

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации "Акустоэлектроника"

(30 марта 2005 г.)

30 марта 2005 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации "Акустоэлектроника". На сессии были заслушаны доклады:

1. **Гуляев Ю.В.** (Институт радиотехники и электроники РАН, Москва). *Акустоэлектроника (исторический обзор)*.

2. **Алексеев С.Г., Гуляев Ю.В., Котелянский И.М., Мансфельд Г.Д.** (Институт радиотехники и электроники РАН, Москва). *Некоторые тенденции развития акустоэлектроники сверхвысоких частот*.

3. **Анисимкин И.В., Анисимкин В.И.** (Институт радиотехники и электроники РАН, Москва). *Многомодовые акустические датчики и системы*.

Краткое содержание докладов публикуется ниже.

PACS numbers: 01.65.+g, 72.50.+b, 73.50.Rb

Акустоэлектроника (исторический обзор)

Ю.В. Гуляев

1. Введение

Акустические (звуковые) волны (АВ) высокой частоты (более 20 кГц) — "ультразвук" — уже давно используются в различных областях науки и техники. Два важных свойства АВ — относительно низкая скорость распространения (в 10^5 раз меньше скорости света), а также простота и высокая эффективность возбуждения в пьезоэлектрических материалах — обусловили их применение в радиотехнике и электронике. Линии задержки на объемных акустических волнах (ОАВ) используются в радиотехнике многие десятки лет. Не менее хорошо известны и другие устройства, использующие ОАВ в пьезоэлектрических материалах, — кварцевые резонаторы для стабилизации частоты. Оба этих устройства представляют собой широко известные примеры применения АВ (ультразвука) в радиоэлектронных системах обработки и передачи информационных сигналов.

Многие ученые и инженеры внесли свой вклад в эту область (см. книги А.В. Шубникова [1], У. Кеди [2], У.П. Мезона [3], Б. Олда [4] и др.). Перечисление всех конкретных имен заняло бы очень много места и, кроме того, есть вероятность кого-либо не упомянуть, что всегда болезненно.

Однако я хочу особо отметить выдающийся вклад советских ученых до начала 1960-х годов, который иногда недооценивается, и рискну, со скидкой на выше-сказанное и личные знания автора, назвать ряд имен. Это (в произвольном порядке) — А.В. Шубников, И.Г. Шапошников, С.А. Соколов, А.Г. Соколинский, Л.М. Бреховских, Л.Э. Гуревич, С.Г. Калашников, И.М. Лифшиц, Л.А. Шувалов, И.Г. Михайлов, В.А. Красильников, Г.К. Ульянов, С.С. Каринский, К.Н. Козловский, Л.К. Зарембо, Л.Д. Розенберг, С.И. Солуян, А.Г. Смагин, М.И. Ярославский, В.С. Бондаренко, В.И. Эльшиц, А.И. Ахизер, М.И. Каганов, В.А. Шутлов, А.И. Смоленский, К.Н. Баранский, И.А. Викторов, В.Е. Лямов и многие другие¹.

Акустоэлектроникой в узком смысле этого слова с начала 1960-х годов² стали называть исследование эффектов, связанных со взаимодействием АВ со свободными электронами в твердых телах³. Что это за эффекты?

1. "Электронное" поглощение АВ.

2. Изменение скорости АВ из-за взаимодействия с электронной плазмой в твердом теле.

3. "Акустоэлектрический" эффект — увлечение электронов АВ и, как следствие, появление постоянного электрического напряжения или постоянного электрического тока в направлении распространения АВ.

¹ Уже в 1927 г. в Ленинграде прошла 1-я Всесоюзная конференция по пьезоэлектрическим колебаниям и их использованию для стабилизации частоты, на которой ведущими учеными страны из Москвы, Ленинграда, Н. Новгорода, Харькова были представлены результаты работ соответствующих лабораторий.

² По-видимому, впервые этот термин был официально признан на симпозиуме по ультразвуку в г. Сендаи (Япония) в 1966 г.

³ Вскоре акустоэлектроникой в широком смысле стали называть область науки и техники, изучающую и использующую взаимодействие высокочастотных акустических волн с электрическими полями и электронами в твердых телах.

Первые два эффекта были впервые исследованы И.Г. Шапошниковым [5] в 1941 г. и изучались затем многими авторами (см., например, обзоры [6, 7]). Третий эффект был открыт Р.Г. Парменером [8] в 1953 г. и детально исследован Г.Е. Беммелем [9], А.Б. Пиппардом [10], Г. Вайнрайхом [11] и др. (см. обзор [12]).

В 1956 г. К.Б. Толпыго и З.И. Урицким [13] и независимо Г. Вайнрайхом [14] была высказана идея о возможности усиления ОАВ сверхзвуковым дрейфовым потоком электронов. Этот эффект был впервые обнаружен и исследован экспериментально в 1961 г. А.Р. Хатсоном, Дж.Г. МакФи и Д.Л. Уайтом [15] в пьезоэлектрическом полупроводнике CdS. Полученное усиление было весьма велико; например, на частоте 45 МГц оно составляло 54 дБ см^{-1} .

Ввиду открывающейся принципиальной возможности создания новых типов полупроводниковых усилителей и генераторов эта работа вызвала бурный поток исследований акустоэлектронных явлений в твердых телах.

В 1962 г. многими теоретиками практически одновременно и независимо была построена линейная теория электронного поглощения и усиления звука в полупроводниках разных типов — пьезоэлектрических, непьезоэлектрических, многодолинных, с "горячими" электронами, магнитных и т.д. Это работы Д.Л. Уайта [16], Г.Н. Спектора [17], М.Е. Герценштейна и В.И. Пустовойта [18], В.Л. Гуревича [19, 20], Н. Микошибы [21], Р.Ф. Казаринова и В.Г. Скобова [22], А.Р. Хатсона и Д.Л. Уайта [23], В.Л. Гуревича и В.Д. Кагана [24], В.Л. Бонч-Бруевича и Ю.В. Гуляева [25] и др. (см. обзоры [6, 7, 26]).

Было показано, что механизм усиления АВ в "низкочастотном" случае, $kl \ll 1$, где k — волновое число АВ, l — длина свободного пробега электронов, подобен механизму усиления в лампе бегущей волны (ЛБВ). Пьезоэлектрическое поле АВ собирает электроны в сгустки, которые, двигаясь вместе с волной, оказываются либо на заднем (рис. 1а), либо на переднем (рис. 1б) склоне потенциальных ям, создаваемых АВ, — в зависимости от скорости дрейфа электронов V_d . В первом случае (рис. 1а), $V_d < V_{AB}$, АВ поглощается и затухает, во втором (рис. 1б), $V_d > V_{AB}$, усиливается⁴ (V_{AB} — скорость АВ).

В "высокочастотном" случае, $kl \gg 1$, механизм усиления АВ (которая может рассматриваться как поток когерентных фононов) представляет собой коллектив-

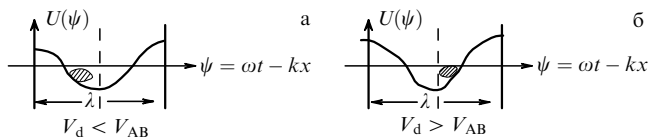


Рис. 1. Усиление акустических волн в полупроводниках сверхзвуковым дрейфом электронов: (а) $V_d < V_{AB}$ — "электронное" поглощение; (б) $V_d > V_{AB}$ — "электронное" усиление.

⁴ Условие усиления представляется в виде $V_d > V_{AB}$ только в простейшем случае. Вообще говоря, оно имеет вид

$$r \frac{V_d k}{k} > V_{AB},$$

где множитель r может быть как больше, так и меньше единицы и даже отрицательным (см., например, [27, 28]).

ное черенковское излучение фононов сверхзвуковыми электронами (см., например, [17]).

2. Акустоэлектронные явления на поверхностных акустических волнах

Вскоре, однако, стало ясно, что описанный выше красивый эффект усиления объемных АВ дрейфовым потоком электронов в пьезоэлектрическом полупроводнике трудно использовать практически. Дело в том, что подвижность электронов в хороших пьезополупроводниках (типа CdS, CdSe и др.) весьма мала ($\sim 200 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$), и чтобы получить скорость дрейфа электронов порядка скорости звука ($\sim 3 \times 10^5 \text{ см с}^{-1}$) необходимо приложить напряжение порядка нескольких киловольт. Из-за сильного джоулева перегрева такой усилитель может работать только в импульсном режиме.

В 1964 г. Ю.В. Гуляев и В.И. Пустовойт [29] предложили использовать поверхностные акустические волны (ПАВ) в слоистой структуре пьезоэлектрик — полупроводник (рис. 2). Известны три типа ПАВ, которые могут распространяться по гладкой свободной поверхности твердого тела (рис. 3, см., например, [4]). Благодаря электрическому полю, которое сопровождает ПАВ в пьезоэлектрике и которое выходит за пределы поверхности, ПАВ может взаимодействовать с электронами в соседнем полупроводнике. И наоборот, электрические поля в полупроводнике могут воздействовать на ПАВ через пьезоэффект. Так, если скорость дрейфа электронов в полупроводнике больше скорости ПАВ, то ПАВ будет усиливаться — практически в полном соответствии с механизмом усиления ЛБВ. Только теперь можно взять сильный пьезоэлектрик, не заботясь о его проводимости, и полупроводник с высокой подвижностью электронов, возможно и непьезоэлектрический.

По сути, основной вывод работы [29] состоял в том, что ПАВ в пьезоэлектрическом диэлектрике может взаимодействовать с электрическими полями и электронами в соседней проводящей среде, примыкающей к поверхности, на всем пути ее распространения.

Дальнейшее развитие эта идея получила в работе [30] (1965 г.), авторы которой Р.М. Уайт и Ф. Вольтмер предложили возбуждать ПАВ электрически с помощью периодической структуры из вложенных одна в другую гребенок металлических электродов на поверхности пьезоэлектрика (рис. 4) — так называемого встречно-штыревого преобразователя (ВШП). Период структуры равен длине волны, и к этим гребенкам прикладывается переменное напряжение с периодом, также равным периоду волны. Такая конструкция позволяет преобразовывать электрический сигнал в ПАВ с высокой эффективностью (потери менее 1 дБ).

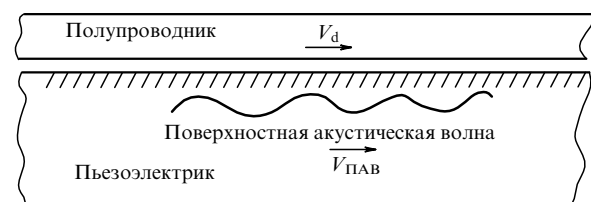


Рис. 2. Усиление ПАВ сверхзвуковым дрейфом электронов в слоистой структуре пьезоэлектрик — полупроводник. Условие усиления ПАВ — $V_d > V_{ПАВ}$.

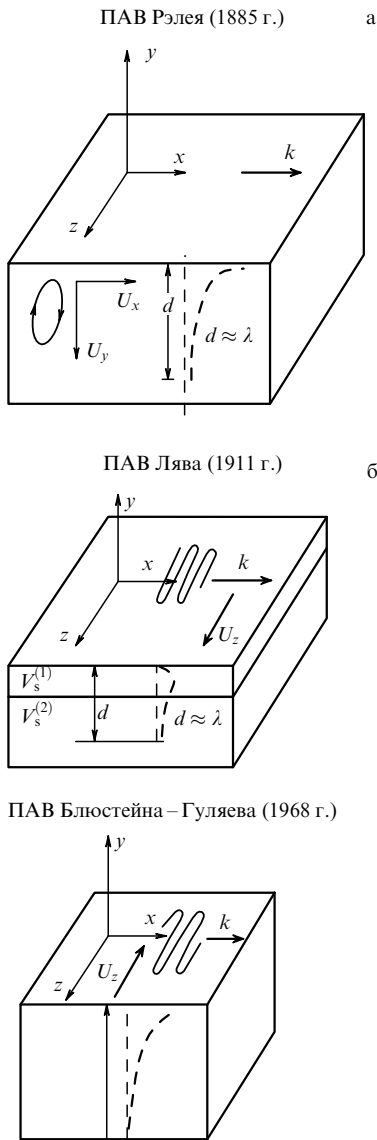


Рис. 3. Поверхностные акустические волны: (а) Рэлея — принципиально необходимо наличие двух компонент механического смещения для удовлетворения граничных условий на свободной поверхности; (б) Лява — принципиально необходимо наличие жестко связанного с подложкой слоя со скоростью сдвиговых акустических волн $V_s^{(1)}$, меньшей, чем скорость сдвиговых АВ $V_s^{(2)}$ в подложке: $V_s^{(1)} < V_s^{(2)}$; (в) Блюстейна–Гуляева — принципиально необходимо наличие пьезоэффекта для удовлетворения граничных условий на свободной поверхности, $d \approx \lambda/\eta$, η — константа электромеханической связи.

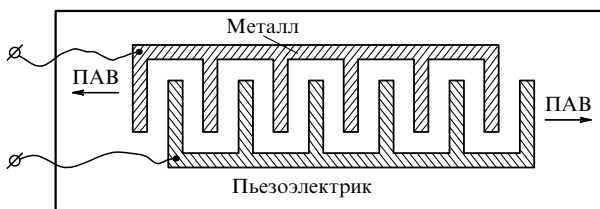


Рис. 4. Простейшая конструкция встречно-штыревого преобразователя.

Экспериментально усиление ПАВ электрическим током в слоистых структурах пьезоэлектрик–полупроводник наблюдалось впервые в работах К. Иошиды и 7 УФН, т. 175, № 8

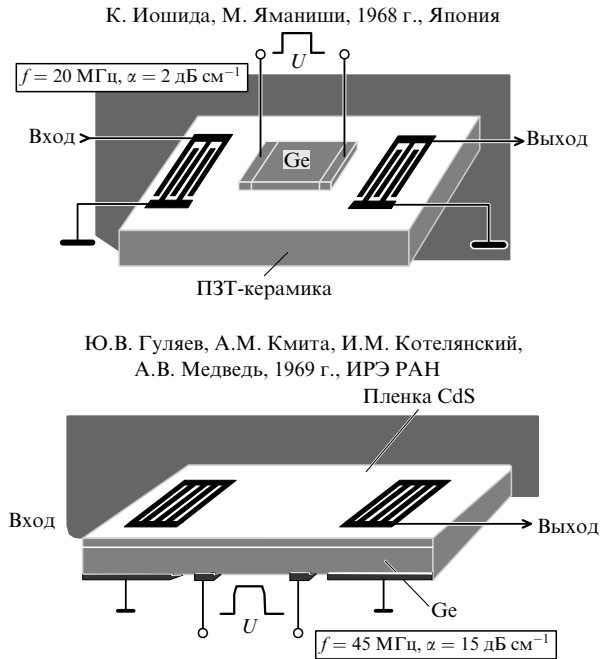


Рис. 5. Экспериментальное наблюдение усиления ПАВ в слоистой структуре.

М. Ямениши [31], К.Ф. Куэйта, Дж.Г. Коллинза, К.М. Лэйкина, Г.М. Жерара и Дж.Г. Шо [32], К. Фишлер и С. Яндо [33], Ю.В. Гуляева, А.М. Кмиты, И.М. Котелянского, А.В. Медведя, Ш.С. Турсунова [34] и др. (рис. 5). Детальная теория поглощения и усиления ПАВ, а также акустоэлектрического эффекта в пьезоэлектрических полупроводниках и слоистых структурах пьезоэлектрик–полупроводник была представлена в работе [35].

Работы [29] и [30] явились первыми публикациями, в которых было предложено использовать ПАВ для обработки информационных сигналов. Поверхностная акустическая волна распространяется вдоль поверхности твердого тела с относительно малой скоростью и доступна в любой точке на пути ее распространения. Таким образом, с сигналом в виде ПАВ можно контактировать, влиять на него, преобразовывать, усиливать, отводить часть энергии и т.д. Так как длина волны ПАВ примерно в 10^5 раз короче длины электромагнитной волны той же частоты, вся обработка сигнала в виде ПАВ происходит на расстояниях в несколько сантиметров и даже миллиметров. Именно эти характеристики ПАВ позволяют реализовать модель так называемого трансверсального фильтра, предложенного Г.Е. Кальманом еще в 1940 г. (рис. 6). Подбирая соответствующим образом амплитуды и фазы отведенных сигналов, можно построить, в принципе, любую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) такого фильтра.

Первая эффективная конструкция трансверсального фильтра на ПАВ с использованием ВШП была предложена в 1971 г. независимо А.В. Ковалевым и И.Б. Яковкиным [36] и Р.Ф. Танквеллом и М.Г. Холландом [37]. Они предложили для формирования требуемой АЧХ фильтра применить вариацию длины перекрытия электродов гребенок в ВШП, так называемую "аподизацию". В идеальном случае АЧХ такого ВШП есть фурье-преобразование от перекрытия электродов как функции координаты вдоль пути распространения в ПАВ (рис. 7).

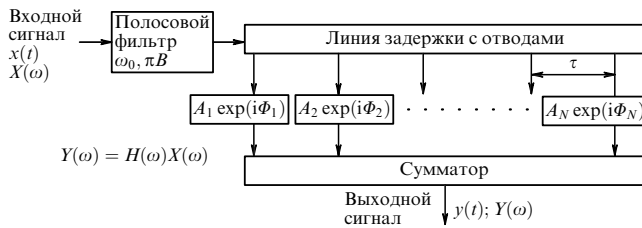


Рис. 6. Трансверсальный фильтр Кальмана. Амплитудно-частотная характеристика

$$H(\omega) = \sum_{n=1}^N A_n \exp(i\Phi_n) \exp(-i\omega n\tau) \quad \text{при } |\omega - \omega_0| \leq \frac{\pi B}{2},$$

$$H(\omega) = 0 \quad \text{при } |\omega - \omega_0| > \frac{\pi B}{2},$$

B — полоса частот.

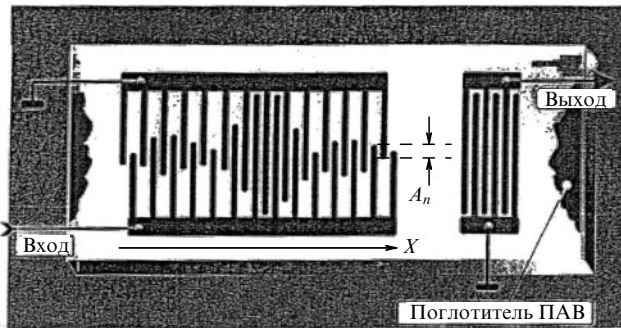


Рис. 7. Трансверсальный фильтр на ПАВ. Амплитудно-частотная характеристика $H(\omega) = F[f(x)]$, $F[\dots]$ обозначает преобразование Фурье, $f(x)$ — функция перекрытия электродов. Для случая на рисунке $f(x) = (\sin x)/x$. АЧХ $H(\omega) = 1$, если $|\omega - \omega_0| \leq \pi B/2$, иначе $H(\omega) = 0$.

Однако этот "идеальный" случай не учитывает реальные физические процессы, которые имеют место при прохождении ПАВ вдоль поверхности пьезоэлектрика с металлическими электродами на ней. Эти "вторичные" эффекты, сильно изменяющие характеристики такого фильтра, следующие:

- 1) отражение ПАВ внутри ВШП и от входного, и от выходного ВШП;
- 2) влияние массы и электропроводности электродов;
- 3) дифракция ПАВ (особенно в областях малого перекрытия электродов);

- 4) генерация паразитных объемных акустических волн;
- 5) рассогласование импедансов источников и нагрузки;

- 6) "прямое" просачивание электромагнитного сигнала.

Для борьбы с этими паразитными "вторичными" эффектами было предложено несколько конструктивных решений, часть из которых имеет принципиальный характер.

Так, в 1973 г. Э.Г.С. Пэйдж с сотрудниками [38] предложили так называемый многополосковый направленный ответвитель. В нем с помощью металлических полосок на поверхности электрически потенциалы ПАВ передаются на другую часть поверхности и генерируют ПАВ в параллельном канале. Это позволяет выровнять фронт волны и ослабить влияние некоторых из указанных выше "вторичных" эффектов.

Чтобы избавиться от первых трех, наиболее неприятных из перечисленных "вторичных" паразитных эффектов, Ю.В. Гуляев, А.М. Кмита и А.С. Багдасарян [39] и независимо Д.К. Малоха и Б.Дж. Хунзингер [40] предложили так называемое емкостное взвешивание электродов в ВШП.

В этой конструкции основная гребенчатая структура с *равномерным* перекрытием электродов, излучающая ПАВ, соединяется с дополнительными электродными гребенками с *аподизацией* посредством емкостных связей (рис. 8). Помимо ослабления влияния основных паразитных "вторичных" эффектов, которое обеспечивает такая конструкция, она оказывается гораздо более гибкой в смысле формирования различных АЧХ, так как здесь такое формирование может производиться в нескольких местах и в обоих ВШП — входном и выходном.

Расчет характеристик, проектирование и производство таких фильтров на ПАВ не намного сложнее, чем фильтров с простой аподизацией. На рисунке 9 показана АЧХ типичного фильтра на ПАВ для телевизора стандартов D/K и V/G, разработанного в ИРЭ РАН и внедренного в массовое производство. На рисунке 10 приведена АЧХ фильтра промежуточной частоты для сотового радиотелефона системы GSM, также разработанного в ИРЭ РАН. Видно, что эти фильтры полностью удовлетворяют требованиям спецификации. Подобные фильтры применяются сегодня практически в любой радиоэлектронной аппаратуре.

Так, в радиолокации, радионавигации, системных распознаваниях "свой-чужой" широко используются дисперсионные фильтры на ПАВ для сжатия сигналов,

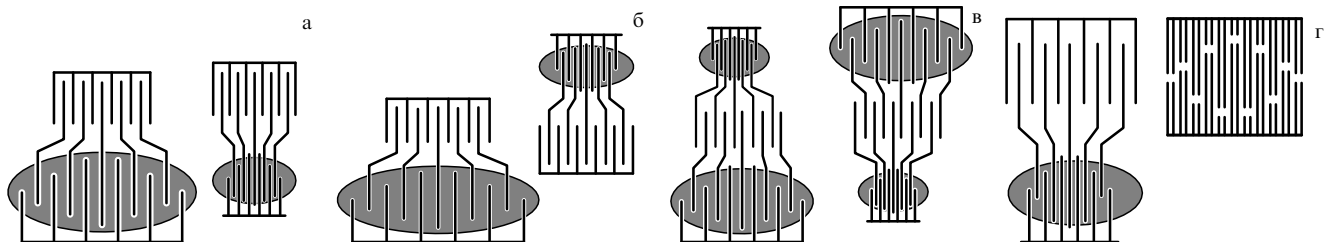


Рис. 8. Фильтры на ПАВ с емкостным взвешиванием электродов (Ю.В. Гуляев и др.) (схематическая топология): (а) авторское свидетельство СССР № 726648; (б) патент США № 4162415; (в) патент Франции № 7821723; (г) патент Германии № 2831584. Все эти фильтры обладают высокой селективностью и обеспечивают возможность формирования АЧХ в обоих ВШП. Дополнительное преимущество схемы на рис. г — простота реализации фильтра промежуточной частоты для телевидения.

Таблица. Параметры полосовых трансверсальных фильтров на ПАВ

Параметр	Центральная частота, МГц	Относительная полоса на уровне 3 дБ, %			Вносимые потери, дБ	Неравномерность по амплитуде в полосе, дБ	Неравномерности по фазе, град	Коэффициент прямоугольности (отношение полос на уровнях 3 и 40 дБ)	Подавление боковых лепестков, дБ	Максимальная задержка, мкс
		Ниобат лития	Танталат лития	Кварц						
Лучшее значение	2500	3–50	1,5–20	0,1–10	10	0,2	1,5	< 1,1	60	10

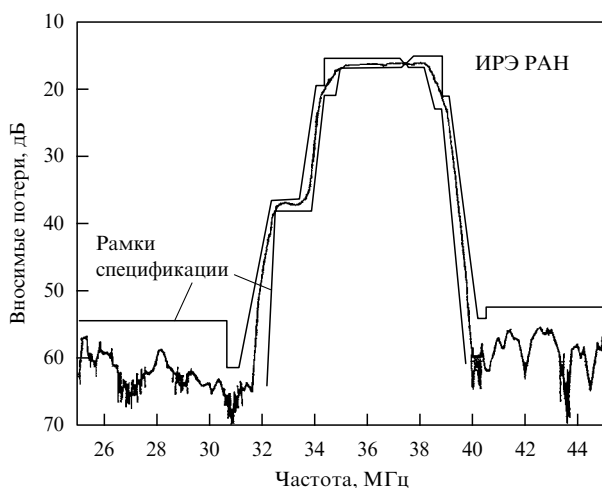


Рис. 9. Измеренная АЧХ фильтра промежуточной частоты для телевизоров систем BG-CCIR и D/K-OIRT. Вносимые потери 16 дБ. Размер кристалла $10 \times 2 \times 0,2$ мм. Материал — LiNbO_3 , $127,86^\circ$ Y-срез.

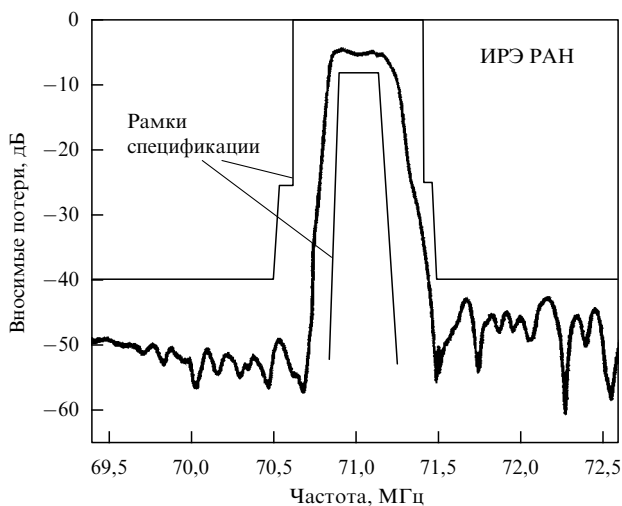


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика фильтра промежуточной частоты (71 МГц) для радиотелефона стандарта GSM. Вносимые потери в полосе 4,8 дБ в 910-омном тракте. Групповое время задержки 0,6 мкс.

для кодирования и декодирования сигналов и т.д. (подробнее см. книги [41–48]).

Высокие характеристики этих фильтров, простота, надежность, миниатюрность, устойчивость к различным воздействиям обусловили их массовый выпуск в мире до нескольких миллиардов штук в год.

В таблице приведены характеристики выпускаемых сегодня промышленностью полосовых трансверсальных фильтров на ПАВ.

За 40 лет, прошедших со времени первых работ [29, 30] по использованию ПАВ в радиоэлектронике, в мире было выполнено большое количество исследований по физике и технике ПАВ. Число публикаций исчисляется тысячами, выпущено несколько книг (см. уже упомянутые книги [41–48], а также [49]). Поэтому помимо тех достижений, о которых уже говорилось выше, я укажу лишь некоторые, на мой взгляд, наиболее принципиальные научные результаты.

В 1967 г. Э.А. Аш предложил так называемые "топографические" волноводы для ПАВ — геометрические структуры, выгравированные на поверхности и способные за счет изменения упругих свойств материала направлять ПАВ [50]. В том же 1967 г. Д.Л. Уайт предложил "полосковые" волноводы, в которых направляющая способность в отношении ПАВ связана либо с меньшей скоростью звука в полоске другого материала, наложенной на поверхность, либо с закорачиванием пьезоэлектрических полей в случае металлической полоски [51]. Волноводы используются для концентрации энергии ПАВ вдоль определенных путей при создании акустических аналогов известных сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств — направленных ответвителей, делителей мощности, циркуляторов и др.

В 1968 г. независимо Дж. Блюстейном [52] и Ю.В. Гуляевым [53]⁵ был предложен новый тип ПАВ — чисто сдвиговые ПАВ в пьезоэлектрических материалах. Эти волны, носящие в литературе название "волны Блюстейна–Гуляева", или БГ-волны, стали третьим типом поверхностных акустических волн (вместе с известными волнами Рэлея (1885 г.) и Лява (1911 г.), см. выше), которые могут существовать на гладкой свободной поверхности твердого тела. Удовлетворение граничных условий отсутствия механических напряжений на свободной поверхности обеспечивается здесь точной компенсацией на поверхности напряжений, связанных с механическим смещением и пьезоэффектом. Поверхностный же характер волны связан с уменьшением вблизи поверхности "ужесточенного" пьезоэффектом модуля упругости кристалла и тем самым с уменьшением скорости сдвиговых акустических волн в приповерхностном слое (см. [54]). В 1972 г. Г. Кербер и Р. Фогель [55] рассмотрели общую проблему существования чисто сдвиговых ПАВ в пьезоэлектрических кри-

⁵ Статья Дж. Блюстейна опубликована в декабре 1968 г., а статья Ю.В. Гуляева — в январе 1969 г., однако она была представлена в журнал на 20 дней раньше статьи Дж. Блюстейна. То есть обе работы, очевидно, были выполнены одновременно и независимо.

сталлах и показали, в каких кристаллах и на каких срезах могут существовать БГ-волны как собственные моды⁶. Экспериментально БГ-волны были впервые обнаружены в 1970 г. П. Турнуа, К. Маерфельдом и Ф. Жиром [57] и независимо А.И. Морозовым и М.А. Земляничным [58] и с тех пор широко изучаются. В частности, рассмотрены ПАВ типа БГ-волн на границе раздела двух пьезоэлектриков, в кристаллах с сильной электрострикцией, в ферромагнитных и антиферромагнитных кристаллах, а также "утекающие" ПАВ, обладающие свойствами БГ-волн (см. обзор [54]). В плане практического применения в акустоэлектронных изделиях БГ-волны имеют преимущество перед волнами Рэлея в случае высоких частот (свыше 2 ГГц). Они проникают в кристалл глубже рэлеевских, и, следовательно, на них меньше сказываются неровности поверхности, возникающие при обработке.

В работах Б. Олда, Дж. Ганьпэ и М. Тана [59] и Ю.В. Гуляева и В.П. Плесского [60] было показано, что на периодически неровной поверхности любого твердого тела также могут существовать чисто сдвиговые ПАВ — подобно медленным электромагнитным волнам в замедляющей гребенчатой структуре. Физически поверхностный характер этих волн связан с уменьшением приповерхностной жесткости твердого тела за счет наличия канавок. Скорость сдвиговой волны в приповерхностной области уменьшается, так как волна как бы "обегаёт" выступы, проходя больший путь. Эти волны используются сегодня для уменьшения потерь в линиях задержки на приповерхностных ОАВ, а также для повышения добротности резонаторов на ПАВ.

В 1969 г. К.А. Ингебригтсен [61] предложил феноменологический метод расчета характеристик устройств на ПАВ через так называемую эффективную диэлектрическую проницаемость и измерения скорости ПАВ на свободной и металлизированной (т.е. когда пьезоэлектрические поля закорочены) поверхности пьезоэлектрика. Метод Ингебригтсена широко используется при расчетах и проектировании ПАВ-устройств даже в сложных случаях.

В 1970 г. Е.А. Аш [62] предложил резонаторы и резонаторные фильтры на ПАВ, которые сегодня широко используются в изделиях на ПАВ (см. подробнее в [45]).

В работах Л.О. Саазанда [63] и М. Лууккалы и Г.С. Кайно [64] впервые были реализованы устройства свертки и корреляции сигналов на ПАВ в пьезодиэлектриках, основанные на "решеточных" нелинейных эффектах на ПАВ (см., например, [65]). Существенное повышение эффективности свертки и корреляции ПАВ-сигналов было достигнуто А.М. Кмитой и А.В. Медведем в 1971 г. [66] и П. Дасом, М. Араги и У.С. Уонгом в 1972 г. [67] благодаря использованию электронной нелинейности в слоистой структуре пьезоэлектрик–полупроводник. Конвольвер на ПАВ — уникальное акустоэлектронное устройство, имеющее много применений, в частности для новых поколений сотовых телефонов (см., например, [68, 69]).

⁶ Необходимо отметить, что чисто сдвиговые ПАВ, поверхностный характер которых связан с пьезоэффектом, рассматривались ранее М.И. Кагановым и С. Шкловской [56], однако в рассмотренном ими случае кристаллов с кубической симметрией такие волны существовать не могут.

Широкие исследования физических явлений, связанных со взаимодействием ПАВ с электрическими полями и электронами в пьезоэлектрических диэлектриках и полупроводниках и слоистых структурах пьезоэлектрик–полупроводник, были проведены позже в 1970–1990-х годах в Европе, США, СССР, Японии и других странах. Это привело к интенсивной разработке акустоэлектронных приборов и их использованию в различных радиоэлектронных системах обработки информации и связи (см., например, прекрасный обзор Д. Моргана [70]). В 1974 г. пять европейских ученых, Е. Аш, Дж. Коллинз, Ю. Гуляев, К. Ингебригтсен и Э. Пэйдж, были удостоены Хьюлетт-паккардовской премии Европейского физического общества за разработку физических основ приборов на ПАВ.

Сегодня номенклатура акустоэлектронных компонент на ПАВ, выпускаемых в мире, достаточно широка. В ее состав входят:

- полосовые фильтры;
- дисперсионные фильтры;
- линии задержки;
- дисперсионные линии задержки;
- резонаторы и генераторы;
- устройства для кодирования и декодирования сигналов;
- устройства для быстрого преобразования Фурье;
- цифровые фильтры Найквиста;
- синтезаторы частот;
- устройства для свертки и корреляции сигналов;
- сенсоры и т.д.

Полосовые фильтры для телевидения, стереорадиовещания, авторadio, видеоманитофонов, CD и DVD плееров, а в последние годы для сотовых телефонов составляют 90 % рынка изделий на ПАВ. Среди основных предприятий, выпускающих акустоэлектронную продукцию, такие известные фирмы, как "Murata", "Kyoto Ceramics", "Fujitsu", "Hitachi", NEC, "Samsung", "Sawteck", "Thompson", "Vectron", "Motorola", "Siemens" и многие другие. На территории бывшего СССР акустоэлектронные компоненты выпускают "Морион", "Авангард" (С.-Петербург), "Бутис-М", "Ангстрем", "Фонон" (Москва), ОНИИП (Омск), фирмы в Черкассах (Украина) и в Минске (Белоруссия).

3. Физические исследования по акустоэлектронике

Параллельно с работами по физике и технике приборов на ПАВ в 1960-е и 1970-е годы были проведены детальные исследования распространения акустических волн, объемных и поверхностных, в проводящих материалах — полупроводниках и металлах, а также взаимодействия АВ со свободными электронами. Было обнаружено много новых эффектов, разработаны новые методы изучения материалов.

Среди наиболее значительных достижений в этой области я бы считал создание новых методов характеристики материалов, их механических, электрических, магнитных, тепловых и других свойств с помощью акустических волн. В связи с этим можно отметить работы Ф. Хикернелла с сотрудниками [71–74], А. Слободника (см. книгу [75]), С.Н. Иванова с сотрудниками [76], А.И. Морозова с сотрудниками [77], Г.Д. Мансфельда с сотрудниками [78] и многие другие.

Другим крупным научным результатом можно считать теоретическое предсказание и описание, а также

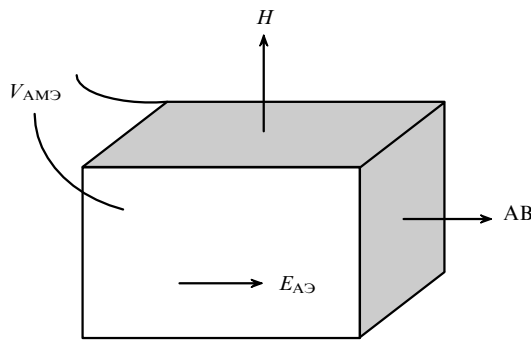


Рис. 11. Акустомагнетозлектрический эффект в полупроводниках.

экспериментальное исследование нового класса кинетических явлений в твердых телах, связанных с увлечением электронов акустическими волнами. Об одном из таких явлений уже говорилось выше — это акустоэлектрический эффект, открытый в 1953 г. Р. Парментаром [8]. Другим представителем этого класса эффектов является акустомагнетозлектрический (АМЭ) эффект. Он состоит в возникновении под действием акустической волны в образце, помещенном в магнитное поле, перпендикулярное направлению распространения АВ, электрического тока или напряжения (если образец разомкнут), перпендикулярного как магнитному полю, так и направлению распространения АВ (рис. 11).

В случае биполярного полупроводника АМЭ-эффект, открытый А.А. Гринбергом и Н.И. Крамер [79] в 1964 г., объясняется увлечением АВ как электронов, так и дырок и результирующими противоположно направленными холловскими электронным и дырочным потоками. В монополярном полупроводнике АМЭ-эффект был теоретически предсказан Э.М. Эпштейном и Ю.В. Гуляевым [80] в 1967 г. и наблюдался экспериментально А. Королюком и Н. Роем [81] в 1972 г. В монополярном случае (скажем, в случае разомкнутого во всех направлениях образца) объяснение АМЭ-эффекта следующее.

Электроны увлекаются АВ, и в образце создается компенсирующее акустоэлектрическое поле $E_{AЭ}$. Но электроны имеют какое-то (скажем, максвелловское) распределение по энергиям. Естественным образом АВ увлекает в основном "холодные" электроны (так как они находятся глубже в потенциальных ямах волны), а поле $E_{AЭ}$ действует в противоположном направлении на все электроны одинаково. Поэтому, хотя полный ток в каждой точке образца равен нулю (образец разомкнут!), в направлении распространения АВ существуют равные по величине и противоположно направленные "парциальные" токи — "холодных" электронов в одну сторону и "всяких" электронов в другую. Разность эффектов Холла на этих токах и дает напряжение АМЭ-эффекта. Из теории эффекта Холла известно, что эта разность будет отлична от нуля, только если время релаксации импульса электронов τ зависит от их энергии ε . Действительно, и теория, и эксперимент показывают, что $V_{AMЭ} \sim d\tau(\varepsilon)/d\varepsilon$. Таким образом, АМЭ-эффект в монополярном полупроводнике представляет собой тонкий метод исследования механизмов релаксации импульса и энергии электронов.

Вследствие увлечения электронов АВ возникают и другие явления переноса: акустотермический эффект [82], акустомагнетотермический эффект [83], "акустический" (т.е. на акустоэлектрическом токе) эффекты

Эттингсаузена и Пельтье [84]. Вследствие "бунчировки" электронов, увлекаемых АВ, все эти эффекты имеют важные особенности. Так, при обычном эффекте Пельтье нельзя получить очень низкие температуры, так как при температуре $T \rightarrow 0$ коэффициент Пельтье $\Pi \sim (kT/\varepsilon_F)^2 \rightarrow 0$, где ε_F — энергия Ферми. В случае "акустического" эффекта Пельтье $\Pi_{AЭ} \rightarrow \text{const}$ при $T \rightarrow 0$, и здесь открываются, по крайней мере с этой точки зрения, возможности получения низких температур.

Теоретически предсказанный Ю.В. Гуляевым с сотрудниками [35] в 1970 г. и экспериментально обнаруженный А.М. Кмитой и А.В. Медведем [66] в 1971 г. поперечный акустоэлектрический эффект является основой для создания эффективных акустоэлектронных конвольверов и корреляторов [67].

В 1976–1979 гг. Ю.В. Гуляевым и Р.А. Гаспаряном [85] было рассмотрено взаимодействие ПАВ с двумерным электронным газом в приповерхностных слоях полупроводников и в тонких пленках. Было показано, что вследствие размерного квантования коэффициент поглощения (и усиления) ПАВ, скорость ПАВ и напряжение акустоэлектрического эффекта испытывают квантовые осцилляции.

В конце 1960-х годов была создана нелинейная теория взаимодействия АВ с электронами в полупроводниках. В работах В.Л. Гуревича и Б.Д. Лайхмана [86] была построена нелинейная теория распространения и взаимодействия с электронами АВ малой амплитуды с учетом "электронной нелинейности". В работах Ю. Абе [87], И. Била [88] и П.Е. Зильбермана [89] были изучены стационарные АВ большой амплитуды, связанные с нелинейностью среды. Нелинейные эффекты взаимодействия АВ большой амплитуды с электронами в полупроводниках численно рассчитал П.К. Тьен [90]. Аналитическая нелинейная теория взаимодействия АВ большой амплитуды с электронами в полупроводниках в классическом гидродинамическом случае $kl \ll 1$ была построена Ю.В. Гуляевым [91] в 1970 г. Аналитическая нелинейная теория распространения АВ в высокочастотном случае $kl \gg 1$ (с учетом так называемой "импульсной" нелинейности) была развита в 1971 г. П.Е. Зильберманом [92] и получила экспериментальное подтверждение в работе С.Н. Иванова, И.М. Котелянского, Г.Д. Мансфельда и Е.Н. Хазанова [93] в том же 1971 г. Детальное экспериментальное исследование различных механизмов акустоэлектронных нелинейностей было проведено с использованием оригинальной идеи мультитранзитной генерации и усиления АВ большой амплитуды, предложенной в работе А.С. Бугаева, Ю.В. Гуляева и Г.Д. Мансфельда [94] в 1978 г.

4. Заключение: некоторые перспективы

Акустоэлектроника продолжает успешно развиваться как научно-техническое направление. Каждый год под эгидой IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) регулярно проходят международные конференции по ультразвуку, пьезоэлектрикам и контролю частоты, собирающие около тысячи участников. Поток публикаций и патентов не спадает. Не претендуя на то, чтобы предсказать даже основные направления развития акустоэлектроники, я все же рискну указать некоторые направления развития, которые уже наметились.

• Прежде всего, это дальнейшее усовершенствование и расширение области применения согласованных фильтров на ПАВ, которые сейчас используются для распознавания кодированных сигналов. Предполагается, что такие фильтры будут иметь широкое применение как маркеры (метки) для дистанционной идентификации любых объектов — от товаров широкого потребления до самолетов, ракет, поездов, автомобилей и т.д. — вплоть до идентификации личности.

• Использование в акустоэлектронных устройствах объемных акустических волн очень высоких частот (более 3 ГГц), где ПАВ трудно применять из-за высокого поглощения в поверхностных слоях. Эти устройства будут представлены высокочастотными фильтрами на ОАВ для широкого применения в наручных часах, телекоммуникациях и телефонии, навигации (системы GPS), контрольно-измерительной технике, ракетной и космической технике (см. [95]).

• Разработки сенсорных устройств на ПАВ. Сегодня сенсоры на ПАВ уже применяются для идентификации газов, паров и жидкостей. В последние годы было предложено много новых конструкций сенсоров на ПАВ с повышенной чувствительностью и селективностью, в том числе использующих новые типы АВ (см. [96–98]). Это открывает новые области применений, включая идентификацию отравляющих веществ и наркотиков.

• Четвертое направление развития акустоэлектроники в последующие годы будет, по моему мнению, связано с использованием пьезоэлектрических полупроводников или слоистых структур пьезоэлектрик–полупроводник, как это было предложено в [29]. Можно указать, по крайней мере, шесть перспективных устройств на ПАВ на основе слоистых структур пьезоэлектрик–полупроводник.

1. Усилитель ПАВ сверхзвуковым дрейфом электронов типа ЛБВ (см. [29–35, 99]). Лучший результат [99] (центральная частота 280 МГц, усиление 50 дБ, шум-фактор < 7, широкая полоса) сравним с транзисторными характеристиками и позволяет думать, что этот усилитель найдет свою нишу, тем более, что он имеет и некоторые преимущества, такие как полная электрическая изоляция входа от выхода.

2. Так называемый акусто-инжекционный транзистор (АИТ) [100], в котором усиление сигнала достигается благодаря модуляции проводимости области между коллекторными электродами в результате бунчировки электронов акустической волной, генерируемой входным сигналом. Первые экспериментальные результаты показывают перспективность этого устройства.

3. Устройство с переносом заряда акустической волной (АПЗС) [101, 104].

4. Конвольверы и корреляторы, основанные на поперечном акустоэлектрическом эффекте на ПАВ (см. [67–69]). Появляющиеся новые эффективные конструкции этих устройств позволяют надеяться на их широкое применение для распознавания сигналов и другой обработки информации.

5. Еще одним перспективным прибором является устройство считывания изображений с помощью коротких акустических импульсов, распространяющихся в слоистой структуре пьезоэлектрик–фоточувствительный полупроводник и вызывающих локальный поперечный акустоэлектрический эффект. Это устройство в определенном смысле является аналогом видикона,

только вместо электронного луча используется акустический импульс.

6. Устройства памяти, которые основываются на эффекте захвата вторичных электронов, выбитых внешним импульсным электронным лучом, в поверхностный слой пьезоэлектрика в соответствии с распределением потенциала в бегущей АВ [105, 106]. Дело выглядит так, как будто ПАВ "остановилась" на какое-то время (часы или дни — в зависимости от остаточной проводимости пьезодиэлектрика). Считывание "записанной" информации осуществляется подачей на поверхность другого короткого импульса электронного луча, который закоординирует пьезоэлектрические поля. Существующие напряжения релаксируют и возбуждают ту же самую ПАВ, которая может быть зарегистрирована выходным преобразователем.

Я хотел бы напомнить, что недавно появились сообщения об экспериментальном наблюдении "остановки" света в некоторых газах [107]. Мне представляется, что здесь есть определенная аналогия с описанным выше явлением "остановки" ПАВ [105, 106].

В заключение можно утверждать, что изучение распространения акустических волн в различных твердых телах и их взаимодействия с электрическими и магнитными полями и элементарными возбуждениями в таких системах, несомненно, приведет к новым интересным эффектам, которые, в свою очередь, дадут возможность для новых прорывов в создании высокотехнологичных приборов и устройств.

Список литературы

1. Шубников А В *Руководство к изготовлению пьезоэлектрических приборов* (М., 1931)
2. Cady W G *Piezoelectricity* (New York: McGraw-Hill, 1946)
3. Mason W P (Ed.) *Physical Acoustics* Vol. 1A (New York: Academic Press, 1964)
4. Auld B A *Acoustic Fields and Waves in Solids* (New York: Wiley, 1973)
5. Шапошников И Г *ЖЭТФ* **11** 332 (1941)
6. Гуревич В Л *ФТП* **2** 1557 (1968)
7. Пустовойт В И *УФН* **97** 257 (1969)
8. Parmenter R H *Phys. Rev.* **89** 990 (1953)
9. Bömmel H E *Phys. Rev.* **96** 220 (1954)
10. Pippard A V *Philos. Mag.* **46** 1104 (1955)
11. Weinreich G *Phys. Rev.* **107** 317 (1957)
12. Лифшиц И М, Каганов М И *УФН* **69** 419 (1959)
13. Толпыго К Б, Урицкий З И *ЖЭТФ* **30** 929 (1956)
14. Weinreich G *Phys. Rev.* **104** 321 (1956)
15. Hutson A R, McFee J H, White D L *Phys. Rev. Lett.* **7** 237 (1961)
16. White D L *J. Appl. Phys.* **33** 2547 (1962)
17. Spector H N *Phys. Rev.* **127** 1084 (1962)
18. Герценштейн М Е, Пустовойт В И *Радиотехника и электроника* **7** 1009 (1962)
19. Гуревич В Л *ФТТ* **4** 909 (1962)
20. Гуревич В Л *ФТТ* **4** 1380 (1962)
21. Mikoshiba N *J. Phys. Soc. Jpn.* **15** 1189 (1962)
22. Казаринов Р Ф, Скобов В Г *ЖЭТФ* **42** 310 (1962)
23. Hutson A R, White D L *J. Appl. Phys.* **33** 40 (1962)
24. Гуревич В Л, Каган В Д *ФТТ* **4** 2441 (1962)
25. Бонч-Бруевич В Л, Гуляев Ю В *Радиотехника и электроника* **8** 1179 (1963)
26. Spector H N *Solid State Phys.* **19** 291 (1966)
27. Gulyaev Yu V *Phys. Lett. A* **29** 187 (1969)
28. Бачинин Ю Г, Гуляев Ю В *ФТТ* **11** (2) (1971)
29. Гуляев Ю В, Пустовойт В И *ЖЭТФ* **47** 2251 (1964)
30. White R M, Voltmer F W *Appl. Phys. Lett.* **7** 314 (1965)
31. Ioshida K, Yamanichi M *Jpn. J. Appl. Phys.* **7** 1143 (1968)
32. Collins J H et al. *Appl. Phys. Lett.* **13** 314 (1968); Collins J H, Gerard H M, Shaw H J *Appl. Phys. Lett.* **13** 312 (1968); Lakin K M, Shaw H J *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **MTT-17** 912 (1969)
33. Fischler C, Yando S *Appl. Phys. Lett.* **15** 366 (1969)

34. Гуляев Ю В и др. *ФТП* **5** 80 (1971)
35. Гуляев Ю В и др. *ФТТ* **12** 2595 (1970)
36. Ковалев А В, Яковкин И Б *Радиотехника и электроника* **16** 1321 (1971)
37. Tancrrell R H, Holland M G *Proc. IEEE* **59** 393 (1971)
38. Marshall F G, Newton C O, Paige E G S *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics* **SU-20** 124 (1973); *IEEE Trans. Microwave Theory Tech. MTT-21* 206 (1973)
39. Гуляев Ю В, Кмита А М, Багдасарян А С *Письма в ЖТФ* **5** (1) 1 (1979); Патенты: СССР № 726648; США № 4162415, № 4185218; Великобритании № 2003353; Японии № 1069686; Франции № 7821723, № 8020674; Германии № 2831584, № 2831585
40. Malocha D C, Hunsinger B J *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics* **SU-24** 293 (1977)
41. Каринский С С *Устройства обработки сигналов на ультразвуковых поверхностных волнах* (М.: Сов. радио, 1975)
42. Речицкий В И *Акустоэлектронные радиокомпоненты* (М.: Сов. радио, 1980)
43. Викторов И А *Звуковые поверхностные волны в твердых телах* (М.: Наука, 1981)
44. Морозов А И, Проклов В В, Станковский Б А *Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств* (М.: Радио и связь, 1981)
45. *Поверхностные акустические волны* (Под ред. А А Олинера) (М.: Мир, 1981)
46. *Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технология и применение* (Под ред. Г Мэттьюза) (М.: Радио и связь, 1981)
47. Дьелесан Э, Руайе Д *Упругие волны в твердых телах: применение для обработки сигналов* (М.: Наука, 1982)
48. Орлов В С, Бондаренко В С *Фильтры на поверхностных акустических волнах* (М.: Радио и связь, 1984)
49. Бирюков С В и др. *Поверхностные акустические волны в неоднородных средах* (М.: Наука, 1991)
50. Ash E A, in *IEEE Symp. MTT, Boston, May 1967*
51. White D L, in *Proc. IEEE Ultrason. Symp., Vancouver, Oct. 1967*
52. Bleustein J L *Appl. Phys. Lett.* **13** 412 (1968)
53. Гуляев Ю В *Письма в ЖЭТФ* **9** 63 (1969)
54. Gulyaev Y V *Trans. IEEE Ultrason. Ferroelectr. Frequency Control UFFC-45* 935 (1998)
55. Koerber G, Vogel R *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics* **19** 3 (1972)
56. Каганов М И, Шкловская С *ФТТ* **8** 2789 (1966)
57. Maerfeld C, Gires F, Tournois P *Appl. Phys. Lett.* **18** 269 (1970)
58. Морозов А И, Земляничин М А *Письма в ЖЭТФ* **12** 396 (1970)
59. Auld B A, Gagnerain J J, Tan M *Electron. Lett.* **2** 650 (1976)
60. Гуляев Ю В, Плесский В П *Письма в ЖТФ* **3** 220 (1977)
61. Ingebrigtsen K A J. *Appl. Phys.* **40** 2681 (1969)
62. Ash E A, in *IEEE Symp. MTT, Newport Beach, 1970*
63. Svaasand L O *Appl. Phys. Lett.* **15** 300 (1969)
64. Luukkala M, Kino G S *Appl. Phys. Lett.* **18** 393 (1971)
65. Ljajnov V E, Hsu T-H, White R M J. *Appl. Phys.* **43** 800 (1972)
66. Кмита А М, Медведь А В *Письма в ЖЭТФ* **14** 455 (1971); Кмита А М, Медведь А В J. *Appl. Phys.* **44** 3034 (1973)
67. Das P, Araghi M N, Wang W C *Appl. Phys. Lett.* **21** 152 (1972)
68. Boritko S V, in *Proc. of the 2000 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 39
69. Проклов В В и др. *Радиотехника и электроника* **48** 1093 (2003)
70. Morgan D, in *IEEE Intern. Frequency Control Symp., Pasadena, May 1988*
71. Hickernell F S, Sakiotis N G *Proc. IEEE* **52** 194 (1964)
72. Wasilik J H, Hickernell F S *Appl. Phys. Lett.* **24** 153 (1974)
73. Hickernell F S *Int. J. High Speed Electron. Syst.* **10** 603 (2000)
74. Hickernell F S, Hickernell T S *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Frequency Control UFFC-42* 410 (1995)
75. Slobodnik A J, Delmonico R T, Conway E D *Microwave Acoustics Handbook* (Bedford, Mass.: US Air Force Cambridge Res. Lab., 1970)
76. Иванов С Н и др. *ФТТ* **19** 308 (1977); Ivanov S N *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Frequency UFFC-39* 653 (1992); Гуляев Ю В, Иванов С Н, Козорезов А Г *Радиотехника и электроника* **23** 2396 (1978)
77. Морозов А И, Земляничин М А *ФТТ* **6** 2288 (1972); Morozov A I, Zemlyanitzyn M A, Anisimkin V I *Phys. Status Solidi A* **14** 339 (1974); **24** 381 (1974)
78. Иванов С Н, Мансфельд Г Д *ФТП* **4** 40 (1970); Mansfeld G D, Alekseev S G, Kotelyansky I M, in *Proc. of the 2001 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 415; Mansfeld G D et al., in *Proc. of the 2000 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 581
79. Гринберг А А, Крамер Н И *ДАН СССР* **157** 79 (1964)
80. Эпштейн Э М, Гуляев Ю В *ФТТ* **9** 376 (1967)
81. Королук А, Рой Н *ФТТ* **14** 260 (1972)
82. Гуляев Ю В, Эпштейн Э М *Письма в ЖЭТФ* **3** 410 (1966)
83. Гуляев Ю В, Эпштейн Э М *ФТТ* **9** 864 (1967)
84. Гуляев Ю В *ФТТ* **8** 3366 (1966)
85. Гуляев Ю В, Гаспарян Р А *Микроэлектроника* **8** 326 (1979); Gulyaev Yu V, Gasparian R A *Surf. Sci.* **98** 553 (1980)
86. Гуревич В Л, Лайхтман Б Д *ЖЭТФ* **46** 598 (1964); **49** 960 (1965)
87. Abe Y *Prog. Theor. Phys.* **31** 956 (1964)
88. Beale J R A *Phys. Rev.* **135** A1761 (1964)
89. Зильберман П Е *ФТТ* **9** 309 (1967)
90. Tien P K *Phys. Rev.* **171** 970 (1968)
91. Гуляев Ю В *ФТТ* **12** 415 (1970); Gulyaev Yu V *IEEE Trans.* **415** 19 (1970)
92. Зильберман П Е *ФТП* **5** 1240 (1971)
93. Иванов С Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **13** 283 (1971)
94. Bugaev A S, Gulyaev Yu V, Mansfeld G D *Electron. Lett.* **14** 403 (1978)
95. Гуляев Ю В, Мансфельд Г Д *Радиотехника* (8) 1529 (2003)
96. Anisimkin V I et al. *Electron. Lett.* **34** 1360 (1998)
97. Anisimkin I V, Anisimkin V I, Gulyaev Yu V, in *Proc. of the 2000 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 713
98. Anisimkin I V, in *Proc. of the 2003 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 2*, p. 1326
99. Gulyaev Yu V et al. *Electron. Lett.* **16** 114 (1980)
100. Гуляев Ю В, Патент СССР № 401271 (1971); Gulyaev Yu V, Mansfeld G D, Orlova G A *Electron. Lett.* **17** 12 (1981)
101. Гуляев Ю В, Патент СССР. Ноябрь 1971
102. Siegert A, Patent Österreich (Dezember, 1971)
103. Gaalema S D, Schwartz R J, Gunshor R L *Appl. Phys. Lett.* **29** 82 (1976)
104. Hoskins M J, Hunser B J, in *Proc. of the 1986 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic*, p. 439
105. Bert A G, Epstein B, Kantorowicz G *IEEE Trans. Microwave Theory Tech. MTT-21* 255 (1973)
106. Гуляев Ю В и др. *Письма в ЖТФ* **7** 780 (1981)
107. Phillips D F et al. *Phys. Rev. Lett.* **86** 783 (2001)

PACS numbers: 07.07.Df, **72.50.+b**, 77.65.Dq

Некоторые тенденции развития акустоэлектроники сверхвысоких частот

С.Г. Алексеев, Ю.В. Гуляев,
И.М. Котелянский, Г.Д. Мансфельд

1. Введение

Развитие акустоэлектроники связано с разработкой сверхминиатюрных устройств, предназначенных для формирования, фильтрации и аналоговой математической обработки сигналов. Возможность и целесообразность такого использования акустических волн обусловлены их малой скоростью по сравнению со скоростью света. Преобразование электромагнитного сигнала в акустический, длина волны которого в 10^5 раз меньше, позволяет не только значительно уменьшить размеры электронных устройств, производящих различные операции над сигналами, но и в ряде случаев осуществить эти операции более простым и рациональным способом. В докладе приведены краткий обзор проблемы и некоторые результаты исследований, полученные авторами в области создания резонаторов и фильтров сверхвысоких частот (СВЧ) на объемных акустических волнах, акустоэлектронных датчиков физических величин на основе таких СВЧ-резонаторов, описана оригинальная методика акустической резонансной спектроскопии монокристаллов и тонких пленок материалов.

© С.Г. Алексеев, Ю.В. Гуляев,
И.М. Котелянский, Г.Д. Мансфельд 2005