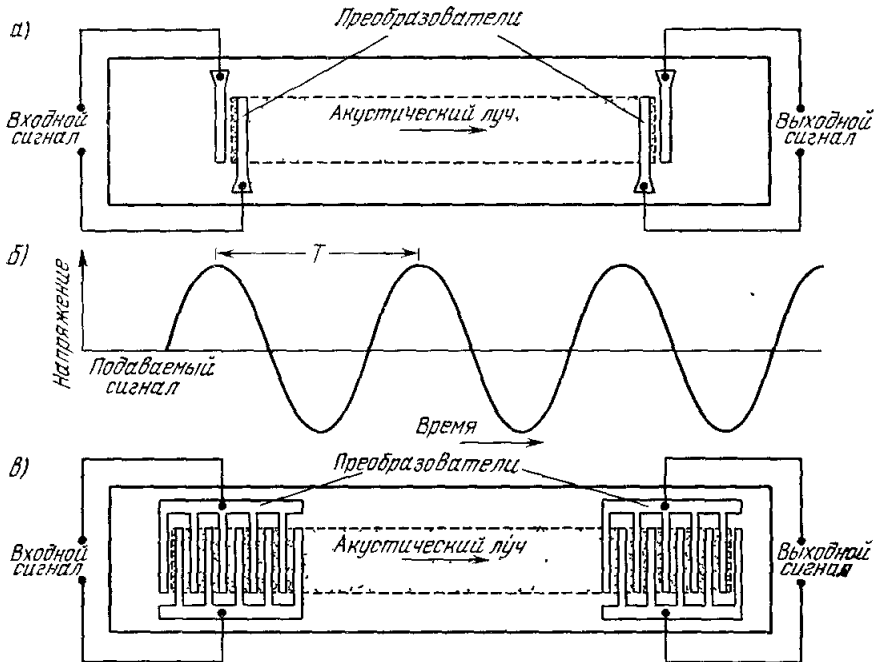


Рис. 2. Возбуждение и прием рэлеевских волн могут быть осуществлены с помощью простого преобразователя, состоящего из двух металлических электродов, нанесенных на пьезоэлектрический кристалл (а).

Когда на входные электроды подается синусоидальный электрический сигнал (б), переменные электрические поля вызывают вибрации материала, вследствие чего происходит генерация рэлеевских волн. Когда волны достигают выходных электродов, между ними возникает переменное напряжение — происходит прием рэлеевских волн. Если входные электроды имеют форму двух вложенных друг в друга гребешков (в), то волны, возбуждаемые каждой парой электродов, будут усиливать друг друга, если время, необходимое на прохождение волной расстояния между соседними парами электродов, будет соответствовать частоте электрического сигнала. Если выходная система электродов имеет такое же расстояние между соседними электродами, как и входная, то она будет «настроена» для приема проходящих акустических волн данной частоты.

вызывают в них механические напряжения. Приложенное к пьезоэлектрическому материалу переменное поле будет вызывать в нем механические колебания той же частоты, возбуждая звуковую волну.

Требуемое электрическое поле на поверхности пьезоэлектрического кристалла может быть создано электрическим напряжением, приложенным к двум параллельным металлическим электродам, нанесенным на поверхность кристалла. Переменный электрический сигнал, поданный на электроды, возбуждает поверхностную акустическую волну, которая с помощью другой пары подобных электродов может быть опять преобразована в электрический сигнал. Одной пары электродов недостаточно для эффективного возбуждения акустической волны, поэтому обычно в качестве преобразователя используют несколько пар электродов, расположенных один за другим и образующих систему электродов встречно-штыревого типа (рис. 2). Преобразователь конструируется таким образом, что поверх-

ностные волны, возбужденные каждой отдельной парой электродов, складываются в фазе, усиливая друг друга и давая довольно большой акустический сигнал. Это достигается выбором расстояния между парами электродов так, чтобы ралеевская волна проходила это расстояние в точности за время, равное периоду изменения возбуждающего сигнала. Как легко понять, если частота сигнала отклонится от значения, определенного приведенным выше условием, то волны, возбужденные каждой отдельной парой электродов, уже будут не в фазе и будут стремиться частично или полностью погасить друг друга.

Чем длиннее преобразователь и, следовательно, чем больше число электродов, тем при меньшем отклонении частоты сигнала волна, генерируемая на одном конце преобразователя, погасит волну, генерируемую

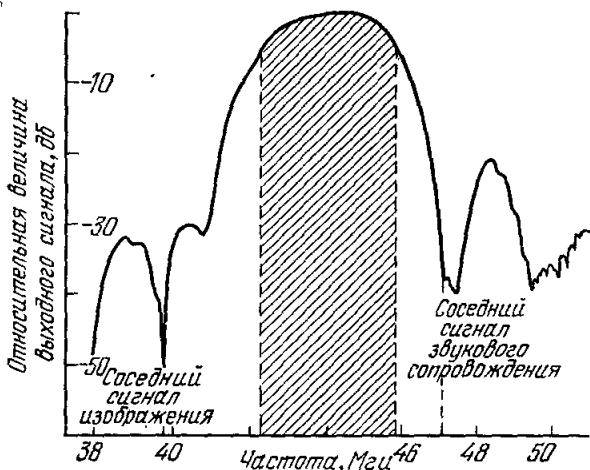


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика прототипа фильтра телевизионных сигналов, показанного на рис. 4.

Сигнал в телевизионном приемнике, настроенном на определенный канал, преобразуется в «промежуточный» сигнал другой частоты вблизи 45 Мгц. Промежуточный сигнал затем подается на фильтр, который убирает сигналы соседних каналов. На рисунке видно, что фильтр на акустических поверхностных волнах дает полосу пропускания шириной около 4 Мгц (на рисунке заштриховано) с резкой отсечкой частот, лежащей вне этой полосы.

далее в сигнал промежуточной частоты и поступает на другой фильтр, который, помимо отфильтровывания сигналов соседних каналов, отделяет сигнал изображения от сигнала звукового сопровождения (рис. 3).

Размеры преобразователей встречно-штыревого типа, используемых для возбуждения и приема акустических поверхностных волн, очень малы. Например, преобразователь для возбуждения волны частотой 40 Мгц (в районе этой частоты обычно выбирают промежуточную частоту телевизионных приемников) должен иметь ширину отдельных электродов, не превышающую двадцати микрон, и расстояние между соседними электродами такого же порядка. Для возбуждения волн частотой 10^9 гц размеры преобразователя должны быть уменьшены еще в 25 раз.

Структуры таких размеров могут быть изготовлены с помощью фотолитографии, в настоящее время уже хорошо разработанной и обычно применяемой при производстве транзисторов. На практике преобразователи изготавливают путем вакуумного напыления золота или алюминия на поверхность кристалла через маску. Маска же изготавливается

на другом конце. Следовательно, длинные преобразователи эффективны только в узкой полосе частот и могут служить фильтром, отделяющим сигналы одной частоты от сигналов другой частоты. И наоборот, короткий преобразователь всего с несколькими электродами пригоден для возбуждения сигналов в более широкой полосе частот.

Фильтры такого типа нужны для систем связи. Так, например, в телевизионном приемнике необходимо разделение телевизионных программ, каждая из которых идет на своей частоте. Поэтому нужны фильтры, соответствующие по частоте каждому телевизионному каналу. Сигнал данного канала в приемнике преобразуется

путем 100-кратного фотографического уменьшения увеличенного макета преобразователя. Таким образом, с помощью сравнительно простых и

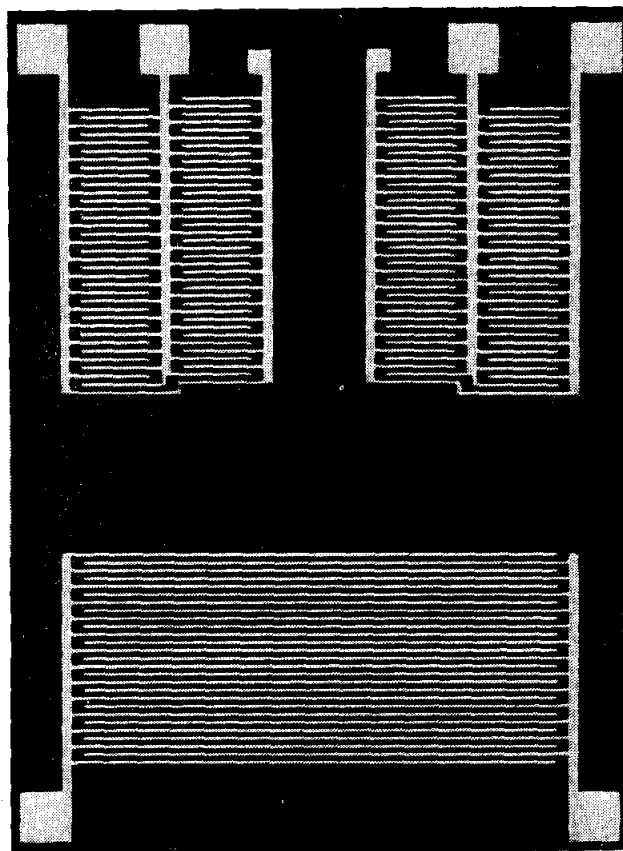


Рис. 4. Изображенный фильтр телевизионного сигнала на поверхностных акустических (рэлеевских) волнах служит для того, чтобы обеспечить пропускание желаемого телевизионного сигнала и отсеять сигналы по соседним каналам.

Длинные, тонкие структуры, похожие на вложенные друг в друга гребешки, представляют собой электромеханические преобразователи встречно-штыревого типа, изготавливаемые путем напыления металла через соответствующие маски на пьезоэлектрический материал. Такие длинные электромеханические преобразователи встречно-штыревого типа используются для генерации и приема акустических поверхностных волн в узкой полосе частот. В устройстве, изображенном на рисунке, расстояние между штырями преобразователя составляет 20 мкм, или 0,02 мм, что соответствует длине акустической волны с частотой около 45 Мгц. Этот фильтр телевизионных сигналов был создан фирмой «Зенит радио корпорэйшн» группой научных сотрудников во главе с Л. Де-Вризом.

недорогостоящих фотографических методов можно изготовить большое количество идентичных фильтров.

КРИСТАЛЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Впервые возбуждение поверхностных акустических волн с помощью преобразователей встречно-штыревого типа было осуществлено группой исследователей фирмы «Белл телефон» и Р. М. Уайтом в Калифорнийском университете. В первых экспериментах в качестве пьезоэлектрического материала использовался кварц.

Мощность возбуждаемых акустических волн при этом была низкой, так как константа электромеханической связи, характеризующая эффективность связи электрического и акустического сигналов, для кварца довольно мала. Позже Кэмпбелл и Джонс из «Хьюдженс эйркрафт компани» теоретически показали, что очень эффективным для возбуждения рэлеевских волн будет ниобат лития — новый пьезоэлектрический кристалл, впервые выращенный в фирме «Белл телефон».

Мы провели ряд экспериментов с образцами этого нового материала, выращиваемого в наших лабораториях в Стэнфордском университете.

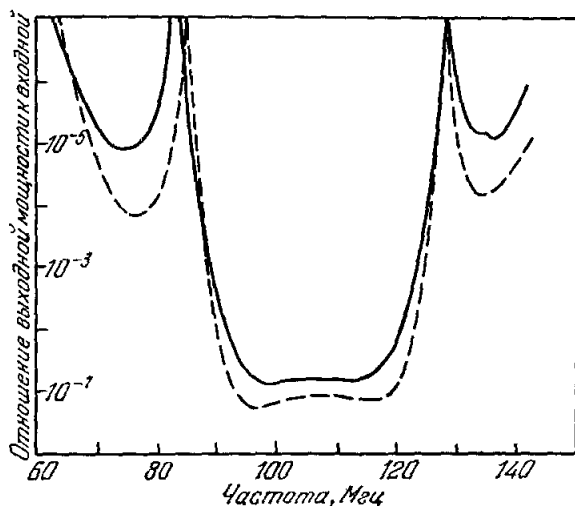


Рис. 5. Отношение выходной мощности к входной для линии задержки из ниобата лития с преобразователями встречно-щтыревого типа.

Дается сравнение экспериментальных результатов (сплошная кривая) с теоретической кривой (штриховая). Возбужденная акустическая поверхностная волна обычно распространяется в двух взаимно противоположных направлениях, в силу чего выходного преобразователя достигает лишь половина акустической мощности. Аналогично, только половина акустической мощности, достигшей выходного преобразователя, может быть преобразована в электрический сигнал. Таким образом, максимальный возможный сигнал на выходе будет в четыре раза слабее входного сигнала. Тем не менее можно сконструировать и более эффективные преобразователи.

Как и следовало ожидать, когда вместо кварца берется ниобат лития, эффективное возбуждение волны может быть достигнуто с помощью преобразователя с небольшим числом электродов. Поэтому полоса частот, в которой эффективно работает преобразователь, для ниобата лития может быть значительно шире, чем для кварца.

Амплитудно-частотные свойства преобразователя можно легко изменять, варьируя расстояния между элементами и длину отдельных электродов. Например, если расстояние между электродами плавно изменяется от одного конца преобразователя к другому, то электроды, находящиеся ближе друг к другу, будут возбуждать волны более высокой частоты, а электроды, отстоящие дальше друг от друга, — волны более низкой частоты. Таким образом, такой преобразователь может возбуждать сигналы различной частоты и его рабочая полоса может быть сделана весьма широкой.

В настоящее время конструируются акустические фильтры с очень сложными частотными свойствами. В телевизионных приемниках и радиоприемниках такие сложные фильтры изготавливаются на основе настраиваемых электрических цепей, содержащих индуктивности и емкости. В последнее время предприятия, изготавливающие телевизионную аппаратуру, начали изучать возможность замены некоторых настраиваемых узлов телевизионных приемников фильтрами на акустических поверхностных волнах. Причина этого заключается в том, что собранный из обычных деталей телевизор требует еще ручной пастройки всех контуров. Узлы же на поверхностных акустических волнах могут быть изготовлены

сразу с большой точностью и воспроизводимостью с помощью фотолитографии — той самой, которая применяется для изготовления интегральных схем и транзисторов для современных телевизоров. Некоторые предприятия в настоящее время ведут разработку акустических приборов для этих целей, и полученные ими результаты показывают, что параметры таких приборов уже весьма близки к желаемым (см. рис. 4).

ФУНКЦИИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Интерес промышленности к устройствам на акустических поверхностных волнах во многом обусловлен потенциальной возможностью применения этих устройств для обработки сигналов — операции значительно более сложной, чем простая фильтрация сигналов. Большие возможности

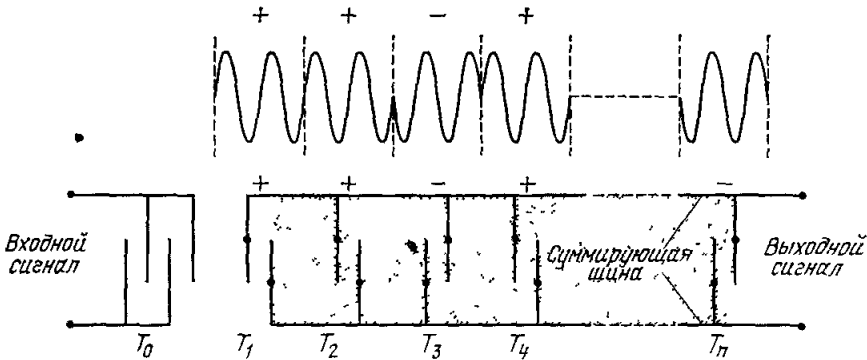


Рис. 6. Многоотводная линия задержки на акустических поверхностных волнах, используемая для распознавания цифрового кода бифазного типа (вверху).

С помощью преобразователя T_0 входной сигнал преобразуется в акустическую поверхностную волну соответствующего профиля в пространстве, которая движется вправо вдоль оси линии задержки. В этом примере сигнал содержит в каждом импульсе два периода синусоиды. Разная полярность импульсов соответствует «+» и «-» и обозначает «1» и «0» двоичного кода. Акустический сигнал снимается преобразователями T_1, \dots, T_n , которые преобразуют его в электрический сигнал и подают на суммирующую шину. Преобразователи могут быть подключены к суммирующей шине двояким образом, соответствующим «+» и «-», как показано на рисунке. Если полярность импульса совпадает с полярностью преобразователя, то с этого преобразователя будет сниматься максимальный сигнал, в противном случае снимаемый сигнал будет минимальным. В случае, изображенном на рисунке, полярность всех импульсов сигнала совпадает с полярностью соответствующих преобразователей и на суммирующей шине возникает импульс максимальной величины. Отношение амплитуды максимального выходного сигнала к амплитуде входного сигнала называется усилением при обработке. В ближайшем будущем величина этого усиления может быть получена порядка 1000.

для обработки сигналов открывают преобразователи встречно-штыревого типа, так как, задавая геометрию электродов и расстояния между ними, легко изготовить преобразователь, например, отводящий часть акустического сигнала в определенной точке. Можно сконструировать преобразователь, который будет настроен только на сигнал определенной формы. Рассмотрим теперь два важных примера применения акустических устройств: 1) многоотводная линия задержки, которая реагирует на определенный цифровой код, 2) преобразователь с изменяющимся расстоянием между электродами, который реагирует только на сигнал определенной формы.

Типичная многоотводная линия задержки состоит из серии преобразователей, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга вдоль пути звукового сигнала (рис. 6). Сигнал в форме короткого импульса подается на входной преобразователь, расположенный на одном конце линии задержки. Каждый преобразователь многоотводной линии вырабатывает выходной электрический импульс, по мере того как под ним проходит входной акустический сигнал. Соединив все выходные преобразова-

тели вместе единым образом, мы получим на выходе серию последовательных импульсов, соответствующих «1» двоичного кода.

Чтобы получить серию импульсов, часть которых будет иметь обратную полярность (т. е. представлять «0» двоичного кода), достаточно соответствующие преобразователи включить наоборот.

Таким образом, можно возбуждать кодированный цифровой сигнал, состоящий из дискретных импульсов, следующих друг за другом, полярность которых можно менять произвольным образом. И наоборот, если

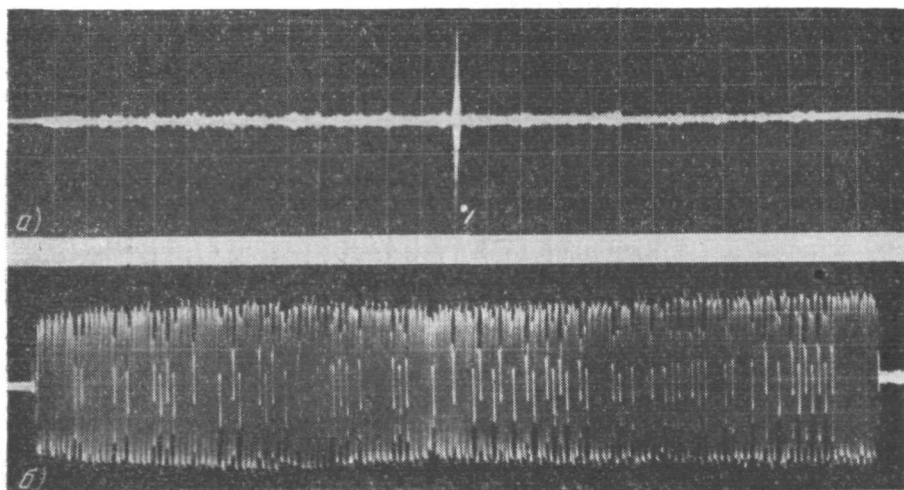


Рис. 7. Осциллограммы выходных сигналов многоотводной линии задержки, изображенной на рис. 6.

Осциллограмма б) изображает выходной сигнал, когда на вход линии задержки подан короткий радиочастотный импульс. Изменения фазы, соответствующие различной полярности индивидуальных преобразователей, видны здесь как прорезы в огибающей сигнала. Длительность этого выходного сигнала равна 25,4 мксек — максимальному времени задержки линии. Эта многоотводная линия задержки на ниобате лития имеет 127 выходных преобразователей. Осциллограмма а) — это осциллограмма выходного сигнала, когда на вход подается сигнал, изображенный на осциллограмме б). Видно, что в этом случае на выходе имеется всего лишь один большой короткий импульс, показывающий, что изменения полярностей входного сигнала полностью соответствует изменению полярностей выходных преобразователей, т. е. это как раз тот случай, когда сигнал «распознан». Выходной импульс, возникающий в результате такого распознавания сигнала, длится всего лишь около 0,25 мксек, что соответствует сжатию входного сигнала в 100 раз. Амплитуда выходного сигнала больше амплитуды входного приблизительно в 100 раз. Этот эксперимент по распознаванию сигналов был выполнен группой Т. У. Бристоля в «Хьюджес эйркрафт компани».

на вход линии задержки подать такой кодированный цифровой сигнал, то выходной сигнал будет иметь большую величину только в случае полного соответствия полярностей импульсов входного сигнала и полярностей включения преобразователей (другими словами, когда линия задержки настроена на тот же код, что и входной сигнал). Когда код входного сигнала не соответствует коду линии задержки, выходной сигнал будет мал. Увеличение амплитуды сигнала на выходе линии по сравнению с амплитудой сигнала, снимаемого с отдельного преобразователя, называется усилением при обработке.

В настоящее время можно получить величину этого усиления порядка 1000. На языке математики, выходной сигнал многоотводной линии задержки есть кросс-корреляция входного сигнала и геометрической картины, образованной выходными преобразователями (рис. 7).

Такое устройство можно сделать программируемым, поставив между каждым преобразователем и выходной шиной переключателя, изменяющие полярность их подключения. Эти переключатели конструируются на осно-

ве полупроводниковых микросхем, и имеют размеры, не превышающие размеров самой линии задержки. Поэтому представляется принципиальная возможность создать быстродействующие устройства обработки сигналов, содержащие сотни или тысячи отводов, быстро перестраиваемых для работы с любым произвольным сложным сигналом и обрабатывающие сигналы с большим усилением. Эти устройства смогут распознать любой нужный код среди множества других цифровых кодов даже в присутствии значительного «шума». Устройство вырабатывает команду «да», если приходит сигнал нужного кода, и «нет», если поступающий сигнал имеет другой код, причем оно превращает сигналы, состоящие из многих импульсов,

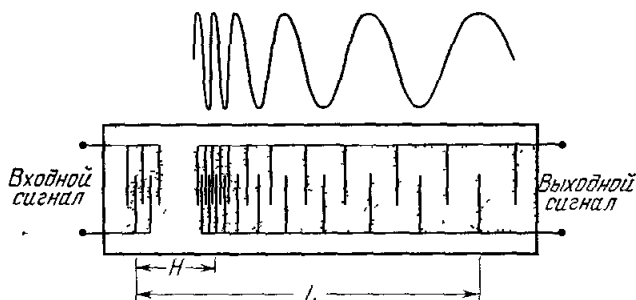


Рис. 8. Импульсный сигнал с линейным во времени изменением частоты (вверху).

Подбирая должным образом расстояния между электродами выходного преобразователя, можно сконструировать линию задержки, которая сжимала бы протяженный во времени сигнал с изменяющейся частотой в короткий мощный импульс. Малые расстояния между электродами в левой части преобразователя соответствуют высоким частотам «левой» части сигнала. Аналогичное соответствие имеется между частотой правой части сигнала и расстояниями между электродами на правом конце преобразователя. Таким образом, в изображенном здесь случае имеется полное соответствие между входным сигналом и выходным преобразователем, и на выходе устройства будет сниматься короткий мощный импульс. Такая конфигурация линии задержки позволяет принимать передний и задний фронты протяженного импульса одновременно, сосредоточивая энергию в коротком сжатом выходном импульсе. Длина акустического пути для высокочастотной части сигнала равна H , а для низкочастотной — L . Сигналы с линейно изменяемой во времени частотой часто используются в радарных установках.

или бит, в сигнал, состоящий только из одного бита, который и представляет собой нужную выходную информацию.

Область применения этих устройств весьма широка, так как они относятся к общему классу устройств распознавания образов. Устройства этого класса уже используются в радарных системах. Например, если работает одновременно несколько радарных установок, каждая из которых имеет свою собственную форму посылаемого сигнала, то с помощью устройства распознавания каждая радарная установка будет принимать сигналы только своей формы. Кроме того облегчается выделение сигналов из естественного шума. Одним из очевидных применений таких устройств являются системы регулирования воздушного движения. А именно, контроллер воздушного движения должен иметь прибор, который быстро и точно распознавал бы специфический сигнал каждого самолета, который входит в сферу его действия. Принцип распознавания образов может быть применен также для распознавания букв алфавита в электронных читающих устройствах.

Вторым важным примером обработки сигналов с помощью акустических поверхностных волн является детектирование аналогового сигнала постоянной амплитуды с линейно меняющейся во времени частотой (рис. 8).

Если частота сигнала, заполняющего импульс, возрастает со временем, как в звуке, издаваемом птицей, то такой сигнал называют «чири-

кающим» импульсом. С сигналами такой формы часто имеют дело в радарных системах при радиолокации удаленных объектов.

Для увеличения разрешающей способности радара импульс с изменяющейся частотой желательнее «сжать» в один короткий импульс, время прихода которого может быть измерено с высокой точностью. Такое сжатие можно осуществить с помощью акустического преобразователя, в котором зазор между электродами меняется по его длине таким образом, что его левая часть чувствительна к высоким частотам сигнала, а правая — к низким (в предположении, что импульс движется с левой стороны). Другими словами, преобразователь должен соответствовать акустической волне с изменяемой частотой. На выходе такого устройства возникает сильный и короткий электрический импульс в то время, когда взаимное положение акустической волны и преобразователя будут такими, когда часть акустического сигнала, имеющего большую частоту, будет находиться под электродами с меньшим зазором, а часть акустического сигнала с меньшей частотой — под электродами с большим межэлектродным расстоянием. Это является еще одним примером кросс-корреляции входного сигнала и геометрической картины, образованной электродами преобразователя. Преобразование длинного входного сигнала в очень короткий выходной сигнал является общим свойством этой корреляции. Говорят, что такой прибор производит сжатие импульсов.

Трудно переоценить значение метода сжатия импульсов для радарных и сонарных систем, требующих очень точного измерения времени прихода отраженного от объекта сигнала. Еще большее значение имеет этот метод для систем, которые не только определяют расстояния до исследуемого объекта, но и разрешают его отдельные геометрические детали. В первых радарных установках использовались очень короткие радиоимпульсы, в силу чего трудностей по точному измерению времени прихода эхо-импульсов не возникало. Для того чтобы установки могли работать в присутствии шумов и помех, требовались короткие импульсы очень большой мощности. Теперь же, благодаря устройствам обработки сигналов, можно использовать более длинные и менее мощные импульсы, с последующим их преобразованием на входе в короткие и достаточно большие сигналы. Степень сжатия, определяемая как отношение длительностей входного и выходного сигналов, в настоящее время может быть получена порядка 1000. Такое сжатие позволяет увеличить не только разрешающую способность по дальности, но и дальность действия систем. Например, когда имеют дело с очень слабыми эхо-сигналами, как это имеет место при локации Луны, метод сжатия импульсов может быть весьма эффективным при отделении полезного сигнала от шумового фона. Очень полезен метод сжатия и при исследовании живого организма с помощью ультразвукового локатора. Этот метод позволяет работать с очень малой мощностью (чтобы не принести вреда организму), не уменьшая разрешающей способности локатора, и позволяет избавиться от интерференционных сигналов. Метод сжатия очень полезен также в применении к транзисторным источникам излучения, где получить длинные и сравнительно маломощные импульсы гораздо проще и дешевле, чем короткие и мощные.

УВЕЛИЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ

В настоящее время с помощью устройств на акустических поверхностных волнах без особых трудностей можно получить величину задержки сигналов порядка нескольких десятков микросекунд. Такая величина задержки соответствует длине звукопровода порядка 10—20 см. Однако

в некоторых приложениях требуются величины задержки на много порядков больше. Одним из таких приложений является более экономичная передача телевизионных сигналов. Полный кадр телевизионного изображения воспроизводится электронным лучом, пробегающим по экрану телевизора строка за строкой 525 раз (625 раз в советской телевизионной системе.— *Перев.*) в течение одной тридцатой доли секунды. Иногда бывает нужно, например, в учебных телепрограммах, передавать в течение нескольких минут неподвижное изображение, скажем, страницу книги; для этого достаточно передать это изображение один раз, в течение одной тридцатой доли секунды, а потом повторять этот кадр еще столько раз, сколько будет нужно. Осуществить такую передачу изображения можно с помощью циклической линии задержки, в которой сигнал распространяется по замкнутому пути, проходя один оборот за одну тридцатую долю секунды так, чтобы информация, соответствующая каждой точке кадра, выводилась из линии задержки через одну тридцатую долю секунды. Таким образом, время, в течение которого идет неподвижное изображение, может быть использовано для передачи другой информации по этому же каналу связи, что обеспечивает более эффективное использование самой системы связи.

В принципе, можно и «движущиеся» телевизионные изображения передавать по более узкополосным и более дешевым каналам связи. Для этого нужно сравнивать каждый последующий кадр с предыдущим, запоминаемым линией задержки, и передавать не кадры целиком, а лишь разность между двумя последовательными кадрами.

Недавно в нашей лаборатории и в других исследовательских учреждениях с помощью циклических линий задержки была получена задержка сигнала на несколько миллисекунд. Такая линия задержки представляет собой кристалл с закругленными торцевыми гранями, и поверхностная волна циркулирует много раз по его внешней поверхности. При соответствующем расположении входного преобразователя волна будет распространяться либо по замкнутому пути, либо по спирали (рис. 9). Если грани и закругления такого кристалла будут отполированы с оптической точностью, то волны по нему будут распространяться с малыми потерями. Нами была проведена серия экспериментов с кристаллами германата висмута — пьезоэлектрического материала, дающего приблизительно в два раза большую задержку на единицу длины, чем ниобат лития. Мы работали с образцами германата висмута, имеющими длину 20 см, которые изготовлялись из слитков, поставленных нам фирмой «Отопетикс дивижн ов Норс Американ авиэйшн». Время задержки, получаемое на таком кристалле за один виток, составляет около 200 мксек.

В наших экспериментах нам удалось «заставить» звуковой сигнал совершать по поверхности кристалла около 15 оборотов (по замкнутому либо спиральному пути), что соответствует времени задержки 2,5 мсек. Большого времени задержки в такой системе получить не удалось из-за

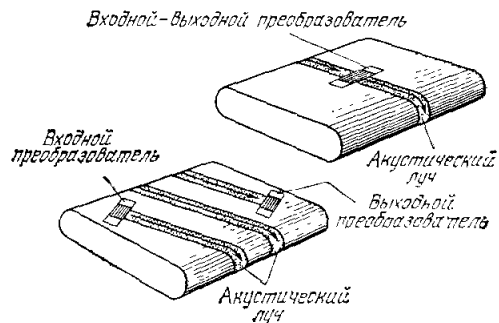


Рис. 9. Циклические линии задержки позволяют удлинить путь акустических поверхностных волн.

Если путь акустической волны представляет собой замкнутую петлю, то волна будет многократно проходить по одному и тому же пути, на каждом витке проходя под преобразователем. Для увеличения объема памяти без увеличения рабочей поверхности кристалла преобразователь ставится под небольшим углом, в силу чего волна будет распространяться по спиральной линии. Снимающий информацию преобразователь может быть расположен в любом месте на пути акустической поверхностной волны.

ослабления звукового сигнала в результате геометрических неточностей закругленных граней, дифракционного расширения звукового луча и диссипативных потерь распространения. Однако, применив специальный акустический усилитель, восстанавливающий звуковой сигнал после каждого оборота до его первоначального уровня, нам удалось достичь 120 витков на германате висмута и 400 витков на небольшом кристалле ниобата лития (рис. 10). Этот метод позволил получить задержку в 20 мсек, что почти достаточно для запоминания информации целого телевизионного кадра.

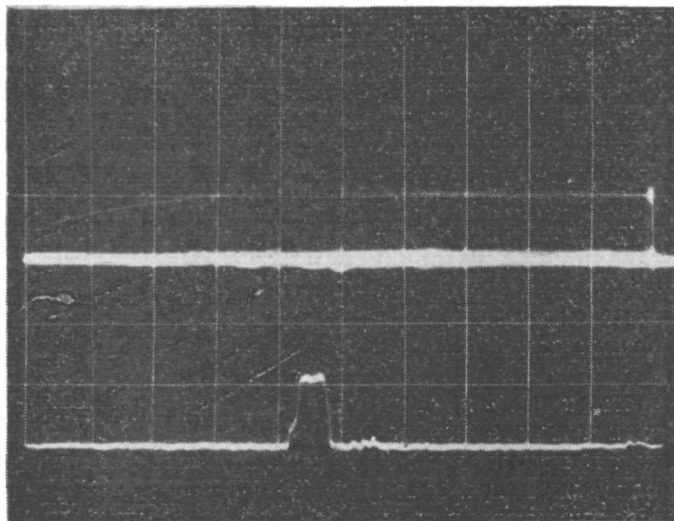


Рис. 10. Циклическая линия задержки замкнутого типа.

На линию задержки подается прямоугольный сигнал длительностью 1 мсек. За один оборот сигнал задерживается на 25 мсек. На каждом витке акустический сигнал усиливается и снимается преобразователем. Электрический сигнал, снимаемый с преобразователя, имеет форму короткого импульса (см. правую часть верхней осциллограммы). Тонкая верхняя линия на этой осциллограмме представляет собой вершины сотен импульсов, получаемых на каждом витке. Общая задержка получается порядка 0,01 сек. Видно, что эта линия выходит на горизонтальный участок; это свидетельствует о том, что усилитель как раз компенсирует акустические потери в линии задержки. На нижней осциллограмме показан «растянутый» выходной импульс. Видно, что прямоугольная форма входного импульса хорошо сохраняется даже после задержки на 0,01 сек и прохождения акустическим сигналом сотен раз через усилитель. В таких системах были получены времена задержки до 0,02 сек

Задержка в две сотых секунды сравнима с задержкой сигнала в телефонной линии связи между восточными и западными берегами США. В такой линии связи через каждые 30 км необходимо ставить усилители для восстановления уровня сигналов до первоначальной величины. Величина общей задержки, получаемой в циклической линии задержки с усилением, ограничивается из-за того, что присущий системе шум на частотах, отличных от частоты сигнала на каждом витке, будет усиливаться и в конечном итоге возрастет до недопустимо большой величины.

Акустический луч, распространяясь по поверхности кристалла, из-за дифракционных эффектов будет стремиться расширяться, как это имеет место при распространении светового луча. Расхождение звукового луча является серьезной проблемой для простейших спиральных линий задержки, поскольку ушедший от своей оси звуковой поток на каком-нибудь промежуточном витке может попасть на выходной преобразователь. Несколько лет назад Э. Эш с сотрудниками в Лондонском университетском колледже показали, что акустическую поверхностную волну все

же можно заставить распространяться без расхождения; для этого нужно, чтобы волна распространялась вдоль узкой бороздки или вдоль полоски металла, нанесенной на поверхность кристалла (рис. 11).

В конечном итоге для создания очень длинных линий задержки потребуются такие акустические волноводы. В настоящее время акустические волноводы активно исследуются во многих лабораториях. Результаты исследований обнадеживающие.

МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Рассмотрим теперь, каким образом можно усиливать акустические поверхностные волны. Внутренний усилитель не только нужен в длинных линиях задержки для поддержания уровня сигнала, но он может быть также использован и для устранения нежелательных отраженных сигналов, возникающих при отражениях от входного преобразователя и различных электродов в многоотводных системах. Примененные для этих целей внутренние усилители обладают явными преимуществами перед внешними (например, транзисторными) усилителями.

Для получения усиления акустической волны нужно заставить электрическое поле, связанное с акустической поверхностной волной, взаимодействовать с движущимися электронами. Если электроны движутся быстрее акустической волны, то они будут замедляться электрическим полем волны, отдавая при этом часть своей энергии волне и тем самым увеличивая ее амплитуду. Если же электроны движутся медленнее акустической волны, то наблюдается обратная картина: волна ускоряет электроны, отдавая им часть своей энергии, т. е. амплитуда волны уменьшается. Оба эти эффекта полезны и могут быть использованы: первый — для усиления акустических поверхностных волн, второй — для подавления нежелательных интерференционных сигналов.

Проще всего взаимодействие акустической поверхностной волны с электронами можно получить в пьезоэлектрическом материале, который в то же время является и полупроводником (например, сульфид кадмия). Усиление рэлеевских волн в сульфиде кадмия первым продемонстрировал Р.М. Уайт, — тот самый Уайт, который сконструировал преобразователь встречно-штыревого типа.

В нашей лаборатории мы также занимались подобными акустическими усилителями на основе сульфида кадмия. Правда, наши исследования относились к усилению объемных волн: нами был накоплен довольно солидный опыт в этой области. Мы знали, что сульфид кадмия обладает такими недостатками, как плохая воспроизводимость и плохие полупроводниковые свойства, в том смысле, что для разгона электронов до скоро-

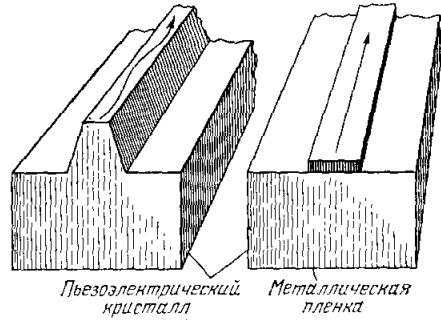


Рис. 11. Акустические волноводы очень часто бывают нужны в акустических устройствах для предотвращения расхождения акустического луча из-за дифракции.

Один из типов акустического волновода изготавливается механическим путем или с помощью химического про травливания выступа на поверхности пьезоэлектрического кристалла. Акустическая волна распространяется тогда вдоль дорожки, образованной этим выступом. Второй тип акустического волновода (справа) изготавливается нанесением на поверхность кристалла пленки более плотного материала, золота. Эта пленка будет уменьшать скорость акустической поверхностной волны. Замедлить поверхностную волну можно и с помощью металлической пленки на поверхности, которая закорачивает электрические поля, сопровождающие акустические волны в пьезоэлектрическом кристалле. Пленка является как бы средой с большим коэффициентом преломления по сравнению с коэффициентом преломления окружающей среды. Таким образом, она будет стремиться сфокусировать волну и ограничить ширину акустического луча.

сти, при которой происходит усиление, необходимо затратить большое количество энергии.

Мы понимали, что необходимо будет использовать полупроводник с лучшими свойствами. Однако не так-то просто найти материал, который сочетал бы в себе большую константу электромеханической связи и хорошие полупроводниковые свойства.

В связи с этим возникла идея: нельзя ли разделить пьезоэлектрическую и полупроводниковую среды и изготовить усилитель, состоящий

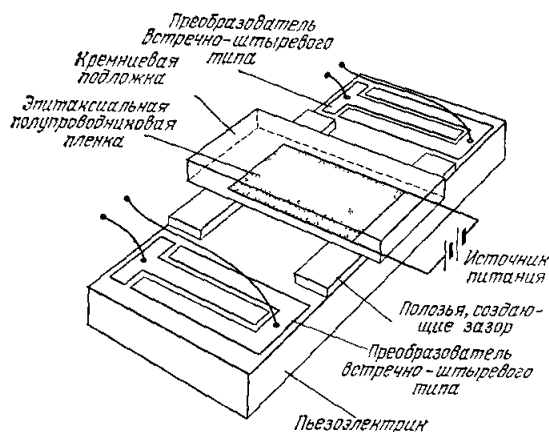


Рис. 12. Акустический усилитель может быть изготовлен путем прижатия кристалла кремния к поверхности пьезоэлектрического кристалла.

Акустическая поверхностная волна, распространяющаяся вдоль поверхности пьезоэлектрического кристалла, взаимодействует с дрейфующими электронами в кремнии.

Желательно, чтобы такая же, что и при изготовлении оптических пластин. В наших первых экспериментах мы использовали оптически полированные пластинки ниобата лития и кремния. Таким образом, мы впервые получили усиление рэлеевской волны, достаточное для компенсации потерь в преобразователях и при распространении волны вдоль звукопровода, и обеспечили чистое усиление электрического сигнала вход — выход.

В последующих экспериментах для создания такого воздушного зазора между полупроводником и ниобатом лития на поверхности последнего нанесли специальные ползья из монооксида кремния толщиной около 0,05 мкм. В качестве полупроводниковой среды использовалась пленка кремния толщиной около 1 мкм, выращенная на сапфировой пластинке толщиной 0,5 мм (пленки кремния на сапфире изготавливались фирмой «Отонетикс»). Сапфировая пластинка обладала достаточной упругостью, в силу чего с помощью специально сконструированной нами системы ее можно было плотно прижать к диэлектрическим ползьям вдоль всей их длины. Таким образом, между полупроводниковой пленкой

из хорошего полупроводника, такого, как кремний, и хорошего пьезоэлектрика, такого, как ниобат лития *).

И мы создали такой усилитель, поместив полупроводник очень близко к поверхности ниобата лития, вдоль которой распространялась рэлеевская волна. Для того чтобы электроны полупроводника взаимодействовали с поверхностной акустической волной, распространяющейся в пьезоэлектрике, необходимо, чтобы зазор между полупроводником и пьезоэлектриком был очень малым (порядка 0,05 мкм) и желательно равномерным. Поэтому точность обработки поверхности пьезоэлектрика и полупроводника долж-

*) Впервые идея о возможности усиления поверхностных звуковых волн в слоистой структуре пьезоэлектрик — полупроводник и количественная теория этого явления для простейшего случая поверхностных волн Лява в структуре «полупроводниковая пленка на поверхности пьезоэлектрика» (или, наоборот, «пьезоэлектрическая пленка на поверхности полупроводника») были даны в работе Ю. В. Гуляева и В. И. Пустовойта 1964 г. Кстати, в ней было вообще впервые привлечено внимание исследователей к проблеме взаимодействия с электронами именно поверхностных звуковых волн, оказавшихся впоследствии, как видно из этой статьи, наиболее перспективными в акустоэлектронике. (Прим. перев.)

и поверхностью ниобата лития создавался малый однородный зазор (рис. 12). Такой прибор позволил получить очень большую величину чистого усиления в широкой полосе частот. Для расчета характеристик такого усилителя нами была создана новая теория, учитывающая наличие воздушного зазора различной толщины и справедливая для различных материалов, из которых можно изготовить усилитель. Теоретические результаты удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными (рис. 13 и 14).

По мере развития наших работ мы пришли к выводу, что устройства с механически разделенными полупроводником и пьезоэлектриком неудобны в обращении; требуется очень тщательная полировка и плоскостность поверхностей полупроводника и пьезодиэлектрика. И было бы гораздо

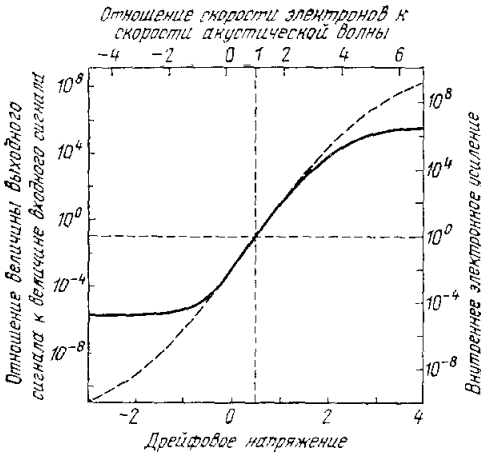


Рис. 13. Экспериментально полученная характеристика усилителя (сплошная кривая) типа показанного на рис. 12 хорошо согласуется с теоретической (штриховая кривая).

Величина чистого усиления радиосигнал — радиосигнал отсчитывается по левой вертикальной шкале, а величина внутреннего электронного усиления — по правой шкале. Так как существуют потери мощности при преобразовании электрического сигнала в акустический и обратно, величина чистого усиления всегда меньше величины внутреннего электронного усиления. Усиление имеет место тогда, когда скорость электронов превышает скорость акустической волны. Величина усиления отрицательна, когда скорость электронов меньше скорости акустической волны или когда дрейф электронов направлен навстречу движению акустической волны.

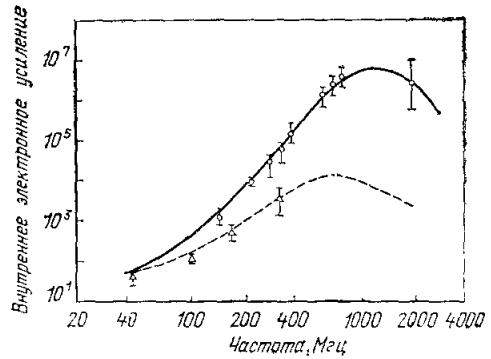


Рис. 14. Зависимость величины внутреннего электронного усиления от частоты для двух монокристаллических усилителей.

Сплошная кривая представляет собой теоретически рассчитанную зависимость для усилителя на ниобате лития; экспериментальные результаты даны кружками. Штриховая кривая представляет теоретическую зависимость для усилителя на германате висмута; экспериментальные результаты даны треугольниками. Вертикальные отрезки на экспериментальных кружках и треугольниках дают величины ошибок эксперимента.

лучше, если бы можно было нанести полупроводник прямо на поверхность ниобата лития методом испарения полупроводника в вакууме*), т. е. таким же методом, каким мы уже изготовляли преобразователи.

Большинство работ по вакуумному испарению относилось к полупроводниковому материалу антимониду индия. Все эти работы были выполнены для других целей, и материал имел несколько иные свойства, нас не удовлетворяющие. Но у нас были основания считать, что свойства этого материала могут быть изменены в нужную для нас сторону.

Наши первые эксперименты были совершенно обескураживающими. Получаемый нами антимонид индия имел значительно большую концен-

*) Впервые усиление поверхностных звуковых волн в таком монокристаллическом усилителе, состоящем из эпитаксиальной пленки сульфида кадмия (пьезоэлектрик) на германовой подложке (полупроводник), было получено в Институте радиотехники и электроники АН СССР Ю. В. Гуляевым с сотрудниками в 1969 г. (Прим. перев.)

трацию электронов, чем было нужно. Имело место также загрязнение его ниобатом лития. И как следствие этого, наши результаты очень сильно менялись от образца к образцу. Акустоэлектрическое взаимодействие, которое нам все-таки удалось получить, было едва заметным.

В конце концов наша технология получения антимоноида индия улучшилась. Мы обнаружили, например, что можно защитить пленку антимоноида индия от загрязнения, поместив между ней и ниобатом лития пленку

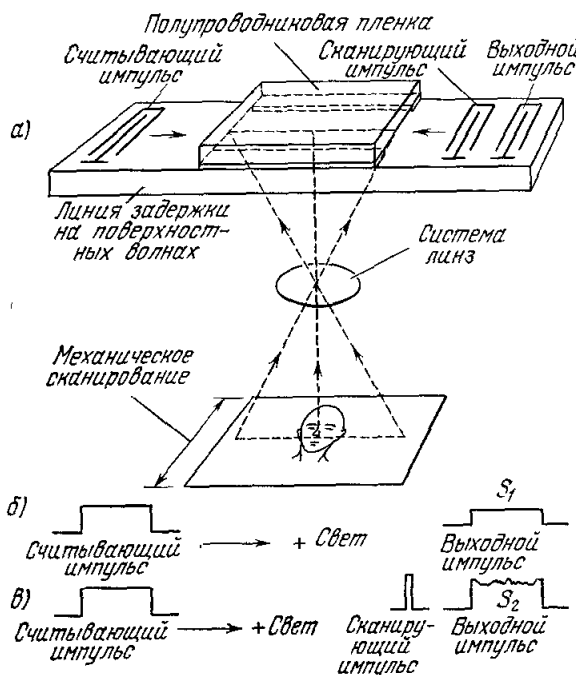


Рис. 15. Проецирование световой картины на акустическое устройство меняет выходные характеристики этого устройства.

На рисунке а) схематически представлено устройство для считывания оптического изображения с помощью акустической поверхностной волны, сконструированное К. Ф. Куэйтом. Два импульса — один сравнительно длинный (считывающий импульс), другой — покороче (сканирующий импульс) — подаются на преобразователи, расположенные на двух противоположных концах устройства. Эти два сигнала возбуждают поверхностные волны, распространяющиеся навстречу друг другу и проходящие одна через другую под полупроводниковой пленкой кремния через малый воздушный зазор, примыкающий к акустической линии задержки. Свет от объекта фокусируется на полупроводниковой пленке с помощью системы линз. В присутствии света (б) считывающий импульс снимается на выходе устройства как сигнал S_1 , который повторяет форму считывающего импульса и имеет лишь несколько уменьшенную амплитуду. Когда в устройство вводится сканирующий импульс (в), он перемещает часть фотоэлектронов от поверхности в глубь полупроводника, тем самым уменьшая электронное поглощение акустической поверхностной волны в том месте, где сканирующий акустический импульс перекрывается со считывающим акустическим импульсом. На выходе устройства будет сниматься сигнал S_2 , амплитуда которого изменяется в соответствии с изменением интенсивности света вдоль полупроводниковой пленки.

Можно было ожидать, что взаимодействие акустических поверхностных волн с полупроводниками даст не только эффект усиления, но и еще ряд полезных эффектов. Нашему коллеге К. Ф. Куэйту пришла в голову мысль, а нельзя ли использовать уже известное для тонких пленок полупроводника явление фотопроводимости. Действи-

тельно, если под действием освещения меняется проводимость полупроводника, то должно наблюдаться и изменение взаимодействия электронов полупроводника с акустической поверхностной волной. В настоящее время мы можем изготавливать усилители с большими коэффициентами усиления порядка 10^8 на сантиметр активной длины и на частотах вплоть до $1,3 \cdot 10^9$ гц. Такие усилители, по-видимому, являются предвестниками новых практических приборов. Эти усилители являются также важным инструментом в исследовании свойств полупроводников, так как величина усиления акустических волн непосредственно зависит от дрейфовой скорости электронов.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СО СВЕТОМ

Можно было ожидать, что взаимодействие акустических поверхностных волн с полупроводниками даст не только эффект усиления, но и еще ряд полезных эффектов. Нашему коллеге К. Ф. Куэйту пришла в голову мысль, а нельзя ли использовать уже известное для тонких пленок полупроводника явление фотопроводимости. Действи-

кремниевой пленке акустоэлектрического усилителя различные профили освещенности, изменили по своему желанию проводимость полупроводника. Они догадались, что если в таком усилителе будет распространяться короткий акустический импульс, то он будет «чувствовать» локальные изменения проводимости пленки полупроводника, вызванные локальными изменениями интенсивности освещения. В устройстве Куэйта навстречу



Рис. 16. Изображение на экране осциллоскопа, полученное с помощью устройства, приведенного на рис. 15.

Сканирующий импульс двигался по проекции оригинального фотоснимка в горизонтальном направлении, а система линз двигалась в перпендикулярном направлении сверху вниз.

первому короткому звуковому импульсу посылается вторая акустическая поверхностная волна — считывающая волна. Амплитуда считывающей волны модулируется первым, коротким звуковым импульсом (он называется сканирующим) в той точке, где обе эти волны проходят друг сквозь друга. Механизм модуляции амплитуды считывающего звукового импульса сканирующим импульсом основан на поперечном акустоэлектрическом эффекте, впервые открытом Ю. В. Гуляевым с сотрудниками в СССР.

Для проверки своей гипотезы Куэйт с сотрудниками провел эксперимент, в котором на полупроводник было спроектировано оптическое изображение (рис. 15). На выходе устройства снимался сигнал, являющийся функцией времени. Этот сигнал затем подавался на осциллоскоп, который позволял превратить электрический сигнал в световой и наглядно продемонстрировать принцип считывания (рис. 16). Важность этого результата заключается в демонстрации того, что с помощью простого акустического импульса можно осуществить развертку строки изображения, подобно тому как это делает электронный луч в современной передающей телевизионной системе. Нетрудно догадаться, как этот метод может быть обобщен для считывания нескольких параллельных строк одна за другой, как это требуется в телевизионной системе. Таким образом, оказалось, что возможны совершенно новые, далеко идущие применения акустических поверхностных волн, о которых на заре развития первых акустических линий задержки никто не мог и думать.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ

В устройстве считывания оптической информации акустические волны взаимодействуют нелинейным образом, остальные же устройства, описанные нами выше, работают на основе линейных эффектов. Линейность обычно означает то, что если на вход устройства подаются два сигнала,

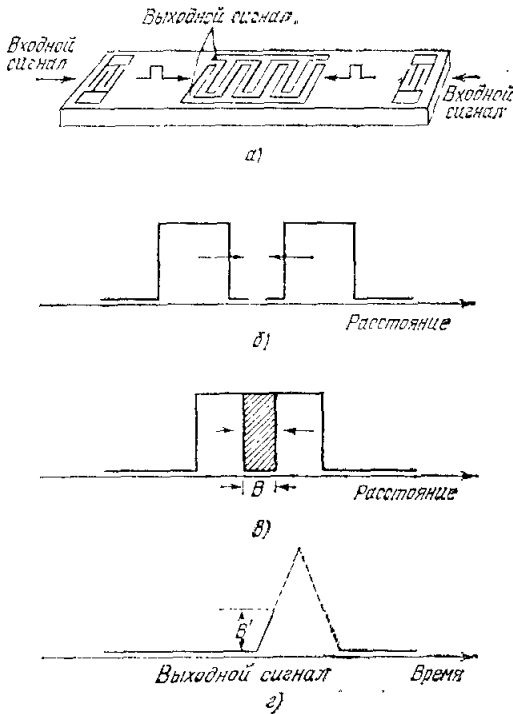


Рис. 17. Нелинейная обработка сигнала осуществляется путем ввода двух сигналов с противоположных концов акустического устройства (а) и вывода сигнала, представляющего собой математическую свертку двух входных сигналов, со среднего преобразователя.

Два прямоугольных импульса в виде акустических волн приближаются друг к другу (б) и начинают перекрываться (в). Сигнал на выходе (г) начинает возникать в тот момент, когда два акустических сигнала начинают «соприкасаться». Когда входные сигналы перекрываются на величину B , выходной сигнал достигает величины B' . Выходной сигнал достигает максимума тогда, когда два входных акустических сигнала перекрываются полностью. Затем величина выходного сигнала начинает уменьшаться. Таким образом, величина выходного сигнала пропорциональна величине заштрихованной области на рисунке в). Выходной сигнал называется сверткой двух входных сигналов.

подать опорный сигнал требуемого кода на линию задержки, которая в этом случае не имеет специальных преобразователей, отвечающих данному коду. Таким образом, здесь можно легко менять код и, следовательно, выполнять с помощью такого устройства много различных операций обработки информации.

*) Недавно весьма эффективное нелинейное взаимодействие поверхностных звуковых волн было продемонстрировано Рузьером с сотрудниками (Франция) для случая сдвиговых поверхностных волн Гуляева — Блэштейна. (Прим. перев.)

на выходе будет сниматься сигнал, пропорциональный простой сумме этих двух сигналов. При малых уровнях сигналов это так и происходит. При возрастании уровня сигнала начинают проявляться другие эффекты. На выходе будет появляться сигнал, пропорциональный произведению двух сигналов, в силу чего один из сигналов на выходе будет изменяться под действием другого. Такое взаимодействие называется нелинейным.

Нелинейности этого типа наблюдаются в пьезоэлектрических материалах. Эти нелинейности существенно усиливаются, если пьезоэлектрик спарить с полупроводником, как это имеет место в сканирующем устройстве Куэйта. Впервые такое нелинейное взаимодействие двух поверхностных акустических волн в пьезоэлектрическом кристалле было продемонстрировано Л. О. Свасандом в Норвежском техническом университете *). Применение этих нелинейных эффектов для обработки сигналов еще ранее было предложено Куэйтом и продемонстрировано им на объемных акустических волнах в линии задержки из ниобата лития. Он показал, что при использовании указанных нелинейных эффектов для распознавания данного сигнала отпадает необходимость в преобразователе специальной формы. Вместо этого достаточно

Недавно мы продемонстрировали такой способ обработки сигналов на поверхностных акустических волнах, распространяющихся навстречу друг другу и возбуждаемых электрическими сигналами с помощью преобразователей, расположенных на противоположных концах устройства (рис. 17). Благодаря нелинейным свойствам материала в каждой точке будет генерироваться сигнал, пропорциональный произведению двух входных сигналов. Этот сигнал может быть снят с помощью достаточно длинного преобразователя, размещенного между двумя входными преобразователями. Наблюдаемая амплитуда выходного сигнала будет зависеть не только от амплитуды произведения входных сигналов, но и от активной длины материала, на которой эти два входных сигнала перекрываются, проходя друг сквозь друга. Таким образом, для двух идентичных входных сигналов амплитуда выходного сигнала будет возрастать по мере возрастания степени перекрытия входных сигналов, достигая максимума при полном их перекрытии, и затем опять начнет убывать. Поэтому если на вход устройства подаются два импульса прямоугольной формы, то сигнал, снимаемый на выходе, будет иметь треугольную форму. Формирование выходного сигнала идет таким образом, как будто бы сначала выполняется математическая операция умножения двух сигналов, а затем интегрирование полученного результата, т. е. выполняется операция, называемая сверткой двух сигналов. Оказывается, что выходной сигнал максимален в том случае, когда входные сигналы являются зеркальным отображением друг друга во времени. Таким образом, получается, что один из сигналов служит как бы опорным кодом для другого сигнала.

В наших экспериментах мы использовали сигналы с цифровым кодом, известным под названием кода Баркера. Если один из кодированных сигналов был зеркальным (во времени) отображением другого и импульсы обоих кодированных сигналов перекрывались, то на выходе появлялся сигнал большой амплитуды (рис. 18). Если же коды этих двух сигналов перекрывались не полностью, то на выходе устройства появлялась серия всплесков равной, но малой амплитуды. Таким образом, можно распознать, когда приходит сигнал данного баркеровского кода, подавая

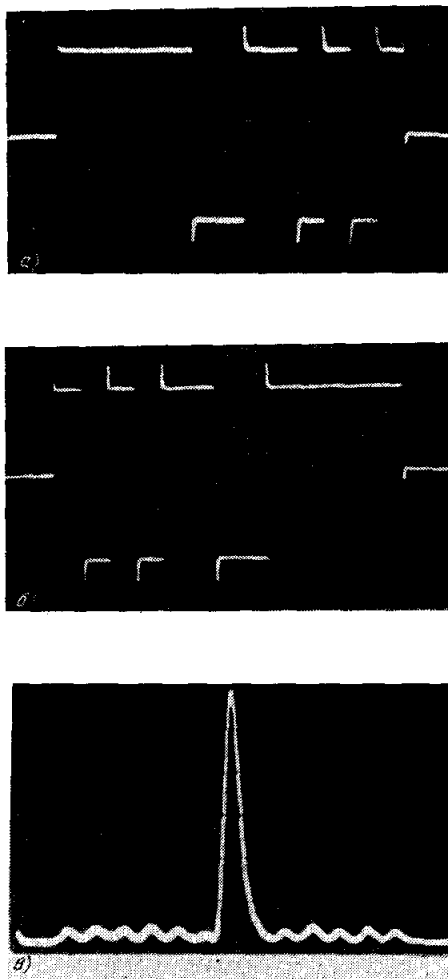


Рис. 18. Нелинейная обработка цифровых кодов позволяет распознавать кодированный входной сигнал.

В данном случае два входных сигнала, известных под названием кодов Баркера, являются зеркальным отображением друг друга (а и б). Когда входные кодированные сигналы полностью перекрываются, на выходе появляется большой сигнал в форме короткого импульса (в). Таким образом, можно установить, совпадает ли код сигнала с данным кодом или нет.

в устройстве опорный сигнал, являющийся зеркальным отображением искомого баркеровского кода. Появление на выходе устройства сигнала большой амплитуды свидетельствует о том, что принят желаемый сигнал.

Очень часто нужно знать, насколько близко совпадает неизвестный сигнал с некоторым данным сигналом, т. е. нужно вычислять функцию кросс-корреляции. Для вычисления такой функции нам нужно иметь зеркальное отображение данного сигнала, чтобы можно было использовать его в качестве опорного кодового сигнала в нашем устройстве. Таким образом, мы должны уметь обратить сигнал во времени. Казалось бы, что такая операция будет противоречить принципу причинности. Однако если мы сможем сначала сигнал «запомнить» на некоторое время, т. е. иметь его целиком перед его временной инверсией, то такая операция будет вполне выполнимой.

Мы получили зеркальное отображение сигнала во времени, подавая его на один из входных преобразователей и подавая очень короткий импульс

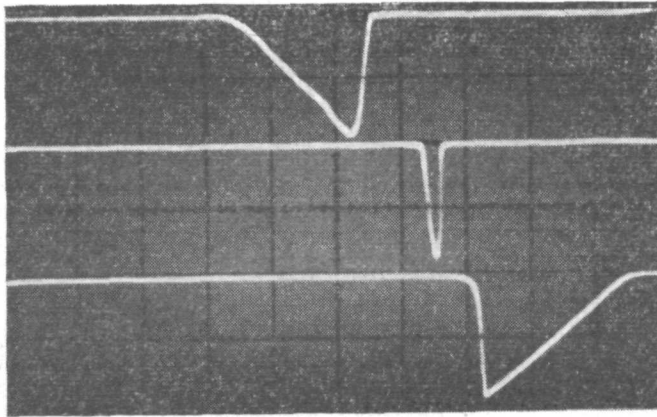


Рис. 19. Инверсию электрического сигнала можно осуществить с помощью нелинейной обработки сигнала, используя для этой цели, например, устройство, изображенное на рис. 17, а.

Сигнал (верхняя осциллограмма) подается на преобразователь, расположенный с левой стороны устройства. Затем на центральный преобразователь подается очень короткий импульс (средняя осциллограмма). Обращенный во времени сигнал (нижняя осциллограмма) возникает на том же преобразователе, на который был подан входной сигнал.

на средний преобразователь. Этот короткий электрический сигнал подается на средний преобразователь тогда, когда под ним проходит входной акустический сигнал. При этом возникает сигнал, пропорциональный интегралу произведения входного сигнала и короткого импульса, т. е. форма этого сигнала будет такая же, как и входного сигнала. Этот сигнал генерируется в виде акустической поверхностной волны, которая может распространяться в двух взаимно противоположных направлениях. Конструкция нашего устройства позволяла принимать сигнал, движущийся в обратном направлении, т. е. снова к входному преобразователю. Таким образом, та часть сигнала, которая пришла к среднему преобразователю последней, придет к входному преобразователю первой, и наоборот, часть сигнала, пришедшая к среднему преобразователю первой, достигнет входного преобразователя последней. Следовательно, на входном преобразователе возникает сигнал, соответствующий зеркальному отображению во времени первоначального сигнала (рис. 19).

Используя нелинейные процессы, можно распознавать любые сигналы. Можно также получать временную инверсию произвольного сиг-

нала. Это означает, что мы можем выполнять теперь множество и других сложных операций, которые обычно очень трудно выполнить без применения электронно-вычислительной машины. Кроме того, целые математические операции, эквивалентные умножению и интегрированию, могут быть теперь выполнены в маленьком кристалле за время, сравнимое с длительностью сигнала.

Таким образом, применение акустических поверхностных волн привело к усовершенствованию и улучшению работы многих существующих устройств, позволило производить некоторые операции обработки информации, которые раньше были очень трудоемкими или совсем не выполняемыми. Существует целый ряд акустических явлений, которые еще не достаточно исследованы. Например, в настоящее время ведутся исследования методов возбуждения акустических поверхностных волн в стекле, кремнии и других пьезоактивных материалах. Для возбуждения поверхностной волны в таких материалах обычно поверх преобразователя встречно-пштыревого типа наносят пленку пьезоэлектрического материала, такого, например, как окись цинка. С развитием этих методов станет возможным изготавливать очень дешевые акустические приборы на основе стекла и других подобных ему материалов. Кроме того, научившись возбуждать звук в кремнии, станет возможным сочетать акустические устройства с целым рядом полупроводниковых устройств, изготавливаемых в виде кремниевых интегральных схем, и продолжать на более высоком уровне исследования взаимодействий акустических поверхностных волн с полупроводниками. Очевидно одно, что акустические методы обработки информации находятся еще в начальной стадии своего развития.

ЛИТЕРАТУРА

- I. A. V i k t o r o v, Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications, N.Y., Plenum Press, 1967.—Special Issue on Microwave Acoustics of IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques MTT-17, No. 11, November 1969.—Microwave Acoustics, Microwave J. 13, No. 3, March 1970.—R. M. W h i t e, Surface Elastic Waves, Proc. IEEE 58, 1238 (1970) (см. перевод: ТИИЭР 58 (1970)).