

## УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ НА ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ ПАВ/ПЗС

Савченков В. С., к. т. н. Орлов В. С., к. т. н. Бондаренко В. С.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Устройства обработки высокочастотных аналоговых сигналов на гибридных структурах ПАВ/ПЗС — это новый класс твердотельных акустоэлектронных приборов. Объединение устройств на ПАВ и ПЗС в пространственно разделенных структурах позволяет сочетать преимущества каждого из этих классов устройств и компенсировать их недостатки.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) находят все большее применение в качестве формирователей изображения, запоминающих устройств (ЗУ), устройств обработки аналоговых сигналов. Несмотря на более позднее развитие последних они вызывают все больший интерес благодаря очень высокой гибкости управления, линейности, незначительному энергопотреблению. Однако такой недостаток ПЗС, как ограниченный частотный диапазон, не позволяет использовать их, например, в качестве устройств оптимальной обработки сигналов в радиолокации, где они широко применяются в системах селекции движущихся целей.

Устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ) также широко применяются в разных областях радиотехники в качестве устройств обработки аналоговых сигналов (фильтры, линии задержки (ЛЗ), устройства свертки). Обладая более широким частотным диапазоном по сравнению с ПЗС, они имеют значительные потери, менее гибки в управлении и не позволяют обрабатывать сигналы большой длительности.

Несмотря на совершенно разную физику работы ПЗС и устройств на ПАВ удалось на основе взаимодействия электрического

поля, сопровождающего ПАВ, с зарядами в ПЗС объединить эти два направления твердотельной микроэлектроники. Устройства нового класса могут успешно применяться в системах связи, радиолокации, телевидении и ряде других областей в качестве буферных ЗУ, корреляторов, согласованных фильтров и выполнять ряд других функциональных преобразований.

### 2. ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ПАВ/ПЗС

Первым прибором нового класса гибридных ПАВ/ПЗС устройств было предложенное сотрудниками Массачусетского института буферное ЗУ на ПАВ/ПЗС [1, 2] для временного хранения широкополосных аналоговых сигналов с быстрым вводом и медленным выводом информации (рис. 1). Конструктивно оно аналогично пьезоэлектронным конволверам [3—7] и представляет собой пространственно разделенную структуру из пьезоэлектрической (из  $\text{LiNbO}_3$ ) и полупроводниковой (из  $p$ -кремния) подложек, разделенных воздушным зазором, как изображено на рис. 2. Устройство состоит (см. рис. 1) из ЛЗ на ПАВ, выполненной на пьезоэлектрическом звукопроводе, линейной матрицы МОП-транзисторов, ПЗС-регистра сдвига с параллельными входами (мультиплексора ПЗС), которые соединены со штырями выборки посредством системы электродов передачи, хранения, выборки и сигнальных электродов. Все полупроводниковые структуры выполнены на общей подложке из  $p$ -кремния. Пространственное расположение структур показано на рис. 2.

На противоположных концах звукопровода, с внутренней стороны по отношению к полупроводниковой подложке, расположены встречно-штыревые преобразователи (ВШП) ЛЗ на ПАВ, один из которых является входным, а второй — контрольным. Под областью взаимодействия перпендикулярно направлению распространения ПАВ на полупроводниковой подложке располагаются штыри выборки из поликристаллического кремния, каждый из которых с одной стороны соединен со стоком соответствующего МОП-транзистора линейной матрицы, с другой стороны он переходит в сигнальный электрод. Число штырей выборки равно 300, что определяет соответственно число МОП-транзисторов и число групп электродов, связывающих штыри выборки с 300-элементным двухтактным ПЗС-мультиплексором. Воздушный зазор между ЛЗ на ПАВ и штырями выборки составляет около 0,3 мкм и обеспечивается выступами, выполненными на звукопроводе с помощью ионного травления [3—5].

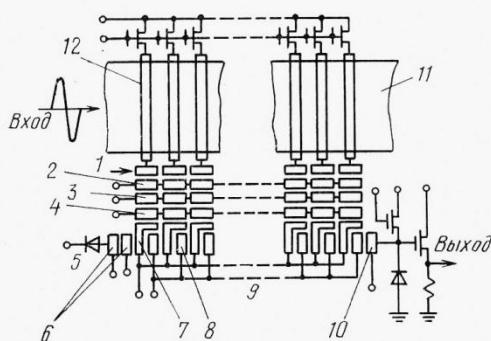


Рис. 1. Буферное ЗУ на ПАВ/ПЗС:

- 1 — сигнальный электрод ( $C\Theta$ ); 2 — электрод выборки ( $B\Theta$ ); 3 — электрод хранения ( $X\Theta$ ); 4 — электрод передачи ( $P\Theta$ ); 5 — входной диод; 6 — входные электроды; 7 — электрод ПЗС-регистра сдвига ( $\Phi 1$ ); 8 — электрод ПЗС-регистра сдвига ( $\Phi 2$ ); 9 — трехсоставной ПЗС-регистр сдвига; 10 — выходной электрод; 11 — ЛЗ на ПАВ; 12 — штырь выборки

Поперечный разрез устройства в сборе приведен на рис. 3. Полупроводниковые подложки размером  $14 \times 3,7$  мм с помощью эпоксидной смолы крепятся на полиамидной гибкой плате (из каптона) с золотыми контактными площадками, к которым в свою очередь с помощью ультразвуковой сварки привариваются проволочные проводники из алюминия, соединяющие контактные площадки с выводами ПЗС-элементов и с золотыми выводами устройства. Последние запрессованы в алюминиевом основании.

Пьезоэлектрический звукопровод с помощью юстировочных меток на полупроводниковой подложке ориентируется и затем прижимается к кремниевой подложке.

Последовательность работы ЗУ на ПАВ/ПЗС следующая. До подачи входного сигнала на ВШП ЛЗ на каждом из штырей выборки устанавливается некоторый средний потенциал (с помощью линейной матрицы МОП-транзисторов, работающих в режиме обогащения). Этот потенциал определяется в свою очередь величину среднего заряда в соответствующих тройных наборах потенциальных ям — сигнальных, выборочных и хранения. После этого на входной ВШП подается сигнал. Для того чтобы изолировать пустой регистр сдвига от зарядов в потенциальных ямах хранения, электроды передачи «выключаются» путем подачи соответствующего напряжения. При подаче входного сигнала на ВШП последний излучает ПАВ, распространяющуюся по ЛЗ над областью взаимодействия со штырями выборки. Электрическое поле, сопровождающее ПАВ, в области взаимодействия модулирует потенциал на каждом штыре выборки, который в свою очередь модулирует заряды в группе потенциальных ям под сигнальными электродами, электродами выборки и хранения. Сигнальные потенциальные ямы и потенциальные ямы хранения обмениваются зарядовыми пакетами через промежуточные потенциальные ямы выборки. Когда ПАВ находится над областью взаимодействия, осуществляется детектирование.

С этой целью электроды выборки «выключаются» ступенчатым напряжением, длительность переходного времени которого должна быть меньше полупериода входного высокочастотного колебания. При этом в потенциальных ямах хранения остаются и хранятся зарядовые пакеты, адекватные результатам выборки. Затем электроды передачи открываются для параллельной загрузки этих зарядовых пакетов в ПЗС-регистр сдвига. Вывод записанной информации осуществляется считыванием ее из регистра сдвига со скоростью, определяемой соответствующей тактовой частотой.

Требуемое пространственное расположение штырей выборки определяется частотой дискретизации  $f_s$ , которая связана с пространственным периодом расположения штырей выборки  $S_c$  и скоростью распространения ПАВ в материале звуко провода  $v_a$  соотношением

$$f_s = S_c/v_a. \quad (1)$$

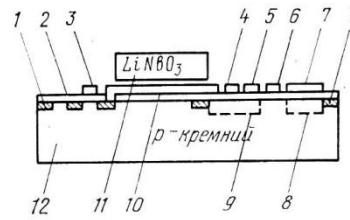


Рис. 2. Пространственное расположение структур в ЗУ на ПАВ/ПЗС:

1 — стоп-область  $p^+$ -типа; 2 — шина  $n^+$ -типа; 3 — затвор; 4 — электрод выборки; 5 — электрод хранения; 6 — электрод передачи; 7 — электрод ПЗС-регистра сдвига; 8 — входные потенциальные ямы; 9 — выходные потенциальные ямы; 10 — штырь выборки; 11 — пьезоэлектрическая подложка; 12 — полупроводниковая подложка

Величина  $S_c$  определяет требуемую длину ПЗС-элемента, так как каждому штырю выборки должен соответствовать один ПЗС-элемент. В процессе взятия выборки с частотой дискретизации  $f_s$  осуществляется транспонирование спектра входного сигнала на частоту  $(f_c - f_s)$ , где  $f_c$  — центральная частота входного сигнала (рис. 4). Во избежание спектральных искажений за счет эффекта наложения при заданной частоте дискретизации  $f_s$  центральная частота входного сигнала с шириной спектра  $\Delta f$  должна быть выбрана в пределах от  $f_s$  до  $\frac{3}{2}f_s$  [8]. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ЗУ на ПАВ/ПЗС определяется характеристиками как ВШП, так и решетки штырей выборки. Конечная ширина штыря выборки (в описываемом устройстве она составляет 15 мкм) определяет аналоговый характер выборок решетки штырей, т. е. функция выборки одного штыря не адекватна  $\delta$ -функции, АЧХ штыря представляет преобразование Фурье от прямоугольного импульса. Для штыря выборки шириной  $W$  передаточная функция будет иметь вид:

$$H(f) = \frac{\sin(\pi W/\lambda)}{\pi W/\lambda}, \quad (2)$$

где  $\lambda = v_a/f$  — длина волны,  $f$  — высокая частота входного сигнала.

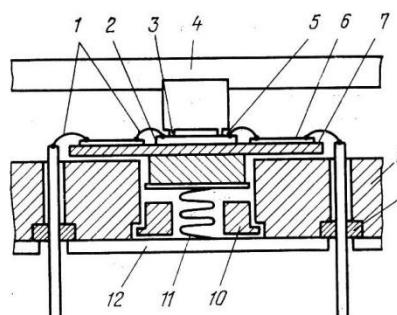


Рис. 3. Поперечное сечение конструкции ЗУ на ПАВ/ПЗС:

1 — проволочные соединения; 2 — полупроводниковая подложка; 3 — «рельсы» пьезоэлектрической подложки; 4 — основание; 5 — воздушный зазор; 6 — золотые проводники; 7 — каптон; 8 — алюминиевый держатель; 9 — эпоксидная смола; 10 — вставка пружины; 11 — пружина из BeCu; 12 — крышка

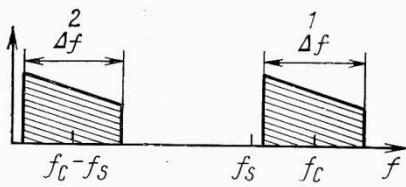


Рис. 4. Частотные спектры:

1 — спектр входного сигнала; 2 — спектр выходного сигнала

Удобнее выразить  $H(f)$  через  $f_s$  и  $S_c$ :

$$H(f) = \frac{\sin \pi [(W/S_c)(f/f_s)]}{\pi (W/S_c)(f/f_s)}. \quad (3)$$

Влияние  $H(f)$  приводит к завалу АЧХ устройства в области высоких частот (рис. 5). Этот недостаток может быть устранен коррекцией АЧХ входного ВШП, а также с помощью частотно-зависимых цепей согласования.

Описываемое ЗУ на ПАВ/ПЗС является широкополосным устройством, частотный диапазон его значительно выше, чем у аналогичных ЗУ на ПЗС и определяется параметрами ВШП. В результате переноса спектра выходной сигнал имеет более низкую частоту. При этом сохраняются амплитудные и фазовые соотношения входного сигнала. Так, например, для входного радиоимпульса длительностью 1,8 мкс с частотой заполнения 90 МГц частота заполнения выходного сигнала при частоте дискретизации  $f_s=85,7$  МГц составит 4,3 МГц, и выходной сигнал будет содержать 7,7 циклов ( $4,3 \text{ МГц} \times 1,8 \text{ мкс} = 7,7$ ) вместо 162 циклов во входном сигнале ( $90 \text{ МГц} \times 1,8 \text{ мкс} = 162$ ).

К недостаткам устройства следует отнести небольшой динамический диапазон (25 дБ), что обусловлено наличием так называемого «геометрического» шума, присущего мультиплексорам на ПЗС. Основной причиной появления геометрического шума является разброс пороговых напряжений ПЗС-структур. Известны различные пути снижения или компенсации геометрических шумов: одни из них связаны с технологией ПЗС-устройств [9], другие со схемотехникой и режимами работы ПЗС-устройств [10]. В [1] предлагается метод компенсации уравниванием потенциалов. Этот метод является разработкой известного метода «заливка — сброс», описанного, например, в [9]. Суть первого иллюстрируется диаграммами, приведен-

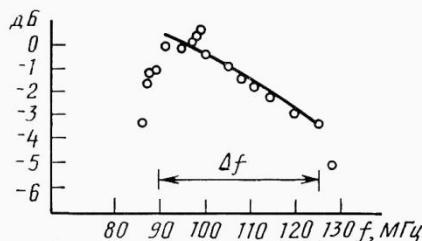


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика ЗУ на ПАВ/ПЗС:

— теоретическая; ... — экспериментальная;  $\Delta f$  — полоса пропускания входного ВШП по уровню -1 дБ

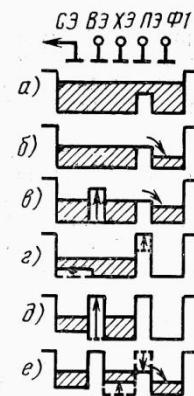


Рис. 6. Распределение потенциала и заряда в ЗУ на ПАВ/ПЗС:

а) заливка; б) разлив 1; в) разлив 2; г) модулирование; д) взятие выборки; е) передача

ными на рис. 6, где, как обычно при описании ПЗС-устройств, используется гидростатическая аналогия.

Последовательность работы такой схемы следующая. Сначала потенциальные ямы под  $C_3$ ,  $B_3$  и  $X_3$  наполняются зарядовым пакетом из потенциальных ям под  $\Phi_1$ . Затем излишек заряда из потенциальных ям под  $C_3$ ,  $B_3$  и  $X_3$  через не полностью «включенный» электрод передачи переливается в потенциальную яму под  $\Phi_1$  (электрод выборки сразу после этого «выключается» для того, чтобы общий заряд не зависел от его порогового напряжения). После этого электрод выборки «включается», электрод передачи «выключается», электрическое поле, сопровождающее ПАВ при прохождении области взаимодействия, вызывает обмен заряда между потенциальными ямами под  $C_3$  и  $X_3$ , т. е. осуществляет модуляцию заряда в потенциальной яме под  $C_3$  и соответственно под  $X_3$ . Затем, когда весь сигнал находится в области взаимодействия, осуществляется выборка, для чего электрод выборки «выключается», и в потенциальной яме хранения (под  $X_3$ ) остается изолированный зарядовый пакет, который соответствует дискретному значению входного сигнала. Этот зарядовый пакет передается в ПЗС-регистр сдвига с помощью частично «включенного» электрода передачи. Если некоторая часть заряда остается в потенциальной яме хранения, то выходной заряд не зависит от пороговых напряжений, но зависит от некоторых остаточных эффектов. Описанные процессы происходят одновременно во всех трехстах параллельных структурах. Для реализации такой схемы компенсации «геометрических» шумов позволит увеличить динамический диапазон устройства до 40 дБ, не менее.

Параметры рассмотренного ЗУ на ПАВ/ПЗС приведены ниже.

Центральная частота . . . . . 107 МГц  
Ширина полосы пропускания . . . 40 МГц  
Длительность входного сигнала 3,5 мкс

Тактовая частота ПЗС . . . . .	100 кГц
Максимальная мощность входного сигнала . . . . .	27 дБм
Максимальный уровень входного сигнала . . . . .	100 мВ
Динамический диапазон . . . . .	25 дБ

К технологическим особенностям гибридного ЗУ на ПАВ/ПЗС в отличие от акустоэлектронных конволверов относится то, что для его управления требуется не менее восьми соединений с той частью полупроводниковой подложки, которая обращена к ЛЗ на ПАВ, поэтому пьезоэлектрическая подложка делается уже полупроводниковой и имеет специфическую форму «собачья кость». На крайних широких частях звукопровода размещены ВШП, центральная часть звукопровода делается более узкой во избежание соприкосновения с проволочными соединениями ПЗС-структур.

При формировании объемного канала *n*-типа для обеспечения высокой скорости переноса зарядовых пакетов между сигнальными потенциальными ямами и потенциальными ямами хранения используется ионная имплантация. Для точной угловой юстировки штырей выборки с фронтом ПАВ на концах чипа ПЗС вытравливаются метки юстировки, необходимые при сборке устройства. Точность выдерживания величины воздушного зазора составляет 20 нм. Длина звукопровода равна 12,2 мм, размер одного ПЗС-элемента определяется частотой дискретизации и равен 40,6 мкм.

### 3. КОРРЕЛЯТОРЫ НА ПАВ/ПЗС

В последние годы появилось много акустоэлектронных и акустооптических устройств корреляционной обработки сигналов большой длительности [3—7, 12, 13, 17, 18].

В области приборов с переносом заряда (ППЗ) также реализуются устройства свертки аналоговых сигналов [14—16]. Однако их возможности на сегодняшний день ограничены частотным диапазоном ПЗС.

Запоминающие устройства на ПАВ/ПЗС, рассмотренные выше, явились базовой конструкцией, на основе которой реализованы корреляторы широкополосных аналоговых сигналов большой длительности [19—21]. В первом варианте подобного коррелятора с временным накоплением [19, 20] сочетаются возможности ПАВ-коррелятора [3] и буферного ЗУ [1, 2].

Конструктивно это устройство аналогично рассмотренному ранее ЗУ на ПАВ/ПЗС (см. рис. 1). Оно также представляет из себя пространственно разделенную структуру, состоящую из пьезоэлектрического звукопровода из ниобата лития, на котором выполнена ЛЗ на ПАВ, и полупроводниковой подложки с теми же элементами, что и ЗУ на ПАВ/ПЗС. Отличие коррелятора состоит в том, что ЛЗ на ПАВ содержит два входных ВШП. На один подается высокочастотный сигнал, на второй, расположенный на противопо-

ложном конце звукопровода, — опорный сигнал. Существенное отличие коррелятора на ПАВ/ПЗС состоит в том, что в нем используется нелинейное акустоэлектронное взаимодействие.

Принцип действия коррелятора на ПАВ/ПЗС следующий. При подаче на соответствующие ВШП входного высокочастотного и опорного сигналов эти ВШП излучают ПАВ, распространяющиеся по звукопроводу навстречу друг другу. Высокочастотные электрические поля, сопровождающие две этих ПАВ, детектируются штырями выборки и перемножаются за счет нелинейных свойств полупроводника (в данном случае кремния) под штырями выборки или под электродами передачи. Результаты этого нелинейного взаимодействия уже в форме зарядовых пакетов накапливаются в потенциальных ямах под сигнальными электродами, электродами выборки, хранения, передачи, электродами  $\Phi 1$  ПЗС-регистра сдвига путем остановки тактовых импульсов в течение интервала накопления. Затем возобновляется последовательное тактирование ПЗС-регистра сдвига для вывода сигнала, соответствующего корреляционной функции входных высокочастотных сигналов с учетом транспонирования спектра.

Последовательность работы коррелятора на ПАВ/ПЗС следующая. До подачи высокочастотных сигналов на входные ВШП с помощью линейной матрицы МОП-транзисторов на штырях выборки устанавливается некоторый средний потенциал, который в свою очередь определяет величину среднего заряда в соответствующих потенциальных ямах (аналогично ЗУ на ПАВ/ПЗС) [2]. В [20] описана еще одна предварительная операция, осуществляемая с целью снижения уровня геометрических шумов, которая аналогична рассмотренной в [1]. Сначала наполняются все потенциальные ямы под  $\Phi 1$  при последовательном тактировании ПЗС-регистра сдвига, затем тактирование прекращается и зарядовые пакеты из потенциальных ям под  $\Phi 1$  перемещаются в потенциальные ямы хранения, связанные с соответствующими штырями выборки. Избыток заряда, превышающий уровень заряда в каждой потенциальной яме под электродом передачи в режиме отсечки, стекает обратно в соответствующие потенциальные ямы под  $\Phi 1$  и при возобновлении последовательного тактирования выводится из ПЗС-регистра сдвига. В результате потенциальные ямы хранения содержат некоторый половинный заряд, а ПЗС-регистр сдвига «обнуляется».

После перечисленных предварительных операций устройство готово к выполнению своей функции коррелятора. Процесс временного накопления удобнее рассматривать для одного отвода, т. е. штыря выборки. На входные ВШП подаются высокочастотный и опорный сигналы. Высокочастотные электрические поля, сопровождающие распространяющиеся навстречу друг другу ПАВ, детектируются штырями выборки и перемножаются на варикторной нелинейности стоковых областей МОП-транзисторов смещения или облас-

тей под штырями выборки. Потенциалы, полученные в результате перемножения, модулируют глубину каждой потенциальной ямы хранения в нижней части соответствующего штыря выборки, вследствие чего перераспределяется заряд внутри каждой потенциальной ямы хранения. Кроме того, в каждый момент времени происходит перераспределение заряда вследствие линейного взаимодействия с высокочастотными полями, детектируемыми штырями выборки, т. е. процесс, аналогичный процессу в ЗУ на ПАВ/ПЗС. Линейная модуляция осуществляется в течение половины каждого периода высокочастотного колебания, что обеспечивает перенос бесконечно малого приращения заряда из потенциальной ямы хранения через частично открытый электрод передачи в потенциальную яму под  $\phi_1$  регистра сдвига.

Компоненты, полученные в результате нелинейного взаимодействия электрических полей, сопровождающих распространяющиеся навстречу друг другу ПАВ, на дисперсионной диаграмме будут соответствовать векторам  $(2\omega, 0)$  и  $(0, 2k)$ , где  $\omega$  — круговая частота входных сигналов,  $k$  — волновой вектор. Компонента, соответствующая  $(2\omega, 0)$ , представляет собой свертку входного и опорного сигналов. Квазистатическая компонента, соответствующая  $(0, 2k)$ , при считывании представляет корреляционную функцию. В  $RC$ -интеграторе каждого штыря выборки в данной структуре частично открытый канал под электродом передачи выполняет роль высокоомного сопротивления, а потенциальная яма под  $\phi_1$  выполняет роль емкости. Медленное накопление в каждой яме под  $\phi_1$  проявляется в пространственном изменении первоначально однородного распределения заряда в ПЗС. Зарядовый пакет в каждой потенциальной яме под  $\phi_1$  представляет дискретное выборочное значение корреляционной функции. После интервала накопления эти зарядовые пакеты считаются из ПЗС-регистра сдвига и, таким образом, пространственное изменение уже проявляется в виде сигнала, характеризующего корреляционную функцию входного высокочастотного и опорного сигналов, но в соответствующем временному масштабе. Отметим также, что высокочастотное заполнение будет содержать  $\tau$  ( $2f_c - 2f_s$ ) (где  $\tau$  — длительность входного сигнала) циклов по аналогии с ЗУ на ПАВ/ПЗС.

В [19] приводятся также результаты экспериментов по обработке псевдослучайных и бифазно-кодированных сигналов с длительностью, значительно превышающей время задержки ЛЗ на ПАВ и с различным соотношением сигнал-шум. Возможность обработки сигналов такой большой длительности обеспечивалась за счет программного управления коррелятором путем взятия выборки во временному окне 7 мкс. Параметры рассмотренного коррелятора приведены ниже.

Центральная частота . . . . .	97 МГц
Ширина полосы пропускания . . .	20 МГц
Максимальное время накопления	100 мкс
Временное окно . . . . .	7 мкс

Тактовая частота ПЗС . . . . .	100 кГц
Максимальная мощность входного сигнала . . . . .	27 дБм
Максимальный уровень выходного сигнала . . . . .	100 мВ
Динамический диапазон . . . . .	20 дБ
Информационная емкость . . . . .	2000

К преимуществам данного устройства нужно отнести возможность корреляционной обработки широкополосных аналоговых сигналов большой длительности, компактность, небольшое потребление энергии и более предпочтительный (низкочастотный) вид выходного сигнала по сравнению с акустоэлектронными конволверами, позволяющий сопрягать достаточно просто это устройство с цифровыми устройствами последующей обработки.

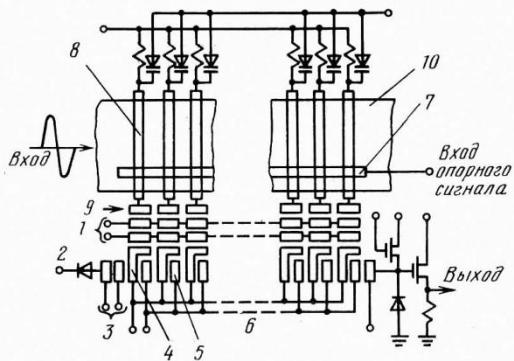
К недостаткам следует отнести небольшой динамический диапазон устройства, ограниченный в основном геометрическими шумами, влиянием токов утечки и другими дефектами ПЗС-структур, которые не зависят от входного сигнала и, следовательно, могут быть исключены при последующей обработке.

Авторами [20] проводились исследования и с сигналами большей длительности (порядка 10 мс), которые позволяют предположить, что в таком устройстве можно обрабатывать сигналы с информационной емкостью более 200 000.

В [21] рассматривается улучшенный вариант коррелятора на ПАВ/ПЗС с временным накоплением, который схематически изображен на рис. 7. Данное устройство позволяет осуществлять корреляционную обработку сигналов с максимальной шириной полосы пропускания 40 МГц, длительность 10 мс и обеспечивает динамический диапазон 43 дБ. Это устройство относится к пространственно разделенным структурам. Оно состоит, так же как и рассмотренные выше ПАВ/ПЗС-структуры [1, 2, 19, 20], из ЛЗ на ПАВ на ниобате лития и полупроводниковой подложки из кремния с ПЗС-структурой, но в отличие от предыдущего коррелятора имеет ряд особенностей. Во-первых, вместо линейной матрицы МОП-транзисторов здесь используется линейная матрица из сопротивлений и варикторов. Во-вторых, вместе второго ВШП, на который подается опорный сигнал, применяется входной электрод, нанесенный на ту же поверхность, что и первый ВШП, размещенный на периферийной части звукопровода относительно распространяющейся ПАВ и параллельно ей. Этот входной электрод посредством емкостной связи взаимодействует с тремястями штырями выборки. Такой ввод опорного сигнала позволяет в два раза увеличить ширину полосы обрабатываемых сигналов и обеспечивает более эффективную связь с интегральными варикторами-перемножителями. В-третьих, вместо трех электродов передачи, связывающих штырь выборки с мультиплексором на ПЗС, используется только два.

Принцип действия рассматриваемого коррелятора на ПАВ/ПЗС аналогичен описанному выше. При подаче на входной ВШП высокочастотного сигнала излучается ПАВ, сопровождаемая электриче-

**Рис. 7. Коррелятор на ПАВ/ПЗС:**  
 1 — управляющие электроды; 2 — входной диод; 3 — входные электроды; 4 — электрод ПЗС-регистра сдвига  $\Phi_1$ ; 5 — электрод ПЗС-регистра сдвига  $\Phi_2$ ; 6 — трехсоставленный ПЗС-регистр сдвига; 7 — входной электрод; 8 — штыре выборки; 9 — результирующие потенциальные ямы; 10 — ЛЗ на ПАВ



ским полем, которое приводит к появлению в каждом штыре выборки тока смещения  $I_c(t - \tau_i)$  (где  $\tau_i$  — временная задержка ПАВ между соседними штырями). Кроме того, в каждом штыре выборки протекает ток  $I_0(t)$ , пропорциональный опорному сигналу. При этом на каждом штыре выборки образуется напряжение, пропорциональное квадрату суммы токов  $[2I_0(t) I_c(t - \tau_i) + I_0^2(t) + I_c^2(t - \tau_i)]$ ,

т. е. происходит перемножение сигналов. Это напряжение далее интегрируется  $RC$ -интегратором, образованным частично открытым каналом управляющих электродов (сопротивление  $R$ ) и потенциальной ямой под  $\Phi_1$  (емкость  $C$ ). Интеграл от первого члена представляет выборочное дискретное значение функции корреляции входного и опорного сигналов. Интеграл от  $[I_0^2(t) + I_c^2(t - \tau_i)]$  независим от  $\tau_i$  и представляет собой постоянную величину, одинаковую для всех штырей выборки. Считывание осуществляется после интервала накопления возобновлением последовательного тактирования ПЗС-регистра сдвига. При этом так же, как и в уже рассмотренных устройствах, меняя тактовую частоту регистра, можно получить сигнал, соответствующий автокорреляционной функции в различном временном масштабе. Процесс накопления в данном устройстве в сильной степени зависит от стабильности напряжения смещения, подаваемого на управляющий электрод, поскольку оно определяет стабильность постоянной времени  $RC$ . При наличии стабильного потенциала на первом управляющем электроде и при соответствующей тактовой последовательности, подаваемой на промежуточный управляющий электрод, можно получить время линейного накопления до 10 мс.

С целью увеличения динамического диапазона, ограниченного, в основном, геометрическим шумом, в [21] использовалось два метода подавления геометрического шума — аналоговый и цифровой, которые основывались на независимости геометрического шума от уровня входных сигналов. При первом методе (аналогичном описанному в [10]) осуществляется когерентное вычитание геометрического шума. При этом одна из рассмотренных структур ПАВ/ПЗС применяется в качестве аналоговой ЛЗ для временного запоминания выходного сигнала коррелятора. Сначала

используется инвертированный опорный сигнал, а результирующий сигнал ( $N-C$ ) (где  $N$  — шум,  $C$  — сигнал на выходе коррелятора) «запоминается» в ЛЗ. Затем осуществляется свертка с неинвертированным опорным сигналом, а на выходе коррелятора образуется результирующий сигнал ( $N+C$ ). После этого осуществляется когерентное вычитание сигналов ( $N-C$ ) и ( $N+C$ ). Таким образом, получается выходной сигнал в виде

$$[(N+C) - (N-C)] = 2C. \quad (4)$$

Такая реализация позволяет вдвое увеличить полезный сигнал и компенсировать геометрический шум в реальном масштабе времени.

Цифровая схема подавления геометрического шума не дала значительных преимуществ по сравнению с аналоговой, но для ее реализации необходимо было использовать аналого-цифровой преобразователь и компьютер. На макете улучшенного коррелятора на ПАВ/ПЗС были проведены экспериментальные исследования по обработке различных видов сигналов при разных соотношениях сигнал-шум на входе, длительности и уровне входных сигналов. В ходе этих исследований была определена хорошая линейность устройства, получено усиление, близкое к теоретическому (33 дБ), динамический диапазон был равен 43 дБ. Результирующий шум определяется тепловыми шумами ПЗС. По мнению авторов [21], можно улучшить параметры этого коррелятора, уменьшив этот шум на 10 дБ, если использовать малошумящие ПЗС, применяемые в фотоприемниках изображения [22]. Динамический диапазон при этом может быть увеличен до 53 дБ при усилении 43 дБ. Максимальное время накопления также может быть более 10 мс. Ниже приведены основные параметры улучшенного коррелятора на ПАВ/ПЗС.

Центральная частота . . . . .	107 МГц
Ширина полосы пропускания . . .	40 МГц
Время накопления . . . . .	10 мс
Временное окно . . . . .	3,5 мкс
Тактовая частота ПЗС . . . . .	100 кГц
Максимальная мощность входного сигнала . . . . .	27 дБм
Максимальная мощность опорного сигнала . . . . .	10 дБм
Максимальный уровень выходного сигнала . . . . .	350 мВ
Динамический диапазон . . . . .	43 дБ

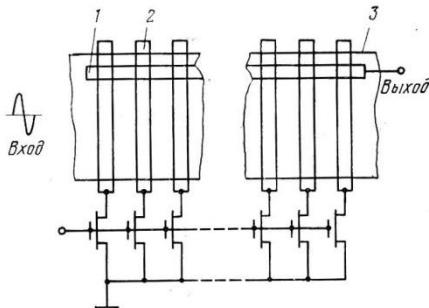


Рис. 8. Коррелятор на ПАВ/МОП:  
1 — суммирующий электрод; 2 — штыри выборки; 3 — ЛЗ на ПАВ

По сравнению с другими устройствами свертки этот коррелятор обладает теми же преимуществами, что и рассмотренный выше, при этом достигаются более высокие параметры, что позволяет обрабатывать высокочастотные аналоговые сигналы с базой  $2 \cdot 10^6$  и более.

Наиболее простой по своей реализации коррелятор с памятью рассматривается в [23] (рис. 8). Конструктивно он представляет собой двухъярусную пространственно разделенную структуру, состоящую так же, как и все приведенные выше устройства, из пьезоэлектрического звукопровода из ниобата лития, на котором выполнена ЛЗ на ПАВ, и полупроводниковой подложки из кремния. Звукопровод и подложка разделены воздушным зазором в 350 нм. На одном из концов пьезоэлектрического звукопровода расположен входной ВШП, на который подаются высокочастотный входной и опорный сигналы. На периферийной части звукопровода аналогично [21] расположен выходной суммирующий электрод. Таким образом, коррелятор представляет собой устройство с одним сигнальным входом и одним выходом. На полупроводниковой подложке (на ее внутренней стороне по отношению к звукопроводу) расположены 300 штырей выборки [19], которые электрически связаны со стоками соответствующих полевых МОП-транзисторов, расположенных на той же полупроводниковой подложке. Истоки МОП-транзисторов заземлены, а на все затворы их подается соответствующий управляющий сигнал. Описываемое устройство функционально эквивалентно более ранним типам акустоэлектронных конволверов [3—5], в которых накопление осуществляется в диодной матрице. Однако если в этих конволверах периодичность диодной матрицы определяется частотой колебаний ПАВ, то в описываемом корреляторе периодичность штырей выборки определяется шириной спектра входного сигнала с учетом его транспортирования в низкочастотную область аналогично [2].



Рис. 9. Осциллограмма выходного сигнала коррелятора

Устройство функционирует следующим образом. На все затворы транзисторов подается управляющее напряжение, открывая их. На входной ВШП подается высокочастотный опорный сигнал, и высокочастотное электрическое поле, сопровождающее излучаемую при этом ПАВ, взаимодействует со свободными носителями в кремниевом областях под штырями выборки. Благодаря низкоомному выходному сопротивлению открытых транзисторов между штырями выборки протекают токи смещения, вызывающие обмен зарядов между ними. При этом заряд в области каждого штыря выборки соответствует мгновенному значению амплитуды ПАВ в данный момент времени. В момент нахождения опорной ПАВ в области акустоэлектронного взаимодействия, т. е. в области штырей выборки, матрица транзисторов очень быстро выключается, т. е. транзисторы закрываются соответствующим управляющим напряжением. Длительность возникающего переходного процесса составляет порядка 1 нс. При этом распределение зарядов и потенциалов на штырях выборки является аналогом опорного колебания, которое может храниться, таким образом, в течение длительного времени (около 1 с). Затем на тот же ВШП подается высокочастотный аналоговый входной сигнал, излучается ПАВ, высокочастотным электрическим полем также индуцируется соответствующее распределение зарядов в областях штырей выборки. При обратном смещении транзисторов на варакторных нелинейностях их стоковых областей происходит перемножение уже записанного распределения зарядов с вновь полученным за счет распространяющейся ПАВ. Локальные результаты этого перемножения суммируются на выходном электроде коррелятора, образуя таким образом сигнал, соответствующий желаемой корреляционной функции в реальном масштабе времени.

На рис. 9 показана осциллограмма выходного сигнала устройства при обработке входного радиоимпульса длительностью 1,8 мкс с несущей частотой 100 МГц и при одинаковых уровнях входного и опорного сигналов. На осциллограмме видны четыре сигнала. Крайний справа, треугольной формы, — полезный, остальные — ложные (два прямоугольной формы обусловлены наводкой от входного сигнала за счет паразитных связей ВШП и суммирующего выходного электрода, третий обусловлен опорным сигналом). Уровень первых двух ложных сигналов может быть минимизирован путем хорошей развязки между входным ВШП и выходным суммирующим электродом, третий может быть также исключен из выходного сигнала после записи опорного. Время хранения опорного сигнала при снижении уровня главного пика корреляционной функции (корреляционного пика) на 3 дБ составляет около 1 с.

Подобный описанному, коррелятор может быть реализован в виде монолитной структуры — ПАВ/МОП-транзисторы на пьезополупроводниковой подложке, например из арсенида галлия [23]. Однако более высокие токи утечки затворов поле-

вых транзисторов снижает при этом время хранения до 10...100 мс, что вполне допустимо, так как время перепрограммирования этого устройства составляет около 15 мкс. В этом случае применение широкополосных преобразователей позволит обрабатывать более широкополосные сигналы той же длительности [5].

К преимуществам рассмотренного коррелятора относятся простота реализации и возможность перехода к монолитной структуре на современных пьезополупроводниках.

К недостаткам следует отнести небольшую длительность обрабатываемых сигналов, ограниченную физической длиной звукопровода, а также наличие ложных сигналов, подавление которых несколько усложняет конструкцию устройства.

#### 4. СОГЛАСОВАННЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ПАВ/ПЗС

Еще один тип устройств на ПАВ/ПЗС представлен в [24, 25]. Это программируемый согласованный фильтр, предназначенный (как и устройства, описанные в [19—21, 23]) для оптимальной обработки сложных сигналов различного вида. Однако в отличие от традиционного согласованного фильтра в данном устройстве импульсная характеристика адекватна опорному низкочастотному сигналу, который предварительно вводится последовательно в ПЗС-регистр сдвига.

Схематически согласованный фильтр на ПАВ/ПЗС показан на рис. 10. Конструктивно он аналогичен рассмотренным выше устройствам, т. е. представляет двухъярусную пространственно-разделенную структуру из ЛЗ на ПАВ, выполненную на пьезоэлектрической подложке из ниобата лития, связанную через воздушный зазор в 350 нм с полупроводниковой подложкой из  $p$ -кремния, на которой выполнены линейная матрица МОП-транзисторов смещения, 300 штырей выборки [24], связанных электрически с соответствующими транзисторами смещения. Под нижними концами штырей выборки выполнены опорные потенциальные ямы. На этой же подложке выполнен ПЗС-регистр сдвига, 300 параллельных выходов которого через ПЗС структуры электродов передачи связаны со штырями выборки. На пьезоэлектрической подложке методом литографии нанесен входной ВШП. На той же рабочей поверхности пьезоэлектрической подложки расположен выходной суммирующий электрод шириной 0,25 мм и толщиной 50 мкм. С противоположного конца его по отношению к входному ВШП снимается выходной сигнал. Выходной суммирующий электрод выполнен так же, как в [21], в периферийной части подложки, чтобы не искажать фазовый фронт ПАВ. Толщина суммирующего электрода меньше величины воздушного зазора между полупроводниковой и пьезоэлектрической подложками.

Конструкция программируемого согласованного фильтра на ПАВ/ПЗС очень близка к конструкции коррелятора [21], по принципу же действия они существен-

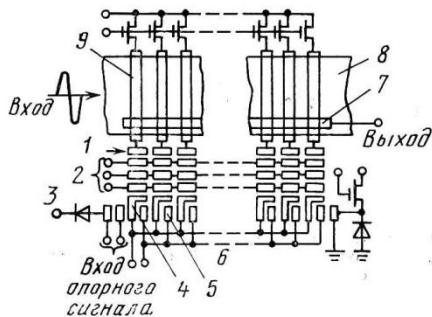


Рис. 10. Согласованный фильтр на ПАВ/ПЗС:  
1 — опорные потенциальные ямы; 2 — электроды передачи; 3 — входной диод; 4 — электрод ПЗС-регистра сдвига  $\Phi_1$ ; 5 — электрод ПЗС-регистра сдвига  $\Phi_2$ ; 6 — трехсоставленный электрод ПЗС-регистра сдвига; 7 — суммирующий электрод; 8 — ЛЗ на ПАВ; 9 — штырь выборки

но отличаются. Если коррелятор [21] является устройством с «быстрым» вводом и «медленным» выводом, то согласованный фильтр можно считать наоборот — устройством с «медленным» вводом и «быстрым» выводом. Выходной высокочастотный сигнал снимается с выходного суммирующего электрода аналогично простейшему коррелятору [17].

До подачи на вход устройства высокочастотного сигнала на штырях выборки с помощью линейной матрицы транзисторов смещения устанавливается некоторый средний потенциал (аналогично устройствам, описанным в [19, 21, 23]), после чего в ПЗС-регистр сдвига вводится опорный низкочастотный сигнал. При этом используется известная схема уравнивания потенциалов — «заливка — сброс» [9]. Последовательное тактирование регистра продолжается до тех пор, пока опорный низкочастотный сигнал не будет введен в регистр сдвига полностью. Затем с помощью группы электродов передачи осуществляется передача зарядовых пакетов из каждой потенциальной ямы под электродами  $\Phi_1$  в опорные потенциальные ямы, расположенные под соответствующими штырями выборки. При этом изменяется пространственное распределение первоначально однородного потенциала на штырях выборки. Таким образом, осуществляется программирование согласованного фильтра на ПАВ/ПЗС, т. е. подготовка его к обработке высокочастотного сигнала. Частота последовательного тактирования составляла 100 кГц, время программирования 6 мс.

Результаты детектирования высокочастотного электрического поля штырями выборки перемножаются с дискретными значениями соответствующих потенциалов опорного сигнала на стоковых областях МОП-транзисторов матрицы смещения. Оптимизация этого нелинейного акусто-электронного взаимодействия достигается установкой однородного смещения на штырях выборки.

Результаты перемножения в виде потенциалов суммируются на выходном электроде за счет емкостной связи его со штырями выборки. Таким образом, сигнал на выходе фильтра соответствует взаимно-корреля-

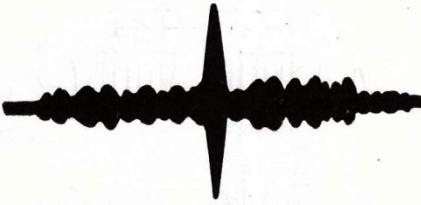


Рис. 11. Осциллограмма выходного сигнала согласованного фильтра на ПАВ/ПЗС при обработке фазоманипулированного сигнала

ционной функции ПАВ-сигнала и опорного сигнала от ПЗС, т. е. осуществляется сжатие импульсного входного сигнала во временной области. Размер ПЗС-элемента 40,6 мкм определяет частоту выборки  $f_s = 85,7$  МГц и поэтому для того, чтобы не было искажений за счет эффекта наложения, частота входного сигнала должна находиться в пределах 85,7...128,6 МГц, а пространственная частота опорного сигнала на штырях связи должна быть равна  $(f_c - f_s)/v$ , где  $v = 3480$  м/с — скорость распространения ПАВ. Таким образом, при тактовой частоте ПЗС регистра 100 кГц спектр опорного сигнала должен быть в диапазоне 0...50 кГц.

На макете устройства были проведены экспериментальные исследования по обработке различных аналоговых сигналов, включая радиоимпульс, ЛЧМ-сигнал и сигнал, фазоманипулированный 13-разрядным кодом Баркера (рис. 11). Несущая частота опорного фазоманипулированного сигнала была равна 25 кГц. На осциллограмме выходного сигнала, как и ожидалось, видны 12 боковых лепестков. Уровень главного корреляционного пика при входном сигнале 27 дБм составил  $-41$  дБм, что значительно превышает уровень теплового шума ( $-98$  дБм) в полосе 40 МГц. В последующих разработках авторы предполагают увеличить уровень главного пика на 10 дБ и динамический диапазон устройства до 57 дБ и более за счет увеличения эффективности взаимодействия заряд — штырь выборки. В рассматриваемом макетном образце отношение емкостей штырь/потенциальная яма  $\Phi_1$  составляет около 2. Ширина корреляционного пика по уровню  $-3$  дБ равна 250 нс, что соответствует расчетному значению, но в области боковых лепестков имеются плохо выраженные нули. Уровень боковых лепестков составляет  $-14,5$  дБ [24] и

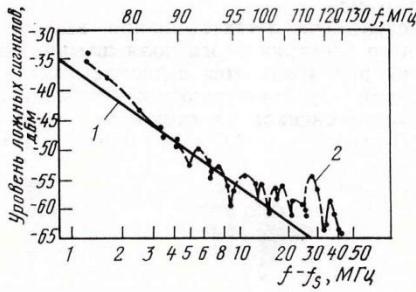


Рис. 12. График зависимости  $R_{\max}(f)$   
1 — расчетная; 2 — экспериментальная

$-15,5$  дБ [25] относительно уровня главного корреляционного пика (теоретическая оценка  $-22,3$  дБ, причина такого расхождения будет рассмотрена ниже). Время хранения опорного сигнала ограничено вследствие тепловой генерации и наличия токов утечки в  $n-p^+$ -переходе сток — подложка транзисторов смещения. Уменьшение уровня опорного сигнала приводит к потерям в корреляционном пике в 3 дБ за 1 с после программирования. На введение и перепрограммирование опорного сигнала при тактовой частоте ПЗС-регистра сдвига 100 кГц требуется 6 с. Увеличением тактовой частоты до 5 МГц (что вполне реально) можно снизить время перепрограммирования до 120 мкс.

Рассматриваемому устройству присущ ряд особенностей, которые приводят к нежелательному ухудшению его параметров. Так, вышеуказанная разница между теоретическим и экспериментальным значениями уровней боковых лепестков обусловлена детектированием объемных акустических волн (ОАВ), возбуждаемых входным ВШП, в полупроводниковой части устройства. Влияние паразитных ОАВ, как правило, имеет место во всех акустоэлектронных устройствах, использующих ПАВ. При соответствующей конструкции ЛЗ ложные сигналы, обусловленные ОАВ, могут быть снижены до 35 дБ, как, например, в корреляторе с памятью на диодах Шотки [7].

В согласованном фильтре на ПАВ/ПЗС появляются дополнительные частотно-зависимые ложные сигналы за счет детектирования ПАВ решеткой штырей выборки, которую можно рассматривать тоже как ВШП. В [25] приведены результаты исследований этого влияния, для чего на вход согласованного фильтра на ПАВ/ПЗС подавались длинные радиоимпульсы с изменением несущей частоты.

Импульсная характеристика решетки штырей выборки как  $N$ -периодного ВШП представляется собой радиоимпульс с несущей частотой  $f_s$ . При этом выходной сигнал устройства представляет собой свертку его импульсной характеристики с входным радиоимпульсом. Огибающая этого входного сигнала может быть представлена как

$$R(f, t) = \frac{t}{t_0} \frac{A \cdot \sin x}{x}, \quad (5)$$

где  $x = \frac{t}{t_0} N \pi \frac{f - f_s}{f_s}$  для  $t < t_0$ ,  $t_0 = \frac{N}{f_s}$  — время прохождения сигналом решетки штырей выборки,  $A$  — коэффициент связи.

Максимальное значение этой функции в частотной области

$$R_{\max}(f) = \frac{Af_s}{N\pi(f - f_s)} \text{ для } (f - f_s) > \frac{f_s}{N}. \quad (6)$$

В логарифмическом масштабе эта зависимость представляет собой прямую линию с наклоном  $-20$  дБ на декаду (рис. 12). Отклонение экспериментальной зависимости от расчетной, начиная с частоты 90 МГц, обусловлено влиянием решетки штырей выборки и наличием ОАВ, генерируемых входным ВШП, что приводит

к гребенчатому характеру зависимости  $R_{\max}$  ( $f$ ). Нежелательное влияние решетки штырей выборки можно исключить введением непериодичности расположения штырей выборки.

Как и в корреляторе [23], в согласованном фильтре существуют ложные сигналы, обусловленные непосредственной связью емкостного характера между входным ВШП и выходным суммирующим электродом. Меры борьбы с ними аналогичны — хорошая развязка за счет физического разделения ВШП и выходного электрода. В конечном итоге качество работы программируемого согласованного фильтра на ПАВ/ПЭС будет зависеть как от давления рассмотренных ложных сигналов, так и от точности фазы и амплитуды опорного сигнала на штырях выборки.

Присущее всем рассмотренным гибридным структурам влияние геометрических шумов в согласованном фильтре количественно не оценивалось из-за влияния паразитных ОАВ. Параметры рассмотренного программируемого согласованного фильтра на ПАВ/ПЭС приведены ниже.

Центральная частота . . . . .	107 МГц
Ширина полосы пропускания . . .	40 МГц
Тактовая частота ПЭС . . . . .	100 кГц
Центральная частота опорного сигнала . . . . .	25 кГц
Ширина полосы пропускания по входу опорного сигнала . . . . .	50 кГц
Длительность входного сигнала . . . .	3,5 мкс
Время хранения опорного сигнала . . . . .	1,0 с
Максимальная мощность входного сигнала . . . . .	27 дБм
Максимальная выходная мощность . . . . .	-41 дБм
Динамический диапазон . . . . .	57 дБ
Уровень ложных сигналов . . . . .	14 дБ
Информационная емкость . . . . .	150

К преимуществам описываемого устройства относятся: возможность оптимальной обработки широкополосных аналоговых сигналов в реальном масштабе времени в сочетании с низкой скоростью записи опорного сигнала, что позволяет использовать для этой цели обычные цифровые микросхемы; небольшие габариты; низкая стоимость. Незначительное энергопотребление в сочетании с высокими параметрами позволит широко применять подобные устройства в различных системах обработки аналоговых сигналов. К недостаткам следует отнести небольшую длительность обрабатываемых сигналов. В перспективных разработках авторы [25] предполагают увеличить динамический диапазон и расширить полосу пропускания обрабатываемых сигналов до 100 МГц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smythe D. L. e. a. — Appl. Phys. Lett., 1978, v. 32, № 12.
2. Smythe D. L. e. a. — In: Proc. IEEE Ultrasonics Symp., Cherry-Hill, 1978.
3. Lahiri S. K. Chaki A. K. — In: Proc. IEEE Ultrasonics Symp., Boston, 1980.
4. Reible S. A. — IEEE. Trans., 1981, v. SU-28, № 3.
5. Gautier H., Maerfeld C. — In: Proc. IEEE Ultrasonics Symp., Boston, 1980.
6. Lewis M. F., West C. L. — In: Proc. IEEE Ultrasonics Symp., Chicago, 1981.
7. Hodge A. M. Lewis M. P. — In: Proc. IEEE Ultrasonics Symp., San Diego, 1982.
8. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов: Пер. с англ. / Под ред. Журбенко И. Г. — М.: Мир, 1982.
9. Приборы с зарядовой связью / Под ред. Хоувза М., Моргана Д: Пер. с англ: Под ред. Пресс Ф. П. — М.: Энергоиздат, 1981.
10. Geddes R. C., Cowan C. F., Mavor J. — Electronics Lett., 1979, v. 15, № 16.
11. Brookner E. — Microwave Journal, 1982, October.
12. Melloch M. R., Wagers R. S. — Appl. Phys. Lett., 1983, v. 43, № 1.
13. Morgan D. P. — Electronics Lett., 1981, v. 17, № 7.
14. Eden R. C. — Optical Engineering, 1981, v. 20, № 6.
15. Deremiak E. D., Bredthauer R. A. — Optical Engineering, 1982, v. 21, № 5.
16. Lampe D. R. e. a. — IEEE Journal of Solid state Circuits, 1979, v. SC-14, № 1.
17. Lewis M. F. e. a. — IEE Proc., 1984, v. 131, № 4.
18. Ericson C. A. — Microwaves RF, 1983, November.
19. Smythe D. L. e. a. — Appl. Phys. Lett., 1979, v. 34, № 10.
20. Ralston R. W. e. a. — In: Proc. IEEE Ultrasonics Symp., New Orleans, 1979.
21. Smythe D. L. e. a. — In: Proc. IEEE Ultrasonics Symp., Boston, 1980.
22. Burke B. E. e. a. — In: Proc. Government Microcircuit Applications Conf., 1980.
23. Smythe D. L., Ralston R. W. — Appl. Phys. Lett., 1981, v. 38, № 11.
24. Ralston R. W. e. a. — Appl. Phys. Lett., 1979, v. 35, N 5.
25. Smythe D. L. e. a. — In: Proc. IEEE Ultrasonics Symp., New Orleans, 1979.