

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

(начало см. в № 3 (21) 2002 г., с. 59-62)

Милинкис Б.М., кандидат технических наук, доцент
Щука А.А., доктор технических наук, профессор (Московский институт радиотехники, радиоэлектроники и автоматики (Технический университет))

В зависимости от типа используемой динамической неоднородности, континуальной среды, той или иной комбинации физических полей или явлений различают следующие направления в функциональной электронике: функциональная акустоэлектроника, функциональная магнитоэлектроника, функциональная оптоэлектроника, функциональная плазмоэлектроника, функциональная диэлектрическая электроника, молекулярная электроника и т.п. Объединяющим их признаком является динамическая неоднородность как носитель или транслятор информации.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ АКУСТО- ЭЛЕКТРОНИКА

Функциональная акустоэлектроника - это направление функциональной электроники, в котором исследуются акустоэлектронные эффекты и явления в различных твердых континуальных средах, а также возможность создания изделий электронной техники для обработки, передачи, хранения информации с использованием динамических неоднородностей акустической и/или электромагнитной природы.

К акустоэлектронным явлениям и эффектам относятся:

- генерация, распространение, преобразование и детектирование объемных и поверхностных акустических волн;
- преобразование электрического сигнала в акустический и обратно;
- электронное поглощение и усиление акустических волн;
- акустоэлектронные и акустомаг-

нитные эффекты, акустопроводимость;

- нелинейные акустоэлектронные явления: генерация гармоник, параметрическое и супергетеродинное усиление звука, акустоэлектронные домены;

- взаимодействие света и звука в твердых телах, дифракция, модуляция и сканирование света звуком.

В твердом теле могут возбуждаться акустоэлектрические волны, представляющие собой некоторое возмущение вследствие деформации материала. Такие деформации имеют место при движении отдельных атомов и сопряжены с изменением расстояний между ними. При этом возникают внутренние упругие силы, стремящиеся вернуть материал в исходное состояние. Колебания атомов происходят вблизи положения равновесия, и при этом генерируется волна механического напряжения и растяжения.

Если размеры звукопровода намного больше длины акустической волны, то в нем могут распространяться объемные акустические волны.

В однородной среде со свободной плоской поверхностью существуют поверхностные акустические волны (ПАВ). По вектору поляризации волн ПАВ бывают двух типов: для вертикальной поляризации характерно расположение вектора колебательного смещения частицы среды в перпендикулярной границе плоскости; для горизонтальной поляризации вектор смещения частицы среды параллелен границе и перпендикулярен направлению распространения волны.

Возбуждение динамических неоднородностей в виде акустической волны в пьезоэлектрике осуществля-

ется с помощью вложенных друг в друга групп электродов. Данная система электродов получила название встречно-штыревых преобразователей (ВШП). Другое название такой системы электродов - двухфазный преобразователь ПАВ. Две группы чередующихся электродов соединены шинами, которые в свою очередь подключены к источнику напряжения (рис. 1).

При подаче на ВШП напряжения каждая пара электродов возбуждает поверхностную акустическую волну. Если период преобразователя $(a + b)$ равен длине ПАВ, то благодаря явлению акустического синхронизма волны, возбуждаемые каждой парой электродов, имеют одинаковую фазу и происходит их когерентное сложение.

Суммирование происходит за счет локальных деформаций, образующихся под промежутками между электродами. Образовавшаяся деформация начинает перемещаться в оба направления и достигает следующих промежутков как раз в тот момент, когда полуволна внешнего напряжения достигнет максимума и вызовет деформацию под своими электродами. Сложение деформаций происходит при выполнении условия $\lambda = 2(a + b) = V/f$, где λ , V , f - соответственно длина, скорость и частота звуковой волны. Такая картина наблюдается под каждой парой ВШП. Чем больше штырей содержит преобразователь, тем он эффективней.

Частота синхронизации или центральная (рабочая) частота определяется выражением:

$$f_0 = V/\lambda = V/2(a + b) = V/d,$$

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

Важной особенностью распространения динамических неоднородностей акустической природы в континуальных средах с различными физическими свойствами является существующий эффект генерации динамических неоднородностей другой природы. Вследствие явления акустоэлектронного взаимодействия происходит воздействие акустической волны на электроны проводимости в твердых телах. Результатом такого воздействия является обмен энергией и импульсом между акустической волной и электронами проводимости. Например, передача энергии акустической волны электронам приводит к электронному поглощению звука, а передача импульса акустической волны стимулирует возникновение электрического тока. Возможно усиление звука за счет стимулированного дрейфа электронов в твердом теле и частичной передачи энергии акустической волне.

Возникающая при распространении акустической волны деформация вызывает в пьезоматериалах переменное электрическое поле, амплитуда и фаза которого находятся в прямой зависимости от объемного заряда электронов проводимости (прямой пьезоэффект). В свою очередь это поле вызывает деформацию кристалла и соответственно изменение характера распространения волны (обратный пьезоэффект). Акустическая волна генерирует волны электрических полей. В местах, где кристалл сжимается волной, наведенное электрическое поле замедляет движение электронов, а в местах растягивания кристалла волной наблюдается ускорение электронов за счет внутреннего электрического поля. Под действием этих полей носители стремятся сгруппироваться в областях с минимумом потенциальной энергии. Возникают затухающие волны объемного заряда, несколько запаздывающие по отношению к акустической волне (рис. 2). Волны объемного заряда представляют собой динамические неоднородности электрической природы, стимулированные ПАВ.

Если звукопровод поместить в постоянное электрическое поле E_0 , то возникает дрейф электронов со скоростью

$$V_{др} = \mu E_0,$$

где μ - подвижность. В случае,

когда $V_{др} > V_{пав}$ ($V_{пав}$ - фазовая скорость распространения акустической волны), электроны отдают свою энергию ПАВ и амплитуда ПАВ резко возрастает (рис. 2.б).

Возникает явление обмена энергией между динамическими неоднородностями акустической и электронной природы в пределах одной континуальной среды.

Динамические неоднородности можно широко использовать в процессорах сигналов и устройствах памяти для обработки и хранения информации.

На рис. 3 приведена классификация устройств функциональной акустоэлектроники.

Впервые приборы на ПАВ были применены в военных радиоэлектронных системах, и только затем - в промышленной и бытовой аппаратуре. Это, прежде всего, фильтры промежуточной частоты в ТВ-приемниках и резонаторы в ВЧ-генераторах. Резонансные ПАВ-фильтры с относительно узкой полосой пропускания и низкими вносимыми потерями нашли применение в системах поискового вызова в радиотелефонах. Они работают на средних частотах в диапазонах 136-176 и 420-480 МГц, а максимальные вносимые потери равны 4 и 5 дБ.

ПАВ-фильтры со средней полосой пропус-

кания находят применение во входных приемных устройствах цифровых радиотелефонов и систем передачи данных. На частоте 900 МГц потери составляют 2,5 дБ.

Акустоэлектронные Фурье-процессоры (АЭФП) представляют собой аналоговые преобразователи для вычисления дискретного и непрерывного преобразования Фурье.

Заметим, что АЭФП выполняют операции, которые можно отнести к функциям высшего порядка.

- Перечислим основные из них:
 - синтез частот в диапазоне 500

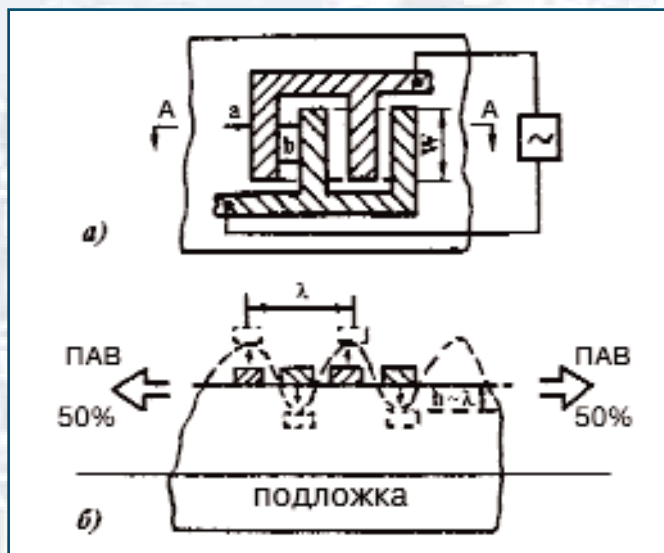


Рис. 1. Возбуждение ПАВ с помощью ВШП: а - топология ВШП; б - схема возникновения акустических волн (сечение АА)

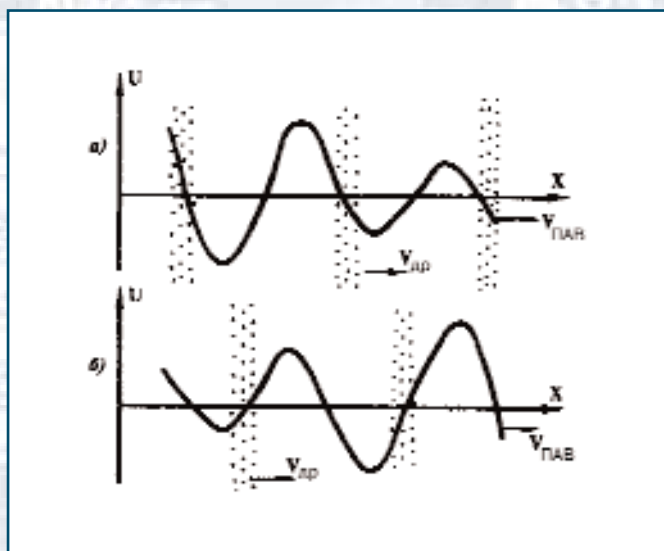


Рис. 2. Схема взаимодействия динамических неоднородностей акустической и электрической природы: а - при отсутствии потенциала; б - при наличии потенциала на звукопроводе

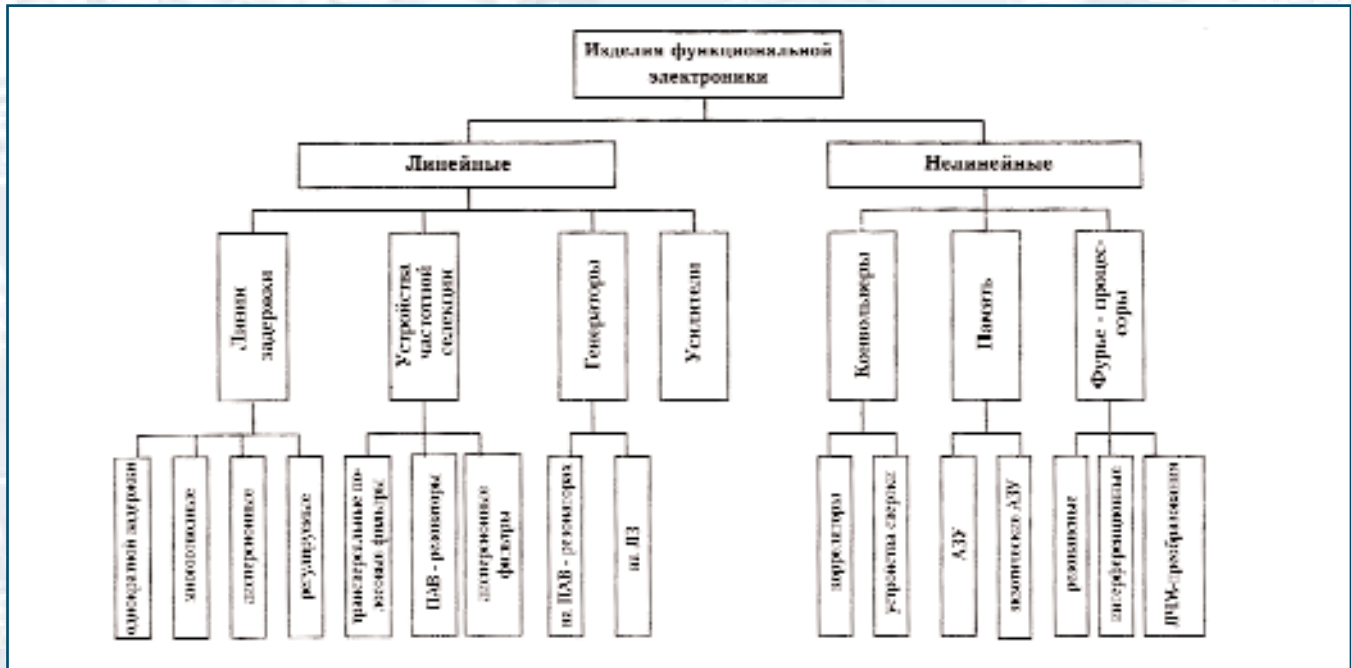


Рис. 3. Классификация устройств функциональной акустоэлектроники

МГц с малым временем переключения при смене частот;

- демодуляция частотно-манипулированных сигналов;
- программируемая согласованная фильтрация;
- преобразование временного масштаба;
- нелинейная обработка сигналов для детального исследования;
- интегральные преобразования Гильберта, Меплина, Френеля, Лапласа.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Функциональная диэлектрическая электроника представляет собой направление в функциональной электронике, которое изучает явления и эффекты в активных диэлектриках, а также возможность создания приборов и устройств обработки информации на основе диэлектрических неоднородностей электрической, магнитной или электромагнитной природы.

В активных диэлектриках используются различные физические явления для генерации динамических неоднородностей различной физической природы: домены, квазичастицы.

Особый интерес представляют сегнетоэлектрические домены. Они определяют собой области однородной спонтанной поляризации. Раз-

меры доменов составляют несколько микрон и разделены переходной областью или доменной границей толщиной в несколько ангстрем. Поляризация *P* зависит от напряженности электрического поля *E* нелинейным образом. При циклическом изменении *E* вектор поляризации меняется от $+Ps$ до $-Ps$.

В сегнетомагнитных кристаллах одновременно существуют магнитная и электрическая дипольные структуры и соответственно векторы спонтанной поляризации *Ps* и спонтанной намагниченности *Ms*.

В элементарных ячейках кристаллографических структур сегнетомагнетиков должны находиться частицы, обладающие как электрическим дипольным моментом, так и магнитным. Сосуществование электрических и магнитных дипольных структур определяется принципом симметрии в различных кристаллографических структурах. Вещества определенной симметрии обладают магнитоэлектрическим эффектом. Он состоит в том, что при наложении электрического поля появляется пропорциональная полю намагниченность, а при наложении магнитного поля появляется электрическая поляризация, пропорциональная этому полю.

В общем случае для таких сред справедливы соотношения:

$$D = eE + vH, \quad B = \mu H + v'E,$$

где *v* и *v'* - магнитоэлектрические тензоры, *e* - диэлектрическая проницаемость, *μ* - магнитная проницаемость вещества.

Основными устройствами в области функциональной диэлектрической электроники можно назвать запоминающие устройства и оптические процессоры.

Использование диэлектрических материалов при создании запоминающих устройств весьма перспективно для создания новых приборов, характеризующихся энергонезависимостью, высоким выходным сигналом, устойчивостью к воздействию перегрузок и радиации. По функциональному назначению эти устройства близки к репрограммируемым полупроводниковым ЗУ (РПЗУ). Одними из первых устройств этого типа были сегнетоэлектрические ЗУ, изготовленные на поликристаллической сегнетокерамике типа цирконата - титаната свинца (PZT-керамика).

В разработанных пьезокерамических матрицах (ПКМ) считывание информации происходит без ее разрушения с тактовой частотой до 1 МГц, определяемой временем переполяризации. Допускается $10^6 \dots 10^8$ циклов перезаписи информации.

ПКМ выдерживают ударные нагрузки до 10 г и отличаются высокой радиационной стойкостью.

Процессоры для обработки больших информационных массивов, реализованные на принципах функциональной электроники, представля-

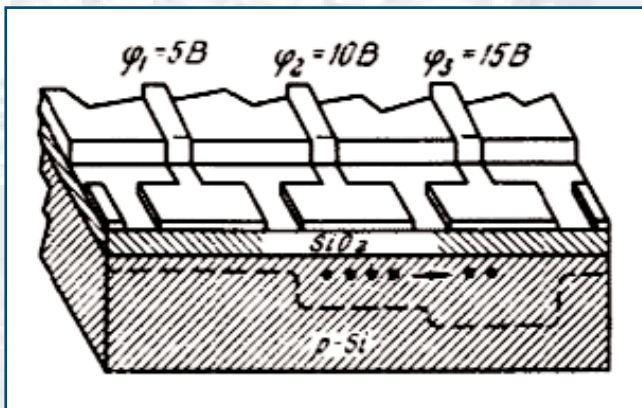


Рис. 4. Поперечное сечение трехфазного ПЗС в момент переноса заряда

ют значительный интерес. Это обусловлено тем, что такие устройства позволяют обрабатывать информацию в аналоговом виде, одновременно либо весь массив, либо его часть. Результирующая информация может быть преобразована в цифровую форму. Возможна операция выделения разностной информации между двумя и более временными состояниями информационного массива.

Процессоры можно реализовать на слоистых структурах типа сегнетоэлектрик - фотополупроводник. С обеих сторон такой структуры на-

пряжения. В освещенных участках сопротивление фотополупроводника резко уменьшается, и все приложенное напряжение падает на слое сегнетоэлектрика. Под засвеченными местами сегнетоэлектрик переполаризуется. В темных местах сопротивление фотополупроводника велико и все напряжение падает на него. Сегнетоэлектрик под темными местами не переполаризуется. Возникает пространственное распределение поляризации сегнетоэлектрика, соответствующее распределению освещенности.

Таким образом, оптический ин-

формационный массив преобразован в электрически заряженный информационный массив или зарядовый рельеф, который может быть легко считан.

Стирание записанной информации может быть осуществлено путем засветки всей поверхности фотополупроводника с одновременной подачей импульса напряжения, противоположного по знаку записывающему импульсу. Это позволяет перевести сегнетоэлектрик в исходное состояние.

Слоистая структура может применяться в качестве оптических процессоров, в частности, для преобразования входного некогерентного изображения в выходной когерентный сигнал, что и используется в голографических ЗУ.

Весьма перспективно применение таких структур в процессорах сложения и вычитания информационных массивов.

В устройстве известной конструкции ФОТОНИТУС'а операции сложения изображений можно применять для увеличения отношения сигнал/шум в процессе обработки изображений. Операцию вычитания

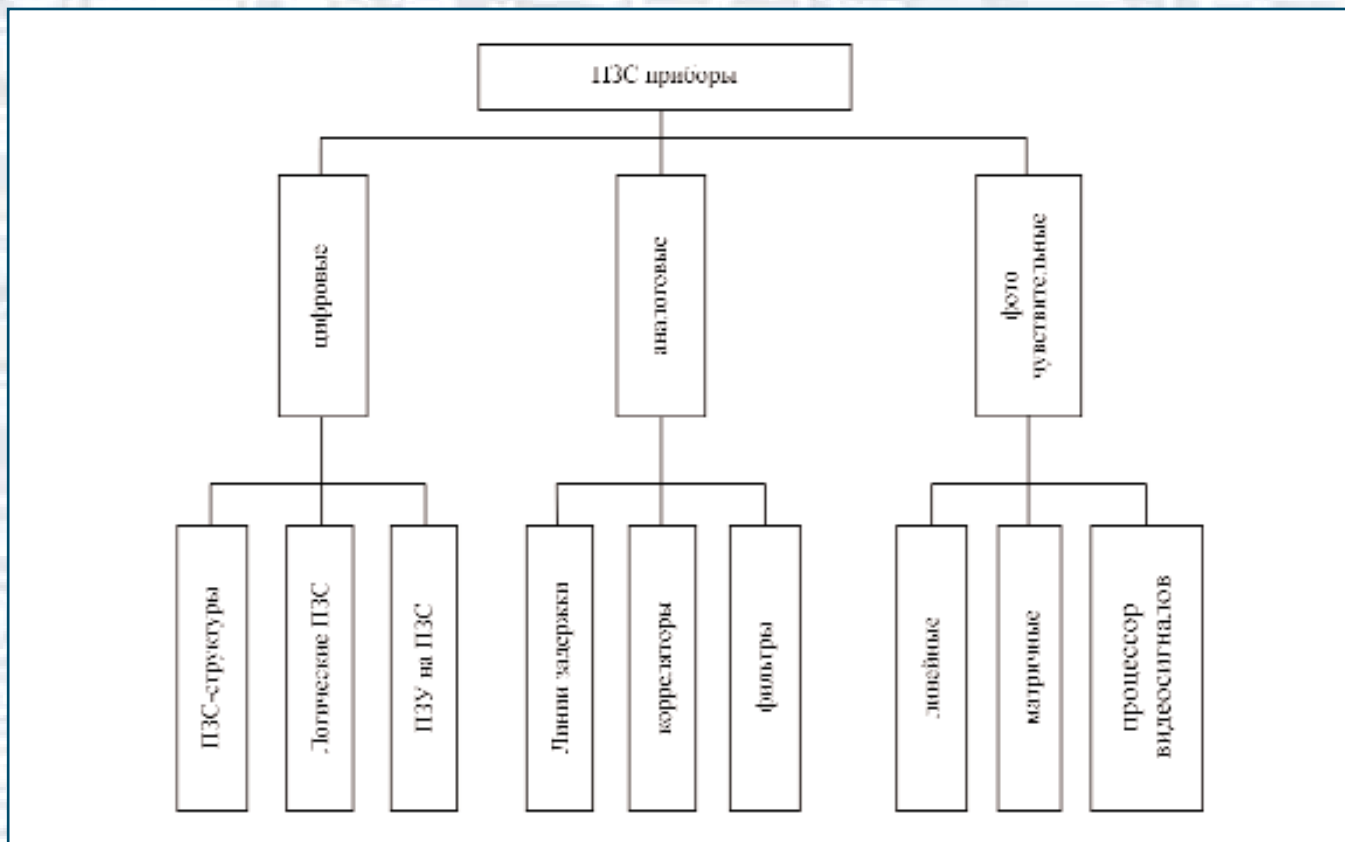


Рис. 5 Классификация ПЗС-приборов

изображений можно использовать для обращения позитивного изображения в негативное, дифференцирования изображения, выделения слабых контрастных контуров.

Таким образом, слоистые структуры типа сегнетоэлектрик - фотополупроводник можно использовать в основе устройств памяти, оптических процессоров, устройств отображения информации.

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Основным типом динамических неоднородностей здесь являются ансамбли заряженных частиц или зарядовые пакеты, сформированные из электронов или дырок.

Особый интерес представляют приборы с зарядовой связью - ПЗС-структуры. Это интегральные полупроводниковые приборы, в основе работы которых лежит принцип создания, передачи и хранения локализованного зарядового пакета в потенциальных ямах, образуемых в полупроводнике под действием внешнего электрического поля.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) представляют собой матрицы близко расположенных друг к другу МОП-конденсаторов. Соответствующие последовательности тактовых импульсов на затворах такой матрицы смещают ее отдельные МОП-конденсаторы в режим глубокого обеднения, так что зарядовые пакеты могут храниться под электродами матрицы и контролируемыми образом перемещаться вдоль поверхности кристалла, перетекая из-под одних электродов матрицы к соседним электродам.

Поперечное сечение секции ПЗС показано на рис. 4. Это устройство представляет собой полупроводниковую подложку, покрытую однородным слоем изолятора (SiO_2), на котором достаточно близко друг к

другу расположены затворы - электроды переноса. Процесс переноса сигнального заряда начинается в тот момент, когда на правый затвор подается импульс более высокого напряжения (рис. 4). При этом под него переместится зарядовый пакет. Таким образом, в континуальной среде полупроводника создается динамическая неоднородность, управляемая с помощью эффекта поля, что и позволяет управлять информационным сигналом. Расстояние между электродами должно быть минимальным, чтобы зарядовые пакеты перетекали без потерь на диффузию. Ввод информационного сигнала, то есть динамической неоднородности в ПЗС осуществляется статической неоднородностью с транзисторной структурой, в которой формируется зарядовый пакет. Вывод информационного сигнала из ПЗС также осуществляется статической неоднородностью с транзисторной структурой.

Отметим, что при конструировании конкретных микроэлектронных устройств на ПЗС (в зависимости от их назначения) применяются различные схемы организации тактового питания и взаимного расположения затворов. На рис. 5 приведена классификация ПЗС приборов.

Широкое практическое применение получили фоточувствительные ПЗС-приборы (ФПЗС). Существует также фоточувствительный прибор с зарядовой инжекцией (ФПЗИ), в котором перемещение зарядового пакета происходит внутри фоточувствительного элемента с последующей инжекцией в подложку или в область стока заряда. Такие структуры имеют следующие достоинства: практическое отсутствие потерь передачи; возможность использования в качестве фоточувствительных элементов фотодиодов,

имеющих большую по сравнению с МДП-структурами чувствительность; возможность организации произвольной выборки любого элемента или группы элементов.

В последнее время весьма перспективны ФПЗС для цветного телевидения, конструктивно оформленные в виде строчных или строчно-кадровых матриц с числом элементов 500x500 и совмещенных с цветокодирующим фильтром.

Цифровые ПЗС предназначены для обработки сигналов в виде дискретных функций, и их можно разделить на структуры для арифметико-логической обработки информации и структуры для хранения информации - запоминающие устройства.

В цифровые ПЗС можно включить регистры сдвига, логические и арифметические устройства, запоминающие устройства. В них информация представляется двумя уровнями зарядов, локализованных в потенциальной яме под затвором. Состояние логической единицы определяется максимальным зарядовым пакетом в яме, состояние логического нуля - отсутствием заряда или величиной фоновой заряда. Следует заметить, что цифровые устройства ПЗС являются устройствами динамического типа, так как необходима регенерация информации.

Окончание статьи будет опубликовано в следующем номере.



Предприятие ЭРА, г. Москва, тел.: (095) 330-62-22, 332-92-18
Агрегаты бесперебойного питания, инверторы, конверторы, зарядные устройства, гелио-ветро-дизель-генераторы, источники питания, корректоры мощности, помехоподавляющие фильтры, преобразователи частоты, приборы контроля качества электроэнергии, стабилизаторы, аккумуляторы. Системы: проектирование, монтаж, обслуживание, ремонт.