

## ПРИБОРЫ С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ФИЗИКЕ

*Л. М. Сороко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В обзоре изложены физические свойства приборов с переносом заряда и их технические характеристики. Описаны применения приборов с переносом заряда в системах считывания изображений, в запоминающих устройствах, при спектральной обработке сигналов в реальном времени, а также первый опыт использования приборов с переносом заряда в стримерной камере. Изложены топологические преобразования на стадии считывания изображений треков, которые могут быть реализованы при помощи приборов с переносом заряда.

The physical and technical performances of the charged coupled devices (CCD) are presented. The use of the CCD in the image scanning systems, in the memory devices, in the real time spectral transformations, and also in the first streamer chamber with the CCD are described. The topological transformations taken at the scanning stage of track pictures with the help of the CCD are considered.

### ПРЕДИСЛОВИЕ

Приборы с переносом заряда — разновидность полупроводниковых устройств, изготавливаемых на монокристалле кремния с примесной проводимостью. Основными носителями заряда в примесном полупроводнике являются либо электроны, создающие проводимость  $n$ -типа, либо дырки в кристалле, которым соответствует проводимость  $p$ -типа. Заряды основных носителей противоположны зарядам неосновных носителей. Если полупроводник имеет повышенную плотность легирующих добавок, то его проводимость обозначается  $n^+$  или  $p^+$ . Удельное сопротивление такого полупроводника меньше, чем полупроводника с низкой плотностью легирующих добавок.

На стыке двух полупроводников с противоположной проводимостью возникает полупроводниковый переход, обладающий свойствами электрического диода. Если обратно смещенный диод находится под небольшим запирающим потенциалом, то ток через диод в таком режиме создается только неосновными носителями полупроводника и его величина прямо пропорциональна концентрации неосновных носителей в области полупроводникового перехода.

Сочетание двух полупроводниковых переходов с узкой диффузионной областью обладает свойством электрического триода и называется транзистором. В полевом транзисторе управляющий электрод изолирован от полупроводникового канала слоем из окисла кремния. Такой электрод называют затвором. Полевой транзистор содержит исток, а также сток в виде двух островков  $n^+$ -проводимости в монокристалле кремния с проводимостью  $p$ -типа.

Трехслойная и многослойная структура полевых транзисторов типа металл — окисел — полупроводник (МОП) стала основой для широкого класса полупроводниковых устройств, включая приборы с переносом заряда. Причина этого состоит в том, что полупроводниковые устройства такой структуры можно изготовить методами современной планарной технологии при высокой степени сложности полупроводникового устройства.

Прибор с переносом заряда (ППЗ) имеет структуру одномерной цепочки или двумерной матрицы, каждый элемент которой представляет собой микроконденсатор типа металл-окисел-полупроводник. Особенность ППЗ состоит в том, что сигнальный заряд, возникающий в области микроконденсатора и попавший в потенциальную яму, можно перемещать из одной потенциальной ямы в соседнюю вдоль цепочки микроконденсаторов, которая выполняет функцию аналогового регистра сдвига. Высокое быстродействие и малое потребление энергии являются важнейшими техническими характеристиками такого регистра.

Приборы с переносом заряда используют в системах считывания изображений, в запоминающих устройствах оперативного действия, в аналоговых корреляторах и в быстродействующих системах спектрального анализа, выполняющих операции в реальном времени. ППЗ как приемник изображения и как преобразователь двумерных сигналов представляет большой интерес для физики частиц высоких энергий. Впервые ППЗ были использованы в Стэнфорде (США) в 1977 г. при фотографировании событий в двухметровой стримерной камере. Экспериментальные исследования, выполненные в Сиэттле (США), показали, что чувствительность ППЗ в качестве фотоприемника изображений примерно в 20 раз выше чувствительности самой лучшей фотоэмульсии, используемой при фотографировании стримеров.

В обзоре изложены физические свойства ППЗ и их технические характеристики. Описано применение ППЗ в системах регистрации изображений, в запоминающих устройствах, в системах спектрального анализа данных в реальном времени, устройство стримерной камеры на ППЗ, а также алгоритмы топологических преобразований на стадии считывания изображений треков, которые можно реализовать при помощи ППЗ.

## 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРИБОРОВ С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА

Прибор с переносом заряда [1—4] представляет собой одномерную цепочку или двумерную матрицу, каждый элемент которой является миниатюрным электрическим конденсатором типа металл — окисел — полупроводник (рис. 1). Если на металлический

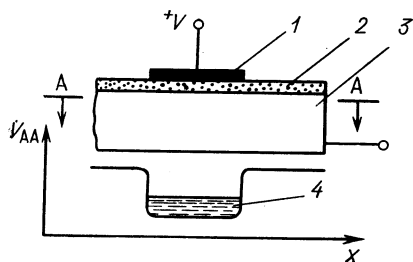


Рис. 1. Элемент прибора с переносом заряда — миниатюрный электрический конденсатор типа металл — окисел — полупроводник:

1 — металлический электрод; 2 — диэлектрик; 3 — полупроводник *p*-типа; 4 — форма потенциальной ямы, образующейся вблизи плоскости раздела между окислом и полупроводником

электрод такого конденсатора подать импульс положительного напряжения, то основные носители заряда *p*-полупроводника вытеснятся из поверхностного слоя и под затвором возникнет потенциальная яма. В образовавшейся потенциальной яме начнут накапливаться неосновные носители заряда полупроводника. Существует несколько механизмов появления зарядов в потенциальной яме: инжекция зарядов из диффузионной области полупроводника, образование зарядов при поглощении фотонов и процесс тепловой генерации [1]. Под действием зарядов, накопленных в потенциальной яме, потенциал и форма ямы изменяются и, в частности, изменяется высота барьера, соответствующая самым верхним уровням зарядов в яме. Глубину барьера для верхних уровней зарядов, заполняющих потенциальную яму, можно варьировать путем изменения эффективного падения напряжения на конденсаторе, толщины слоя окисел — диэлектрик, а также концентрации легирующих примесей в полупроводнике. Толщина слоя окисла кремния обычно равна 10 нм, напряжение электрического импульса около 10 В, а предельная поверхностная плотность зарядов, накапливаемых в динамическом режиме, составляет около  $10^{12}$  эл./см<sup>2</sup>.

Если два миниатюрных конденсатора расположить рядом друг с другом так, чтобы их области обеднения перекрывались, то потенциальные ямы двух конденсаторов станут связанными, а накопленный заряд потечет в более глубокую потенциальную яму. Такое перетекание зарядов составляет основу принципа действия приборов с переносом заряда.

В трехтактной системе [1] перенос заряда от одного миниатюрного конденсатора к другому происходит следующим образом

(рис. 2). Пусть в течение первого такта сигнальный заряд находится под электродом 1, имеющим более высокий потенциал, чем электроды 2 и 3. Если такой же потенциал подать на электрод 2, то сигнальный заряд растечется по яме под электродами 1 и 2. Если на втором такте с электрода 1 снять напряжение, то заряд полностью перетечет в потенциальную яму под электродом 2. После соответствующей смены потенциалов на электродах 2 и 3 в течение третьего такта сигнальный заряд перетечет в потенциальную яму под электродом 3. Далее последовательность тактов повторяется во времени периодически. Совокупность электродов линейной матрицы из миниатюрных конденсаторов разбита на три группы. На каждую группу подаются трапециевидные импульсы напряжения от одного из трех генераторов, тактовые импульсы с которых сдвинуты по фазе на  $120^\circ$  друг относительно друга. Однонаправленность перетекания заряда в двухтактной системе достигается тем, что потенциал под затвором имеет несимметричное распределение. Поэтому носители заряда скапливаются в более глубокой части потенциальной ямы, и перенос заряда идет только под ближайший затвор. Неоднородное распределение потенциала в яме создается при помощи вариаций в толщине слоя диэлектрика или локального повышения концентрации легирующих добавок вблизи одного края затвора. Наибольшее распространение получила система с различной толщиной слоя диэлектрика под затвором и, в частности, ППЗ с двумя уровнями металлизации [1—3]. Используют также методы ионного легирования или структуру с «подрезанной» изоляцией [6]. Все двухтактные системы можно превратить в одноктактные, если на одну из шин тактовых импульсов подать постоянное смещение [7]. Частота тактовых генераторов составляет  $10^7 - 10^8$  Гц.

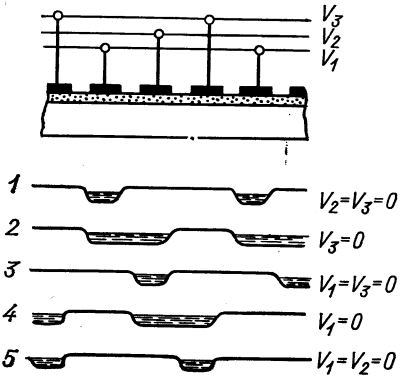


Рис. 2. Процесс направленного переноса заряда по цепочке МОП-конденсаторов при помощи трехтактной системы:  
Напряжение  $V_1$  подано на электрод 1;  $V_2$  — на 2;  $V_3$  — на 3

Прибор с переносом заряда состоит из трех основных элементов (рис. 3): 1) входной секции, которая содержит исток неосновных носителей полупроводника и затвор, переносящий заряд от истока к первому миниатюрному конденсатору; 2) регистра переноса заряда с управляющими электродами миниатюрных конденса-

торов и 3) выходной секции, содержащей затвор и выходной полупроводниковый переход, на котором генерируется импульс напряжения с амплитудой, пропорциональной числу перенесенных неосновных носителей заряда полупроводника [3].

Как передачу, так и хранение информации в ППЗ ведут при помощи неосновных носителей. В отличие от ППЗ хранение информации в традиционных полупроводниковых приборах ведется

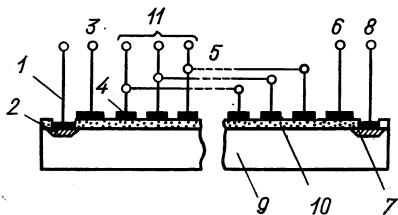


Рис. 3. Основные элементы прибора с переносом заряда:

1 — входной электрод; 2 — источник в виде диффузионной области; 3 — входной управляющий затвор; 4 — затворы ППЗ-печки; 5 — система подвода напряжений по трехтактной схеме; 6 — выходной затвор; 7 — выходной полупроводниковый переход; 8 — выходной электрод; 9 — полупроводник; 10 — слой диэлектрика; 11 — электроды, соединенные с тремя генераторами тактовых импульсов

при помощи неосновных носителей, а процесс передачи заряда — при помощи основных носителей. Поэтому всегда требуется преобразование информации из одной формы в другую. Это преобразование идет в диффузионной области полупроводника.

Кроме ППЗ с поверхностным каналом, описанного выше, существует ППЗ со скрытым каналом [1, 8, 9] (рис. 4). Под слоем диэлектрика создается слой полупроводника с типом проводимости,

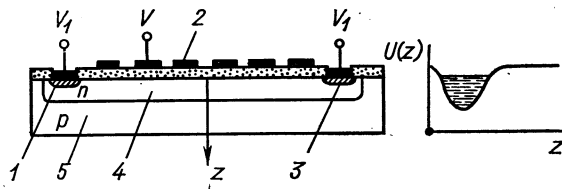


Рис. 4. ППЗ со скрытым каналом:

1 — входной диод; 2 — электроды; 3 — выходной  $n^+$ -диод; 4 — скрытый канал передачи зарядов в полупроводнике с  $n$ -проводимостью; 5 — подложка в виде полупроводника с  $p$ -проводимостью; форма потенциала вдоль координаты  $z$  показана справа

противоположным типу проводимости подложки. Возникает  $pn$ -переход, расположенный на небольшой глубине и включенный в обратном направлении. Распределение потенциала по мере удаления от диэлектрика имеет немонотонный характер, и на некотором расстоянии от диэлектрика под затворами образуются глубокие потенциальные ямы. Неосновные носители в такой конструкции ППЗ движутся вдоль скрытого канала, удаленного от поверхности раздела диэлектрик — полупроводник. Напряжение, прикладываемое к  $n$ -слою, выбирают таким, чтобы область пространственного заряда обратно-смещенного  $pn$ -перехода охва-

тывала весь  $n$ -слой и чтобы весь  $n$ -слой был обеднен. Неэффективность переноса заряда в скрытом канале  $\epsilon = 10^{-5}$ , однако предельная величина заряда, накапливаемого в ППЗ со скрытым каналом, значительно меньше, чем в ППЗ с поверхностным зарядом. ППЗ со скрытым каналом могут эффективно работать при частоте следования тактовых импульсов до  $10^8$  Гц.

В 1946 г. Шлезингер [10] указал впервые на то, что аналоговые сигналы можно хранить в виде зарядов разной величины в цепочке из миниатюрных конденсаторов и ступенчато перемещать цепочку в целом вдоль линии конденсаторов от одного к другому при помощи электрических ключей, управляемых тактовыми импульсами. Эта идея теперь реализована на техническом уровне в виде прибора с переносом заряда.

Самостоятельную группу ППЗ образуют полупроводниковые приборы. Каждый элемент этих приборов состоит из МОП-транзистора, управление работой которого ведут по двухтактной схеме (рис. 5). Их называют «пожарными» цепочками [1, 2]. Диффузионные области-островки, расположенные под каждым затвором, выполняют функцию стока для одного затвора и функцию истока — для соседнего. Заряды хранятся в обратно-смещенных  $p$ -областях. Под действием импульса электрического поля, приложенного к затвору, один из потенциальных барьеров ямы, например левый,

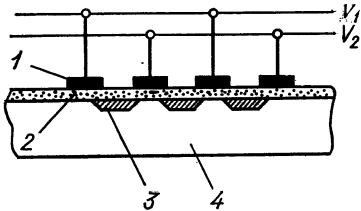


Рис. 5. «Пожарная» цепочка:  
1 — электрод; 2 — слой диэлектрика;  
3 — диффузионные области; 4 — полупроводник

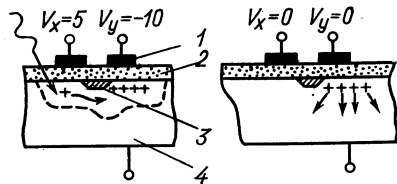


Рис. 6. Принцип действия прибора с инжекцией заряда:

1 — затворы; 2 — слой диэлектрика; 3 — островки  $p$ -проводимости; 4 — полупроводник с  $n$ -проводимостью

понижается, и заряд перетекает из одной потенциальной ямы в другую. Направление перетекания заряда возникает благодаря определенному расположению затворов относительно диффузионных островков.

Приборы с инжекцией заряда, также являющиеся разновидностью ППЗ, содержат островки  $p$ -проводимости между электродами, а подложка имеет  $n$ -проводимость (рис. 6). В процессе считывания напряжение с затвора снимают, и накопленный под этим затвором заряд инжектируется в подложку в виде неосновных носителей, создавая импульс тока во внешней цепи. Из-за большой емкостной

связи изменение напряжения в тактовом импульсе создает паразитные импульсы тока во внешней цепи. Однако если ток как функцию времени проинтегрировать в течение времени, немного превышающего длительность  $T$  управляющего импульса, то импульсы тока от переднего и заднего фронтов импульса напряжения погасят друг друга и сигнал на выходе будет по-прежнему пропорционален заряду. Существенным недостатком прибора с инъекцией заряда является его большая выходная емкость. Напомним, что в обычном ППЗ заряд поступает в единственный для всей цепочки регистра выходной диод очень малых размеров; вредное действие тактовых импульсов напряжения на выходной сигнал очень мало и его можно дополнительно уменьшить.

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИБОРОВ С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДОВ

**Предельная плотность зарядов** [1]. Требования получить высокую амплитуду сигнала на выходе ППЗ и сохранить малые размеры каждой ячейки являются взаимно исключаящими. Чем меньше размеры миниатюрного конденсатора металл — окисел — полупроводник, тем меньше амплитуда сигнала и тем хуже отношение сигнала к шуму. Универсальный параметр, ограничивающий выбор компромиссного решения, равен предельной поверхностной плотности сигнальных зарядов ППЗ.

Заряд  $q$ , который может быть накоплен в потенциальной яме, связан простым соотношением с электрической емкостью единичной площадки диэлектрического слоя  $C$  и амплитудой импульса электрического напряжения  $U$ :

$$q/\sigma = UC; \quad C = \epsilon_0 e/d, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — площадь активной части электрода;  $e$  — диэлектрическая постоянная диэлектрического слоя;  $d$  — его толщина. При напряжениях, близких к пробойному:

$$\bar{U}^{\text{макс}}/d \approx 10^6 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}; \quad q_{\text{макс}}/\sigma \approx 10^{13} \text{ эл} \cdot \text{см}^{-2}. \quad (2)$$

Обычно в каждой потенциальной яме накапливается не более  $3 \cdot 10^5$  электронов, которые при тактовой частоте  $f_c = 1$  МГц создают электрический ток около 1 мкА. Заряд, который можно накопить в каждой потенциальной яме, несколько меньше приведенного выше предельного значения. В ППЗ со скрытым каналом, расположенным на глубине около 5 мкм, эффективная электрическая емкость диэлектрической прослойки меньше, чем в ППЗ с поверхностным каналом.

**Эффективность передачи заряда** [1]. На каждом такте переноса заряда из одной потенциальной ямы в соседнюю часть заряда  $e$  теряется. Это вызвано в первую очередь ограниченной скоростью

перемещения носителя заряда в полупроводниковом слое и наличием ловушек заряда. Основная часть ловушек расположена вблизи поверхности раздела окисел — полупроводник, и поэтому ППЗ со скрытым каналом имеет более высокую эффективность передачи заряда, чем ППЗ с поверхностным каналом. Отношение количества заряда на выходе ППЗ  $q_{\text{вых}}$  к количеству заряда, поступившего на его вход  $q_{\text{вх}}$ , связано с неэффективностью передачи с соотношением

$$q_{\text{вых}}/q_{\text{вх}} = (1 - \epsilon)^N \approx 1 - N\epsilon, \tag{3}$$

где  $N$  — число ступеней ППЗ. Обычно  $\epsilon = 10^{-4}$ .

Если нулевому сигналу соответствует пустая потенциальная яма, то начальные импульсы цуга сигналов, вводимых в ППЗ, испытывают дополнительные искажения, которые эквивалентны неэффективной передаче заряда. Заряд первого пакета идет частично на заполнение ловушек, которые существуют в канале и перед поступлением сигнала являются незаполненными. Эти потери заряда тем выше, чем больше промежуток времени между двумя цугами сигналов. Чтобы уменьшить эти потери, смещают нулевое значение сигнала, и промежутки между двумя цугами сигналов заполняют постоянными по величине пакетами зарядов. Этот метод называется методом «непустого нуля».

Передача заряда вдоль цепочки миниатюрных конденсаторов ППЗ идет под действием термодиффузии, самоиндуцированного дрейфа зарядов и продольных компонент краевого электрического поля. При термодиффузии распределение плотности зарядов в пространстве вдоль матрицы ППЗ описывается косинусоидой с нулем на краю скачка потенциала и амплитудой, экспоненциально спадающей во времени с постоянной времени

$$\tau_{\text{терм}} = 4L^2/\pi^2D, \tag{4}$$

где  $D$  — коэффициент диффузии носителей заряда в полупроводниковом слое;  $L$  — ширина электрода, из-под которого заряд перетекает в потенциальную яму, расположенную под соседним электродом.

Если количество заряда в пакете достаточно велико, то носители испытывают электростатическое отталкивание, которое ослабляется по мере уменьшения объемной плотности зарядов. Эффективное время процесса самодиффузии носителей равно

$$t_0 = (\pi/2) L^2/\mu (V_1 - V_0), \tag{5}$$

где  $\mu$  — коэффициент подвижности носителей заряда;  $(V_1 - V_0)$  — начальное напряжение сигнала. Подвижность электронов в полупроводнике при плотности легированных добавок  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  равна  $\mu = 1,2 \cdot 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . Скорость перетекания заряда под действием



термодиффузии сравнивается для  $d = 100$  нм со скоростью самоиндуцированного дрейфа при плотности зарядов около  $10^{10}$  см $^{-2}$ .

Главным преимуществом ППЗ со скрытым каналом является то, что краевые электрические поля здесь значительно больше, чем в ППЗ с поверхностным каналом. Это позволяет получить высокую эффективность передачи заряда даже при очень больших тактовых частотах. Ускорение процесса переноса заряда в ППЗ со скрытым каналом происходит потому, что между областью, где распространяются сигнальные заряды, и поверхностью раздела между полупроводником и диэлектриком находится слой обедненного кремния. Неэффективность передачи для ППЗ со скрытым каналом обычно равна  $\epsilon = 5 \cdot 10^{-5}$  при тактовой частоте 10 МГц. Ожидают, что ППЗ со скрытым каналом сможет работать при тактовых частотах около  $10^9$  Гц. При низких тактовых частотах наступает динамическая утечка заряда. Чтобы ее ослабить, используют тетродную электрическую систему переноса заряда в скрытом канале с развязкой источника напряжения. Тот же результат получается, если вместо обычных транзисторов использовать инжекционные полевые транзисторы. Подобные системы обладают высоким быстродействием, стабильны во времени, имеют устойчивый порог, а также могут работать при управляющих напряжениях в 2 В.

При очень низких тактовых частотах уменьшение эффективности процесса передачи заряда вызвано термодиффузией носителей заряда в канал или через потенциальный барьер. Потенциал напряжения источника становится ниже потенциала канала передачи заряда, и процесс стекания заряда идет со скоростью, которая уменьшается во времени по логарифмическому закону. ППЗ со скрытым каналом подвержен действию ловушек в меньшей степени, чем ППЗ с поверхностным каналом. Неэффективность передачи заряда вдоль цепочки ППЗ приводит к тому, что ширина полосы сигнала  $B$ , которую можно передать без искажений, равна

$$B = (f_c/2) I_0(2N\epsilon) \exp(-2N\epsilon), \quad (6)$$

где  $I_0(x)$  — модифицированная функция Бесселя:

$$I_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \left( \frac{x^k}{2^k k!} \right)^2$$

**Темновой ток и шумы.** ППЗ обладают малыми шумами и это является одной из причин большого интереса к этим приборам исследователей многих областей науки и техники [1, 2, 11]. Именно благодаря этой физической характеристике ППЗ успешно используют в качестве фотоприемника в стримерной камере [12] и в телевизионных системах в условиях низкой освещенности [3, 13, 14, 68].

Шумы в ППЗ возникают в результате случайных флуктуаций числа носителей заряда в процессе его перетекания по цепочке миниатюрных МОП-конденсаторов, а также на стадиях инжекции и считывания сигналов. ППЗ в качестве приемника изображения обладает также фотонным шумом, который сопровождает процесс генерации фотоэлектронов. Наименьший флуктуационный шум дают ППЗ со скрытым каналом. При температуре  $-50^\circ\text{C}$  этот шум эквивалентен 10 электронам.

Шум на стадии инжекции зависит от электрической схемы введения заряда и формы управляющих импульсов, подаваемых на входной диод. Шумы, возникающие в системах считывания сигнала, аналогичны шумам, возникающим в полупроводниковых детекторах частиц. Шумы в усилителе сброса обладают взаимной корреляцией и их можно ослабить, если использовать логику коррелированного двойного отсчета. Наименьшие шумы дают распределенные усилители с плавающим затвором [15, 16]. Наконец, в ППЗ наблюдается геометрический шум, который возникает из-за разброса в значениях емкости истоков, задающих величину «непустого нуля» в каждом столбце матрицы ППЗ. Полный разброс, обусловленный шумами во входной и выходной цепях, а также в процессе перетекания заряда в ППЗ, составляет около 500 электронов при комнатной температуре [17].

Под действием тепловых колебаний решетки в объеме полупроводника непрерывно образуются электрон-дырочные пары. Шумовые заряды, возникшие на границе раздела полупроводник — диэлектрик, а также в области обеднения и в слое полупроводника, простирающемся от границы раздела на глубину, равную по порядку величины длине диффузии неосновных носителей, постепенно заполняют потенциальные ямы ППЗ. Эффективное время заполнения ямы

$$t_{\text{зап}} = C_{\text{эф}} \Delta V / i_d, \quad (7)$$

где  $C_{\text{эф}}$  — эффективная накапливающая емкость единицы площади, занятой потенциальной ямой;  $i_d$  — плотность темнового тока, а  $\Delta V$  — высота барьера между потенциальными ямами. Обычно  $t_{\text{зап}} \approx 1$  с. Неоднородность темнового тока определяет порог обнаружения. При комнатной температуре этот порог равен около 1000 электронов.

Уровни решетки, создающие термическую генерацию электрон-дырочных пар, сосредоточены вблизи центральной части запрещенной зоны полупроводника. Поэтому температурная зависимость темнового тока имеет вид

$$i_d = i_{d_0} \exp(-E_g/2kT), \quad (8)$$

где  $E_g$  — ширина запрещенной зоны полупроводника. Темновой ток уменьшается примерно в два раза при снижении температуры

на каждые  $10^\circ \text{C}$ . При  $t = -50^\circ \text{C}$  и 10%-ной неоднородности ячеек ППЗ порог обнаружения составляет 8 электронов. Флуктуации процесса термической генерации создают временной шум, дисперсия которого равна среднеквадратичному значению темного тока.

Спектральная плотность шумовых сигналов [18], возникающих на активном сопротивлении под действием теплового движения носителей заряда, имеет постоянное значение вплоть до частот  $f_{\text{макс}} = kT/\hbar$ , где  $\hbar$  — постоянная Планка. При комнатной температуре  $f_{\text{макс}} = 10^{13}$  Гц. Спектральная плотность теплового шума не зависит от значения тока, текущего через активное сопротивление, если значение последнего и температура не зависят от значения тока. Это условие выполняется, если средняя скорость дрейфа носителей заряда мала по сравнению со скоростью их теплового движения. Спектральная плотность флуктуационного шума имеет постоянное значение до частот около  $10^{10}$  Гц при ширине полупроводникового перехода в 1 мкм и скорости носителей  $10^7$  см/с.

В полупроводниковых активных элементах на низких частотах наблюдается шум, спектральная плотность которого изменяется обратно пропорционально частоте ( $1/f$ ). Одной из причин этого шума является процесс захвата носителей заряда глубоко лежащими ловушками [1].

**Помехи от тактовых импульсов.** Тактовые импульсы, управляющие перемещением зарядов в ППЗ, создают помехи в выходных цепях. Существует несколько методов ослабления помех, построенных при помощи дифференциального включения. Так, например, в ППЗ на «пожарных» цепочках затворы усилителя подсоединяют к двум противоположным фазам генератора тактовых импульсов, чередуя через один затворы цепочки [19]. Тактовые импульсы гасят друг друга и на выходе усилителя формируется сигнал, пропорциональный накопленному заряду. Выбросы от фронтов тактовых импульсов гасят в фильтре высоких частот.

**Радиация.** ППЗ подвержен действию сильной радиации. Было установлено [3], что ППЗ с поверхностным каналом выдерживает облучение не более  $10^3$  рад, а ППЗ со скрытым каналом — не более  $10^4$  рад  $\gamma$ -излучения от кобальта-60.

### 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ППЗ [1, 2, 20—25]

Амплитуда управляющих тактовых импульсов напряжения в ППЗ-системах равна 10—20 В и ограничивает сверху амплитуду сигнала в ППЗ. При линейности в 1% максимальная амплитуда сигнала равна 1—5 В.

Максимальная полоса частот входного сигнала равна половине частоты следования тактовых импульсов и равна около 20 МГц.

Минимальная частота следования тактовых импульсов равна 100 Гц.

Потребляемая мощность не меньше 4 мкВт/бит.

Максимальное время задержки сигнала равно 1—10 с.

Максимальное число элементов в ППЗ цепочке равно около 2000.

Фоточувствительность ППЗ составляет около 500 мкА/лм и близка к характеристикам других типов кремниевых фотоприемников.

Минимальная дисперсия шума равна 10 электронам в ячейке.

Минимальная неэффективность передачи заряда равна  $5 \cdot 10^{-5}$ .

Чувствительность усилителя с плавающим затвором равна 20—100 мкВ на 1 электрон заряда.

#### 4. ПРИМЕНЕНИЕ ППЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

ППЗ-цепочка представляет собой дискретный аналоговый регистр сдвига, имеющий широкие области применения. Линии задержки электрических импульсов, построенные на ППЗ, обладают рядом особенностей [1, 2, 21, 26, 27]. Например, время задержки в ППЗ изменяется с изменением частоты следования тактовых импульсов. Произведение ширины полосы частот  $B$  на время задержки  $T_0$  связано с числом элементов в линии задержки  $N$  соотношением

$$BT_0 = N/2. \quad (9)$$

В свою очередь  $N$  ограничено сверху неэффективностью передачи  $\epsilon$ . Для  $\epsilon = 2 \cdot 10^{-4}$   $N \leq 500$ .

Чтобы увеличить  $BT_0$  сигнала, передаваемого по линии задержки на ППЗ, используют несколько параллельно действующих цепочек. На рис. 7 дана схематехническая реализация такой системы с последовательно-параллельно-последовательным расположением  $M$  цепочек, каждая из которых содержит  $N$  ячеек. Число тактов передач для каждого пакета зарядов равно  $M + N$ , а полное число элементов равно  $MN$ . Обычно  $MN \geq 10^3$ . Задержка видеосигнала на 16 мкс осуществляется системой с  $M = 106$  и  $N = 128$ .

Вертикальную аналоговую задержку можно использовать в качестве указателя движущихся объектов, наблюдаемых при помощи радиолокационной системы [31]. Для этого отраженный сигнал от первого импульса вычитается из отраженного сигнала от следующего импульса. Сигналы неподвижных объектов подавляются и отображаются только движущиеся объекты.

Линии задержки на ППЗ используют в ультразвуковой акустической изображающей системе [28], работающей по принципу

электронной фокусировки. Совокупность линий задержек с квадратично-изменяющимся от канала к каналу временем задержки соответствует определенной кривизне сферического акустического волнового фронта. Если изменить тактовую частоту во всех линиях задержки, то точка фокуса переместится в пространстве. Если акустическая волна идет под углом к линии массива приемников акустического поля, то изменение тактовой частоты в системе с линейным изменением времени задержки приведет к сканированию по углу  $\theta$  к оси  $z$ . Если использовать две системы с различными тактовыми частотами, то сканирование по углу будет

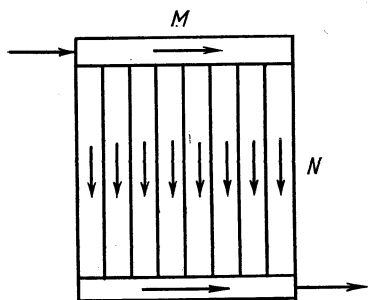
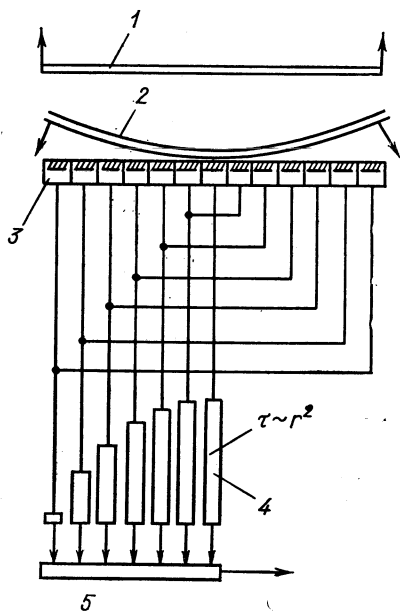


Рис. 7. Схематехническая организация ППЗ-регистров с последовательно-параллельно-последовательным расположением  $M$  цепочек из  $N$  ячеек

Рис. 8. Электронная фокусирующая линза акустического поля:

1 — фронт волны озвучивания; 2 — фронт рассеянной волны от точечного объекта; 3 — массив передатчиков-приемников акустического поля; 4 — линии задержки на основе ППЗ-регистров; 5 — считывающий регистр



вестись как влево,  $f_1 < f_2$ , так и вправо,  $f_1 > f_2$ , от оси  $z$ . Совокупность трех линий задержек на ППЗ можно разместить на одном кристалле из кремния, который выполняет функцию электронной фокусирующей линзы акустического поля (рис. 8).

Мультиплексные системы с разделением каналов во времени удобно реализовать при помощи ППЗ. Входные отсчеты вводятся в ППЗ параллельно, а считываются последовательно. Интенсивность перекрестных помех между различными каналами определяется неэффективностью передачи  $\epsilon$ . Главным достоинством такой системы является ее экономичность.

Существенной характеристикой линий задержек на ППЗ является то, что эффективность задержки не зависит от спектра сигнала.

ла и их можно использовать в аналоговых рекурсивных и трансверсальных фильтрах. Схема рекурсивного фильтра [1], в котором сигнал сдвигается как вперед, так и назад во времени, дана на рис. 9. Передаточная характеристика такого фильтра определяется  $z$ -образом:

$$H(z^{-1}) = \frac{\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^N b_k z^{-k}}. \quad (10)$$

При этом корни полинома в числителе задают нули передаточной функции, а корни полинома в знаменателе — его полюса.

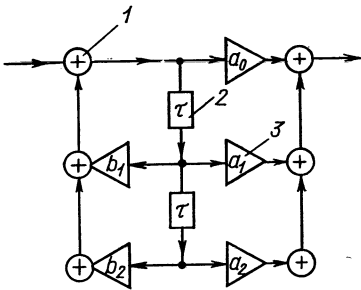


Рис. 9. Схема простейшего рекурсивного цифрового фильтра:  
1 — суммирующие элементы; 2 — элементы линии задержки; 3 — элементы умножения

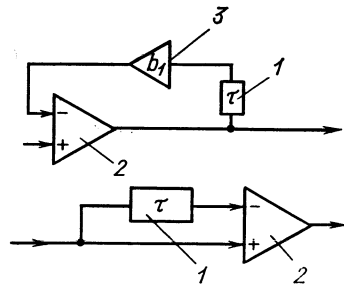


Рис. 10. Схема простейших рекурсивного и трансверсального цифровых фильтров:  
1 — элемент линии задержки; 2 — суммирующий элемент; 3 — элемент умножения

В трансверсальном фильтре  $b_k = 0$  для всех  $k$ . На рис. 10 даны простейшие примеры рекурсивного и трансверсального фильтров первого порядка. Длительность импульсного отклика трансверсальных фильтров на ППЗ составляет доли секунды, а полоса пропускания равна 10 МГц и более. Частотную характеристику фильтра можно изменять в широких пределах.

ППЗ-фильтры обладают рядом существенных преимуществ перед цифровыми системами фильтрации на ЭВМ. Это — малая относительная стоимость ( $\approx 1:100$ ), возможность изготовления компактных согласованных фильтров, полосовых фильтров, простота проектирования любых видов ППЗ-фильтров.

Трансверсальные фильтры [29, 30] на ППЗ успешно используются для реализации дискретного преобразования Фурье, преобразования Гильберта при однополосной модуляции и т. п.

Трансверсальный фильтр с программируемыми весовыми коэффициентами можно объединить с микропроцессором. Импульсный отклик трансверсального фильтра, определяемый совокупностью

весовых коэффициентов  $a_k$ ,  $1 \leq k \leq N$ , равен

$$g(t) = \sum_{m=1}^N a_m \delta(t - m\tau). \quad (11)$$

где  $\tau$  — время задержки за один такт.

Чтобы реализовать требуемые значения весовых коэффициентов в ППЗ-фильтрах, электроды накопительной емкости разрезают на две части так, что длины каждой из них находятся в отношении  $(1 + a_m)/(1 - a_m)$ . Сигналы от каждой части включаются в противофазе. Особенно просто реализуются бинарные коды [1]. Существуют также другие методы введения весовых коэффициентов в ППЗ-фильтрах, например при помощи отводов от диффузионных областей. В частности, так устроены трансверсальные фильтры, весовые коэффициенты в которых изменяются программно под действием управляющих напряжений. Замечательно то, что картина расположения разрезов электродов трансверсального фильтра на ППЗ полностью совпадает с видом дискретной функции  $g(t)$  импульсного отклика трансверсального фильтра. Если на вход трансверсального фильтра подать дискретную последовательность  $f(t)$ , то на выходе ее возникнет сигнал

$$s(t) = \sum_{t'=1}^N f(t') g(t + t') = f(t) * g^i(t), \quad (12)$$

который равен дискретной функции корреляции сигнала  $f(t)$  и импульсного отклика трансверсального фильтра  $g(t)$ . Корреляторы, построенные на ППЗ, характеризуются следующими параметрами: точность взвешивания 1:200, время хранения при комнатной температуре 1 с, тактовая частота 3 МГц. С погрешностью 1% одновременно обрабатывают  $4 \cdot 10^4$  дискретных отсчетов сигналов. Было показано, что ППЗ-корреляторы могут работать на битовом уровне [21]. Для этого используют несколько двоичных корреляторов, каждый из которых ведет преобразования в соответствующем разряде с весовыми коэффициентами  $\pm 1$ . Вывод результатов от разных разрядов масштабируют при помощи различных резисторных нагрузок или путем сочетания ППЗ, имеющих различные физические площади. Требуемую точность вычисления корреляции дает система, состоящая из четырех двоичных корреляторов.

Подобная система двоичных корреляторов эквивалентна быстродействующему периферийному устройству ЭВМ с операциями умножения и сложения. В сочетании с микропроцессором такая система сможет успешно конкурировать с универсальной вычислительной машиной. Система из 128 двоичных корреляторов способна производить более тысячи восьмиразрядных операций умножения и сложения за время 1 мкс. Было отмечено, что подобная

система, оснащенная программным управлением, сможет выполнять операцию обращения матриц и решать другие подобные задачи.

Согласованные фильтры, предназначенные для выделения сигнала известной формы на фоне шумов, широко распространены в технике связи. Импульсная характеристика согласованного фильтра равна принимаемому сигналу, дискретные компоненты которого расположены в обратной последовательности. Передача сигналов большой протяженности и прием их согласованным фильтром позволяет существенно повысить отношение сигнала к шуму. Согласованные фильтры, построенные при помощи ППЗ, обладают характеристиками, близкими к идеальным [1, 17]. Технические характеристики согласованных фильтров и линий задержки на ППЗ совпадают.

Трансверсальные фильтры на ППЗ могут выполнять функцию полосового фильтра, который обладает минимальной чувствительностью к неэффективности передачи заряда в ППЗ. Частота полосы пропускания полосового фильтра на ППЗ изменяется с изменением частоты тактовых импульсов. Имеется возможность реализовать фильтр с линейной фазо-частотной характеристикой. Низкий уровень шумов ППЗ позволяет вести фильтрацию слабых сигналов.

При помощи трансверсального фильтра на ППЗ реализуют преобразование Гильберта, используемое в системах однополосной модуляции несущей. Импульсная характеристика гильберт-фильтра определяется весовыми коэффициентами

$$a_m = [m - (N + 1)/2]^{-1}, \quad 1 \leq m \leq N, \quad (13)$$

$N$  — нечетное, а сигнал на выходе фильтра, равный

$$s(t) = \sum_{k=1}^N \frac{f(t - k + 1)}{(k - (N + 1)/2)}, \quad (14)$$

испытывает задержку на  $N\tau/2$ . Вследствие дискретной природы преобразований, выполняемых при помощи ППЗ, мнимая часть спектральной характеристики гильберт-фильтра имеет расхождение с идеальной характеристикой в области низких частот [1].

С появлением ППЗ впервые стало возможным изготовить весь тракт обработки аналоговых сигналов при помощи интегральной полупроводниковой технологии.

### 5. ППЗ В КАЧЕСТВЕ ФОТОПРИЕМНИКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Приборы с переносом заряда обладают высокой квантовой эффективностью и самосканирующими свойствами считывания дискретной аналоговой информации. Поэтому их применяют в ка-



честве эффективных и быстродействующих преобразователей изображения в дискретный видеосигнал. Процесс идет через две фазы: накопления и считывания. Во время фазы накопления тактовые импульсы на ППЗ не подаются. Под действием фотонов в ППЗ возникают электронно-дырочные пары. В каждую потенциальную яму стекаются возникшие вблизи неосновные носители заряда. Во время фазы считывания поток света на ППЗ перекрывают, подают тактовые импульсы и последовательно перемещают пакеты фотозарядов вдоль ППЗ-цепочки [1, 2, 20]. Совокупность импульсов заряда, проквантованных по амплитуде, представляет собой видеосигнал в данной строке изображения.

Процесс преобразования изображения в видеосигнал при помощи ППЗ-цепочки выгодно отличается от известных прототипов: электронно-лучевых трубок, видиконов или матриц из фотодиодов. А именно, монокристалл кремния имеет высокий квантовый выход в широком спектральном диапазоне, процесс сканирования изображения ведется под действием электрических импульсов низкого напряжения, матрица ППЗ имеет высокое пространственное разрешение, потребляет малую мощность и удобна в эксплуатации благодаря своей компактности. Существенным достоинством ППЗ является также то, что число электрических выводов в нем невелико ( $\leq 50$ ) при любом числе элементов изображения. Наиболее эффективной строчной системой является билинейный приемник изображения, который состоит из центральной светочувствительной ППЗ-цепочки и двух сдвиговых регистров на ППЗ, расположенных по обе стороны от центральной цепочки и защищенных от действия светового потока (рис. 11). Четные элементы цепочки связаны с левым регистром, а нечетные — с правым [1]. На передачу фотозарядов из центральной цепочки в сдвиговые регистры затрачивается время, равное полному тактовому периоду. Затем центральная цепочка переходит опять в режим накопления фотозарядов, образованных светом следующей строки изображения. В билинейной системе обычно используют двухтакттовую логику считывания. Были построены билинейные системы с числом элементов в цепочке, равным 500, пространственным разрешением 30 мкм и динамическим диапазоном  $3 \cdot 10^3:1$ .

Аналоговая структура сигналов ППЗ фотоприемника позволяет вести при помощи ППЗ наиболее типичные виды обработки видеосигналов: дискретное преобразование Фурье, мультиплексное считывание, обнаружение движущихся объектов и вычитание постоянной картины темнового тока [21, 31, 37].

Матричная система преобразования изображения в дискретный видеосигнал может быть построена различными методами. Простейшая ППЗ-матрица состоит из набора ППЗ-строк (рис. 12). Видеосигналы из каждой горизонтальной строки считывают последовательно в вертикальный регистр, а из него в выходной диод. По та-

кой архитектуре была изготовлена ППЗ-матрица размером  $32 \times 44$ . В вдвоенной ППЗ-матрице накопление фотозарядов ведется в верхней матрице, набранной из вертикально расположенных регистров. Нижняя матрица, имеющая общий горизонтальный регистр, предназначена для хранения и считывания фотозарядов (рис. 13). Сначала фотозаряды быстро сдвигают из кадровой матрицы в нижнюю матрицу, а затем строка за строкой последовательно считываются в горизонтальном направлении [20].

Возможно также чересстрочное сканирование, соответствующее стандартам современного телевидения. С этой целью

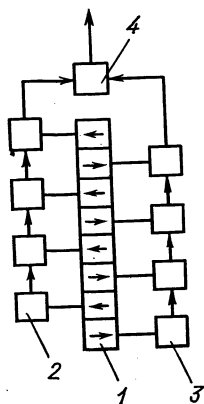


Рис. 11. Билинейный строчный приемник изображений на основе ППЗ: 1 — светочувствительная цепочка; 2 — левый регистр; 3 — правый регистр; 4 — выходной элемент

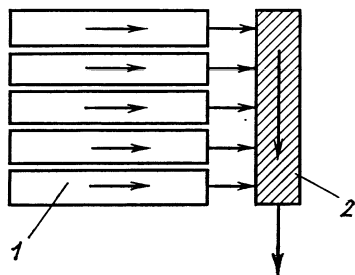


Рис. 12. Простейшая матрица фотоприемника изображений на основе ППЗ:

1 — строчный приемник изображений; 2 — вертикальный регистр, защищенный от света

число зарядовых пакетов в последовательных полукадрах удваивают в вертикальном направлении без изменения общего числа элементов ППЗ-матрицы. Таким образом, каждая вертикальная ячейка используется для получения видеосигналов двух линий на экране, в отличие от традиционной системы, где для каждой линии имеется отдельный канал. Построены системы с  $220 \times 256$  элементами чересстрочного изображения с размером элемента изображения  $30 \times 30$  мкм<sup>2</sup>. Потребляемая мощность равна 1,5 Вт. Карманные телевизионные камеры с числом элементов  $100 \times 100$  и чувствительностью 1 лм выпускаются в продажу с 1973 г.

Целесообразность использования ППЗ-матриц в телевидении вызвана тем, что в ППЗ отсутствует проблема точного совмещения разветок в цветных телекамерах на трех трубках.

В трехтактной системе считывания можно сформировать шесть разделенных изображений, вкладывающихся друг в друга. Однако на изображениях, получаемых таким образом, наблюдается явление, эквивалентное стробоскопическому эффекту.

Принципиально иную логику считывания имеют приборы с инжекцией заряда. Здесь используют двухкоординатную адресацию (рис. 14). Инжекция заряда происходит в тех ячейках, в которых напряжения на горизонтальных и вертикальных шинах совпадают и равны нулю. Выходная емкость прибора с инжекцией заряда равна емкости одной строки и одного столбца, если во время считывания все остальные шины находятся под плавающим потенциалом. Шумы считывания в приборе с инжекцией заряда велики, и поэтому такой прибор можно использовать только при высоких уровнях освещенности [1, 13, 20, 32]. Существенным преимуществом прибора с инжекцией заряда и двумерной адресной системы считывания является то, что здесь возможна псевдослучайная, а также мультиплексная системы считывания.

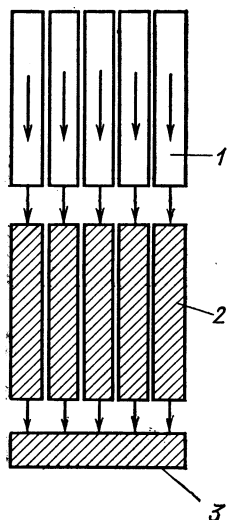


Рис. 13. Двойная матрица фотоприемника изображения на основе ППЗ:

1 — верхняя матрица, в которой ведется накопление фотозарядов; 2 — нижняя матрица, предназначенная для хранения и считывания фотозарядов; 3 — считывающий регистр

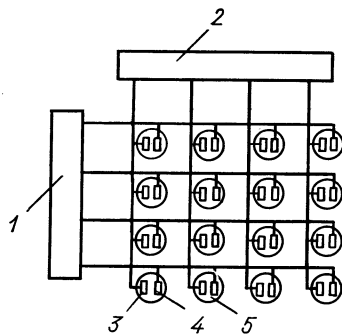


Рис. 14. Схема системы считывания изображения в приборе с инжекцией заряда:

1 — генератор считывающих импульсов напряжения на правых электродах ячеек; 2 — генератор считывающих импульсов напряжения на левых электродах ячеек; 3 — левый электрод ячейки; 4 — правый электрод ячейки; 5 — контакты элементарной ячейки

вания. Были построены приборы с инжекцией заряда в виде матрицы с числом элементов изображения  $248 \times 244$ , охлаждаемой до температуры  $-70^\circ \text{C}$ . Приборы с инжекцией заряда обладают высокой надежностью, просты в изготовлении. Однако динамический диапазон равен 500:1, и размеры прибора с инжекцией заряда относительно велики.

Эффективная область спектральной чувствительности кремниевых ППЗ-фотоприемников ограничена сверху длиной волны 1 мкм, а снизу — около 0,4 мкм. Квантовый выход монокристалла кремния близок к 1, а чувствительность на освещенность около

500 мкА/лм. Однако реальный квантовый выход оказывается ниже этой величины, если не принять специальных мер для его повышения. Один из таких приемов заключается в том, чтобы направить поток света на заднюю сторону ППЗ-матрицы и устранить поглощения и отражения света от лицевой стороны. При подсветке с задней стороны квантовый выход равен 0,5 при длинах волн 0,5—0,9 мкм и 0,9 при длине волны 0,7 мкм. Спад в сторону коротких длин волн обусловлен процессом рекомбинации, происходящим как в слое полупроводника, так и на задней поверхности раздела, а спад в сторону длинных волн вызван неполным поглощением инфракрасного излучения в тонком слое полупроводника. Были построены ППЗ-системы размером  $160 \times 100$  элементов изображений при освещении с задней стороны.

Однако систему чересстрочного считывания нельзя совместить с освещением задней стороны полупроводникового слоя, так как здесь необходимы специальные экраны, которые бы препятствовали процессу диффузии носителей непосредственно в регистр накопления.

Тонкослойные ППЗ-приемники были использованы на пучках электронов, регистрация которых идет с коэффициентом размножения, достигающим при достаточных энергиях электронов значений несколько сотен. Такое же устройство можно использовать для регистрации протонов или нейтронов. Однако под действием процесса нарушения решетки кремния и уменьшения времени жизни неосновных носителей характеристики такого устройства ухудшаются во времени.

ППЗ-фотоприемники можно использовать в качестве систем формирования термоизображений [3]. Но наиболее перспективной является гибридная система, приемная часть которой состоит из фотопроводящей пленки и ППЗ-матрицы. Каждый элемент фотопроводника, выполняющий функцию вентиля полевого транзистора, управляет процессом перетекания заряда в ППЗ. Его потенциал и вместе с ним и количество зарядов, поступающих в потенциальную яму ППЗ, пропорциональны интенсивности инфракрасного излучения. В качестве мишеней для формирования термоизображений используют также пьезоэлектрические кристаллы, спонтанная электрическая поляризация которых вдоль одной из кристаллических осей изменяется с температурой. ППЗ-матрицу охлаждают до температуры 77 К.

Матрица ППЗ-фотоприемников может быть использована при фотографировании равномерно движущихся объектов [31]. Для этого столбцы матрицы ориентируют по вектору скорости движения объекта, а тактовую частоту считывания согласуют с величиной скорости объекта. Такой совмещенный режим временной задержки и накопления сигнала позволяет увеличить отношение сигнала к шуму.

Разрешающая способность матричных ППЗ-фотоприемников приблизительно в два раза хуже, чем у высококачественных телевизионных систем, но постоянно улучшается. Частотно-контрастная характеристика ППЗ-фотоприемника зависит от архитектуры считывания. В системах с переносом кадра частотно-контрастная характеристика изменяется с пространственной частотой существенно круче, чем в системе с переносом строк. Обычно перенос кадра происходит со скоростью 30 кадров/с при времени накопления фотоэлектродов, равном  $1/60$  с. Время сдвигов зарядов в матрицу считывания равно  $1/600$  с.

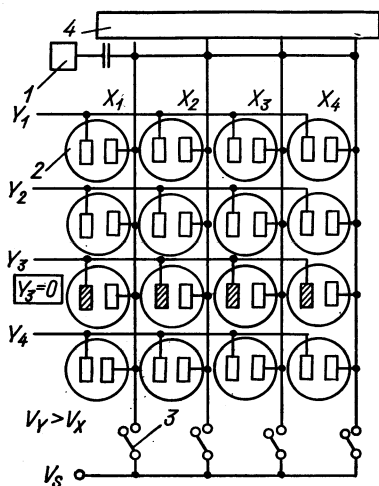


Рис. 15. Схема параллельной инжекции для массива  $4 \times 4$  элементарных ячеек:

1 — генератор импульса напряжения;  
2 — контуры элементарной ячейки;  
3 — электронные ключи; 4 — считывающий блок. Показан момент, когда на третьей строке все левые электроды находятся при нулевом потенциале, а все вертикальные линии находятся под плавающим потенциалом

мым напряжением смещения и цепью низкого импеданса. Такие стоки располагают между соседними каналами передачи.

Технология изготовления ППЗ-фотоприемников и результаты их экспериментального испытания приведены в [23, 33].

На рис. 15 приведена схема параллельной инжекции для массива  $4 \times 4$ . Напряжения, приложенные к электродам строки, превышают напряжения на электродах столбца, поэтому сигнальный заряд, накопленный в неопрашиваемых ячейках, не оказывает воздействие на столбцевые ячейки. Перед началом процесса опрашивания линии напряжения прикладывают ко всем строкам, а напряжения на столбцах сбрасывают до опорного напряжения  $V_S$  при помощи четырех ключей и после этого оставляют их пла-

вающим потенциалом.

При низких уровнях освещенности отношение сигнала к шуму в ППЗ-фотоприемниках хуже, чем в электронно-лучевых трубках. Разрешение и отношение сигнала к шуму взаимно связаны между собой при низких уровнях освещенности.

Существенным недостатком ППЗ-фотоприемника является то, что при высоких уровнях интенсивности света возникает переполнение потенциальной ямы и избыточный заряд попадает в соседние потенциальные ямы. Это приводит к размытию изображения и к появлению ярких полос вдоль ППЗ-регистров. Чтобы подавить растекание избыточного заряда и ослабить размытие изображения, вводят стоки-дренажи в виде обратно смещенных диодов с определен-

вающими. В строке, подлежащей опросу, напряжение убирают, в результате чего сигнальные заряды во всех ячейках данной строки перетекают под электроды столбцов. При этом напряжение в каждой плавающей линии изменяется на величину, равную отношению сигнального заряда к емкости столбца. После этого горизонтально сканирующий регистр считывает напряжение на всех ячейках столбца, а полученный видеосигнал поступает на предусилитель. При этом входное напряжение на предусилителе сбрасывают до опорного напряжения раньше, чем начнется опрос горизонтального регистра.

В конце каждого опроса линии весь заряд данной строки инжектируют в подложку путем прикладывания нулевого потенциала ко всему столбцу через два ключа. Существует и другая, чрезвычайно интересная возможность. А именно, операцию инъекции не производят совсем, а сигнальный заряд переносят обратно под электроды строки. Такая схема считывания называется неразрушающей [13].

Схема параллельной инъекции допускает высокие скорости считывания. Был изготовлен инжекционный фотоприемник размером  $244 \times 248$  вместе с предусилителем на кристалле и был испытан как в инжекционной, так и в неразрушающей модах считывания в сочетании с телевизионной системой на частоте 5 МГц и скорости смены кадров 60 полей/с [13].

Чтобы обеспечить скрытый сбор инжектируемых зарядов, приборы с инъекцией заряда в качестве фотоприемной матрицы изготавливают на эпитаксиальных слоях. Если толщина его сравнима с шагом матрицы, то основная часть инжектируемого заряда собирается обратно смещенным эпитаксиальным переходом. В этом случае эффект перекрестных помех процесса инъекции оказывается минимальным, время собирания сигнального заряда уменьшается до  $10^{-8}$  с, а благодаря электрической изоляции ячеек друг от друга эффект размытия изображения существенно уменьшается.

В режиме неразрушающего считывания процесс инъекции заряда не происходит вообще и размытия изображения не возникает. Испытания режима неразрушающего считывания показали, что при температуре  $-73^\circ\text{C}$  скрытое изображение сохранялось в течение трех часов после  $3 \cdot 10^5$  операций повторного считывания. Это эквивалентно тому, что за один такт в каждой ячейке матрицы терялся всего один элементарный носитель. Наконец, у прибора с инъекцией заряда нет эффекта линейной невзаимозаменяемости, типичной для фотографических и других материалов. Было показано, что процесс накопления большого числа мелких пакетов фотозарядов характеризуется строгой линейной зависимостью от  $1/30$  с до 3 ч [13].

Применение прозрачных электродов из окисла металла для приборов с инъекцией заряда при освещении с передней стороны

позволяет получить равномерную спектральную характеристику этих приборов ( $\pm 10\%$ ) в видимом свете.

Достоинство прозрачных электродов из окисла металла (окси-индия и окиси олова) состоит в том, что при помощи планарной технологии удается создать ячейку прибора с инжекцией заряда, в которой пересекаются системы горизонтальных и вертикальных электродов, а свет падает с передней стороны. Был изготовлен компактный прибор с переносом заряда в виде  $32 \times 32$  матрицы из ячеек размером  $30 \times 40$  мкм<sup>2</sup> [34].

Новая разновидность прибора с инжекцией заряда содержит три вывода [35]. Считывающим элементом в нем является скрытый

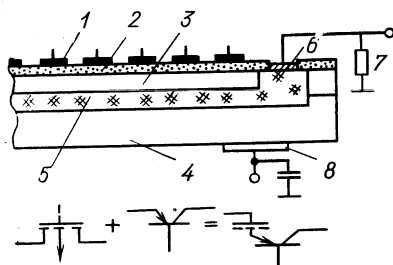


Рис. 16. ППЗ с тремя электродами:

1 — управляющий затвор; 2 — слой диэлектрика; 3 — эпитаксиальный  $n^-$ -слой; 4 —  $n^+$ -подложка; 5 — скрытый коллекторный канал с  $p$ -проводимостью; 6 — выходной электрод скрытого канала; 7 — резистор; 8 — коллектор

канал в виде полоски  $p$ -типа на подложке  $n$ -типа. Полоска имеет выход на поверхность на одном конце. Канал является коллектором инжектируемых неосновных носителей, накопленных под затвором. В такой системе полезный сигнал и сигнал шума с фиксированным пространственным распределением идут по различным путям. Считывание в системе с тремя выводами ведут так, что не возникает переключательных переходных процессов. Это приводит к уменьшению отношения сигнала к шуму по сравнению с традиционной конструкцией прибора с инжекцией заряда. Двумерная адресация в трехтерминальной системе существенно упрощена. Схема конструкции с тремя электродами приведена на рис. 16. Каждая ячейка представляет собой затвор из поликристаллического кремния на слое окисел — диэлектрик, под которым лежит эпитаксиальный  $n^-$ -слой, и далее скрытый коллекторный канал с выходным электродом на поверхность на одном конце.

Еще ниже расположена  $n^+$ -подложка. Назначение скрытой коллекторной полоски  $p$ -типа состоит в том, чтобы собирать инжектируемые неосновные носители заряда, диффундирующие через эпитаксиальный слой. Третьим электродом является подложка, осуществляющая доступ к эпитаксиальному  $n^-$ -слою при помощи объемного  $n^+$ -полупроводника, который охватывает со всех сторон скрытую полоску  $p$ -типа.

Собирающий электрод заземлен через выходной резистор  $R_L$ . К подложке приложено положительное напряжение смещения  $V_{SS}$ . К затворам приложено отрицательное напряжение  $V_G$ , которое периодически снижают до нуля на короткое время. В это время заряд с емкости течет через вентиляющую емкость кремния, минуя полосу  $p$ -типа, к заземленной  $n^+$ -подложке. Одновременно инжектируемые неосновные носители диффундируют от плоскости раздела кремний — окисел через эпитаксиальный  $n^-$ -слой, где часть из них рекомбинирует с основными носителями, а часть собирается на полоске  $p$ -типа. Аналогичные процессы происходят в биполярном  $p - n - p$ -транзисторе, в котором функцию базы выполняет эпитаксиальный  $n^-$ -слой, а функцию коллектора — скрытая подложка. Вместо диффузионного эмиттера имеется зависящий от времени полевой инжекционный переход. Электрическая схема трехэлектродного прибора с инжекцией заряда представляет собой последовательное соединение биполярного транзистора и МОП-конденсатора  $p$ -типа [35].

В период считывания управляющий потенциал изменяют с высокого отрицательного напряжения до более низкого на величину  $\Delta V_G$ . Естественной характеристикой процесса инжекции неосновных носителей является время переноса  $t_1$  под действием напряжения  $\Delta V_G$ , и его можно сделать меньше постоянной времени  $R_L C_C$ , где  $C_C$  равна емкости коллекторного перехода и паразитных выходных емкостей. Скачок напряжения, создаваемый пакетом зарядов, спустя время  $t_1$  составит

$$\Delta U = \Delta V_G C_{\text{окис}} / C_C. \quad (15)$$

После окончания процесса инжекции напряжение спадает с постоянной времени  $R_L C_C$ . Обычно  $t_1 \approx 30$  нс для эпитаксиального слоя, а  $R_L C_C = 0,3$  мкс. Прямой электрической связи между затвором и коллекторным электродом не существует.

Отношение сигнала к шуму в такой системе обратно пропорционально той части емкости коллектора, которая подвержена действию падения напряжения в тонком эпитаксиальном слое. Для его уменьшения в коллектор добавляют немного легирующих примесей, что в свою очередь приводит к соответствующему увеличению последовательно включенного активного сопротивления. Поэтому выходной сигнал накапливается на емкости коллектора и считывается только после того, как потенциал на затворе будет сброшен. Тогда остаточные шумовые сигналы переключения компенсируют друг друга и после этого напряжение на емкости  $C_C$  оказывается не подверженным шумам вообще. Выбор толщины эпитаксиального слоя определяется из условия, что чем меньше этот слой, тем быстрее идет диффузия и тем меньше потери зарядов на рекомбинации при считывании. Однако с уменьшением толщины слоя уменьшается фоточувствительность. Наконец, чем меньше



толщина эпитаксиального слоя, тем меньше перекрестные помехи. При большой толщине слоя велик ток фоточетки скрытых коллекторов. Но этот ток невелик и является постоянным в отличие от сигнала, имеющего импульсную структуру.

На рис. 17 дана электрическая схема считывания. Каждый элемент матрицы адресуется непосредственно выбором строки кремниевого затвора и путем очувствления соответствующего столбца скрытого коллектора [35].

Экспериментальный образец трехэлектродного прибора с инжекцией заряда содержит 24 строки и 6 столбцов с шагом по вертикали 100 мкм. Перекрестные помехи или размытие изображения по вертикали не наблюдались. В горизонтальном направлении был замечен аномальный эффект, вызванный глубоким проникновением тепловой компоненты источника света. Процесс считывания в трехэлектродной системе, так же как и в матрице фотодиодов, можно вести на стадии накопления фотозарядов, и здесь не требуется промежуточной памяти.

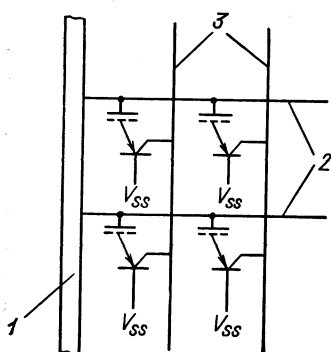


Рис. 17. Схема системы считывания ППЗ с тремя электродами:

1 — генератор импульсов напряжения; 2 — горизонтальные шины; 3 — вертикальные шины

Недостатками такой системы являются: 1) понижение фоточувствительности с увеличением емкости коллектора и трудности использования больших матриц; 2) так же как и в традиционных конструкциях приборов с переносом заряда большие значения выходной емкости коллектора увеличивают тепловой шум и не позволяют работать при низких уровнях освещенности; 3) технология изготовления таких приборов более сложная, чем матриц фотодиодов.

Достоинство трехэлектродной системы в том, что она позволяет реализовать скорость смены кадров вплоть до  $2 \cdot 10^4$  кадров/с по сравнению с телевизионным стандартом 30 кадров/с.

Еще в 1973 г. было отмечено [20], что ППЗ-фотоприемник найдет широкое применение в физике элементарных частиц при фотографировании в условиях низкой освещенности и в условиях, где требуется высокая геометрическая точность воспроизведения изображения. Этот вопрос подробно рассматривается в разд. 8 и 9 данного обзора.

## 6. ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ППЗ

Одномерный регистр сдвига на ППЗ обладает функциональными свойствами запоминающего устройства, способного хранить двухуровневые и многоуровневые сигналы. Из-за темнового тока запоминающие устройства на ППЗ могут работать только в динамическом режиме. Поэтому, как правило, приходится вводить систему регенерации сигнала, а это в свою очередь приводит к искажениям амплитуды сигнала.

Теоретический предел объема памяти ППЗ определяется вероятностью ошибки из-за неэффективности переноса зарядов вдоль регистра сдвига [1]. Если ввести параметр  $m$ , который связан с заданной вероятностью ошибки  $P$  соотношением [1]

$$P = (0,6/m) \exp(-m^2/2), \quad (16)$$

то максимальное число уровней сигнала

$$K_0 = (S/N)/2m \quad (17)$$

для  $\varepsilon = 0$ , где  $S/N$  — отношение сигнала к шуму. Если  $\varepsilon \neq 0$ , то

$$K = (S/N)/2(m + n\varepsilon S/N). \quad (18)$$

Обычно запоминающие устройства на ППЗ используют в качестве блока памяти двоичной информации. Единица измерения объема памяти равна  $1\text{К} = 1024$  битам. Для увеличения объема памяти запоминающих устройств на ППЗ, отдельные регистры сдвига на ППЗ объединяют в более сложные системы, используя при этом различные схмотехнические организации: последовательную, последовательно-параллельно-последовательную (ППП), уплотненные и мультиплексные системы с одним и многими тактами действия. Чем сложнее схмотехническая организация, тем выше емкость запоминающего устройства [22]. В системах с последовательной схмотехнической организацией удельная мощность рассеяния не зависит от длины регистра. В ППП-организации мощность рассеяния повышается с уменьшением длины отдельного регистра. По критерию рассеиваемой мощности наиболее выгодны системы с мультиплексной организацией. В многотактной ППП-организации достигается наибольшая плотность записи информации.

Запоминающие устройства на ППЗ выполняют следующие операции: запись, считывание, восстановление информации, хранение информации без сдвига и операции в режиме считывание — модификация — запись. В режиме записи исходные данные поступают на место хранения информации. При этом предыдущая информация стирается. В режиме считывание — модификация — запись хранимые данные поступают на выход, а на их место записываются новые данные.

Существуют два класса запоминающих устройств на ППЗ: с последовательной выборкой и емкостью до 16К и тактовой частотой 10 МГц, с блочной выборкой и емкостью от 4 до 64К на частоте от 2 до 10 МГц, а также с произвольной выборкой до 65К. Для разделения областей хранения и передачи зарядов в системе с произвольной выборкой используют два этажа затворов. В системе на сдвоенных ППЗ-элементах можно вести неразрушающее считывание информации при помощи плавающего затвора [1].

Быстродействие запоминающих устройств на ППЗ ограничено величиной емкостной нагрузки генератора тактовых импульсов.

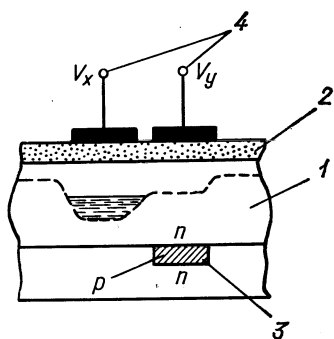


Рис. 18. Схема ячейки памяти на ППЗ:

1 — слой полупроводника с проводимостью  $n$ -типа; 2 — слой диэлектрика; 3 — диффузионная шина с  $p^+$ -проводимостью; 4 — электроды ячейки

элементе ведется при помощи диффузионной шины с  $p^+$ -проводимостью, расположенной внутри слоя кремния с  $n$ -проводимостью. Процесс неразрушающего считывания ведется при помощи двух электродов, на которые подано различное напряжение, путем взаимной смены потенциалов. Когда заряд перетекает из одной потенциальной ямы в другую, на  $p^+$ -шине возникает импульс напряжения. Считывание информации идет одновременно со всех элементов столбца или строки.

Для того чтобы увеличить время хранения информации в ППЗ-памяти, используют структуру металл — нитрид — окисел — полупроводник (МНОП) [64], которая отличается от МОП-структуры наличием дополнительного слоя нитрида кремния. Под действием высокого напряжения смещения, поданного на электрод, заряд выталкивается из кремниевой подложки в зазор между окислом и нитридом. Заряд захватывается в этом слое и влияет затем на пороговые напряжения МНОП-структуры. Под действием

В системах с блочной выборкой тактовые импульсы идут только в определенные блоки, и емкостная нагрузка генератора мала. Все блоки обслуживаются одним усилителем-регистром. Максимальное время выборки первого бита равно 80 нс, а в среднем по регистру — 12 мкс. По сравнению с запоминающими устройствами на МОП-транзисторах ППЗ-системы занимают в два раза меньше площади: в ППЗ-системах удобно хранить аналоговую информацию, в них отсутствуют контакты между элементами регистра.

Элементы памяти на ППЗ с произвольной выборкой [36] имеют строение, аналогичное строению элемента прибора с инжекцией заряда (рис. 18). Процесс записи информации в таком

обратного по полярности смещения, поданного на электрод, захваченный заряд убирается из зазора между окислом и нитридом. В отличие от традиционного ППЗ с МОП-структурой, где информация вводится в форме неосновных носителей зарядов, агентом введения информации в МОП-структуре является импульс электрического напряжения, прикладываемый к электроду. При помощи такого МНОП-элемента удается изготовить запоминающее устройство с произвольной выборкой и временем хранения до одного года при комнатной температуре.

Стоимость запоминающих устройств на ППЗ в 4—6 раз меньше стоимости устройств памяти на магнитных барабанах или на дисках. Существенным достоинством запоминающих устройств на ППЗ является то, что блок памяти можно реализовать на одном кристалле кремния. Ожидают [1], что в ближайшее время будут разработаны многоуровневые системы памяти на ППЗ.

## 7. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НА ППЗ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Наиболее распространенным видом преобразования в технике спектрального анализа является дискретное преобразование Фурье. К нему можно свести дискретную свертку или корреляцию, а также решить многие задачи фильтрации и восстановления сигналов. Решающим фактором является наличие быстрых алгоритмов преобразования Фурье на ЭВМ. Между тем цифровые алгоритмы дискретного преобразования Фурье обладают одним существенным недостатком. А именно, процесс спектрального преобразования цифровой последовательности невозможно начать раньше, чем закончится стадия квантования массива исходной информации. В аналоговых системах дело обстоит иначе. Здесь преобразование Фурье можно выполнить в реальном времени. Для этого достаточно воспользоваться чирп-алгоритмом вычисления дискретного фурье-образа. Сущность чирп-алгоритма состоит в следующем [1, 55]. Если в фурье-образе

$$F(\omega) = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \exp\left(\frac{2\pi i}{N} x \omega\right), \quad (19)$$

где  $0 \leq x \leq N-1$ ,  $0 \leq \omega \leq N-1$ , а исходная функция задана в виде эквидистантной последовательности из  $N$ -отсчетов, величину  $2x\omega$  заменить ее алгебраическим эквивалентом

$$2x\omega = x^2 + \omega^2 - (\omega - x)^2, \quad (20)$$

то фурье-образ  $F(\omega)$  запишется в виде

$$F(\omega) = \exp\left(-i \frac{\pi\omega^2}{N}\right) \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \exp\left(-i \frac{\pi x^2}{N}\right) \exp\left(\frac{i\pi(\omega-x)^2}{N}\right). \quad (21)$$

Множители вида  $\exp(i\pi x^2/N)$  называют *чирп-сигналом*. Мгновенная частота таких сигналов изменяется линейно с координатой  $x$ .

Структура выражения (21) показывает, что нахождение фурье-образа  $F(\omega)$  исходной функции  $f(x)$  сводится к дискретной свертке и к двум операциям умножения на чирп-сигналы. На рис. 19

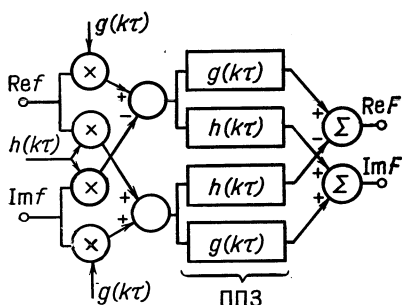


Рис. 19. Чирп-алгоритм вычисления дискретного фурье-образа комплексно-значной функции при помощи ППЗ-регистров в реальном времени

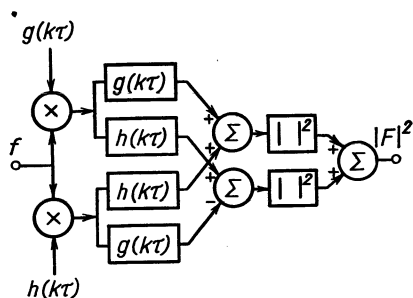


Рис. 20. Чирп-алгоритм вычисления спектра мощности сигнала при помощи ППЗ-регистров в реальном времени

приведена одна из возможных реализаций этих операций при помощи ППЗ. Исходную последовательность отсчетов  $f(x)$ ,  $0 \leq x \leq N-1$ , разбивают на вещественную и мнимую части и каждую из них подают на один из двух каналов. В первом канале выполняется аналоговая операция умножения на функцию  $\cos \pi x^2$ , а в квадратурном — операция умножения на функцию  $\sin \pi x^2$ . Перекрестные суммарные и разностные компоненты поступают в корреляторы и на линии задержки, построенные при помощи ППЗ. Всего имеется четыре канала с перекрестными связями на выходе. Каждая из выходных последовательностей поступает в прямой и квадратурный каналы. Устройство имеет два выхода. В первый из них поступает вещественная компонента  $F_{\text{Re}}(\omega)$ , а во второй — мнимая компонента  $F_{\text{Im}}(\omega)$ . Если требуется найти спектр мощности сигнала, то схема чирп-алгоритма реализуется проще (рис. 20). Весовые функции коррелятора, выполненного на ППЗ, равны значениям отсчетов прямого и квадратурного чирп-

сигналов:

$$\left. \begin{aligned} g(k\tau) &= \cos [\xi (k\tau)^2]; \\ h(k\tau) &= \sin [\xi (k\tau)^2], \quad -T_d/2 < k\tau < T_d/2, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где  $\xi$  — коэффициент, задающий масштаб чирп-сигнала;  $T_d$  — длительность импульсного отклика, а  $\tau$  — тактовый период. Время  $T_d$  ограничено сверху процессами тепловой генерации носителей заряда в ППЗ-ячейках и составляет 1—10 с. Соответствующая предельная разрешающая способность по частоте равна 0,1—1 Гц.

Точность, с которой ППЗ выполняет дискретное преобразование Фурье при помощи корреляционного чирп-алгоритма, существенно хуже, чем точность вычисления дискретного фурье-образа на ЭВМ. Так, например, неопределенность в амплитуде, вызванная технологическими факторами в процессе изготовления взвешивающих масок ППЗ, составляет не менее  $1 : 10^3$ , что эквивалентно не более 10 двоичным знакам. Описанные в литературе чирп-корреляторы на ППЗ содержат цепочку из 500 элементов, функционируют на тактовой частоте 20 кГц и вычисляют спектр с разрешением ( $1 : 500$ ) по частоте около 40 Гц за 25 мс. Динамический диапазон ППЗ-корреляторов равен  $10^4 : 1$ . Оценки показывают, что можно построить ППЗ-корреляторы с числом ячеек до  $10^3$  и с тактовой частотой до 20 МГц. Универсальным параметром, характеризующим информационную пропускную способность системы обработки информации и ее быстродействие, является произведение продолжительности цикла обработки на полосу частот. Для ППЗ эта величина ограничена сверху значением, приблизительно равным  $10^5$ .

## 8. СТРИМЕРНАЯ КАМЕРА НА ППЗ

Треки, образующиеся в стримерной камере, обычно фотографируют при помощи светосильных оптических систем [38]. В последнее время начали использовать голографический метод съема информации [47], который дает более высокое пространственное разрешение [39]. Общим недостатком этих двух методов является то, что процесс обработки большого количества трековых фотографий занимает длительное время. Чтобы его ускорить, физики стали переходить на бесфильмовые системы съема трековой информации [40]. В частности, для регистрации треков в стримерных камерах используют видеоконные системы и системы с усилителями изображений [41].

Операция считывания информации с экрана видеокона имеет малую скорость и это является наиболее слабым местом электронно-оптических систем съема информации со стримерных камер.

Преимущество ППЗ состоит в том, что они являются самосканирующими системами, обладают высоким быстродействием и в них полностью отсутствуют геометрические искажения. Наконец, принцип действия ППЗ позволяет совместить фильтрацию и сжатие информации с процессом считывания треков в стримерных камерах. Напомним, что стример, образующийся под действием импульса электрического поля, живет около  $10^{-8}$  с, имеет эффективные размеры около 1 мм.

Первая стримерная камера на ППЗ [42] была изготовлена Вилла и Вангом в Станфордском университете (США) в 1977 г. Они использовали ППЗ типа 202А, выпускаемые на рынок фирмой США [43]. Основные трудности, с которыми столкнулись авторы работы [42], заключались в том, что ППЗ типа 202А имеет большой темновой ток. Темновой ток изменяется от ячейки к ячейке, но его пространственная картина стабильна во времени. Уровень случайных шумов составляет около  $10^{-2}$  от среднего уровня темнового тока при тактовой частоте 2 МГц и комнатной температуре.

Изображение стримерных треков, возникающих в двухметровой стримерной камере Станфордской лаборатории [43], формировалось при помощи объектива с фокусным расстоянием 25 мм и светосилой 1 : 2 на матрице  $100 \times 100$  ППЗ 202А с размером ячейки  $14 \times 30$  мкм<sup>2</sup>. Линейное геометрическое уменьшение, создаваемое оптикой, составляло 1 : 160.

Считывание изображения с матрицы производилось при частоте тактовых импульсов 4,5 МГц. Если амплитуда сигнала, поступающего с выхода цепочки ячеек ППЗ, превышала заданный порог, то генератор тактовых импульсов останавливался на время 25 мкс. Значения координат X и Y ячейки и амплитуда импульса в ячейке, квантованная в системе АЦП, накапливались в блоке памяти. Из-за неполадок в системе АЦП информация об амплитудах не поступала в блок памяти и ее наблюдали на экране электронно-лучевой трубки.

Стримерные треки одновременно фотографировались обычной фотокамерой на фотопленке. Было обнаружено, что при низком уровне дискриминации в некоторой части матрицы возникает яркая область засветки от темнового тока. Ширина треков, полученных при помощи ППЗ, составляет 1/2 ширины ячейки или 7,5 мкм.

Данные, полученные Вилла и Вангом в предварительных экспериментах, следует расценивать как обнадеживающие. Авторы этой работы предполагают в дальнейшем использовать ППЗ типа 211, матрица которого состоит из  $244 \times 190$  ячеек размером  $18 \times 14$  мкм<sup>2</sup>, а тактовая частота составляет 7 МГц. Это позволит уменьшить коэффициент геометрического уменьшения и получить точность, сравнимую с точностью, которую дает фотографическая

эмульсия. Кроме этого, ППЗ-211 обладает более высокой чувствительностью, а картину темнового тока можно ослабить до требуемого уровня путем охлаждения матрицы ППЗ до температуры  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Открытым остается вопрос о динамическом диапазоне ППЗ и о их потенциальных возможностях противостоять переоблучению для тех частиц, которые идут под малым углом ( $<30^{\circ}$ ) к вектору электрического поля. Треки таких частиц имеют искровую моду и их яркость в  $10^3$  раз выше, чем для стримерной моды. Противоореольный слой, используемый в фотоэмульсии, ослабляет эффект избыточной засветки. Яркость стримерного трека в ППЗ-матрице, оцененная в работе Вилла и Ванга, составляет примерно  $1 : 200$  от уровня насыщения ППЗ. Поэтому коэффициент избыточной засветки ППЗ составит  $10 \div 1$ , а это будет вполне достаточно, чтобы полностью «засветить» всю цепочку ячеек ППЗ.

Экспериментальное сопоставление параметров ППЗ с фотографической эмульсией было проведено в [44] для времени экспонирования около 0,25 мкс. Была определена чувствительность ППЗ-202 для изображений в лучах неоновом свете и сравнена с соответствующими параметрами фотоэмульсии Кодак SO-143, которая считается наилучшей для использования в стримерных камерах. Было показано, что светочувствительность матриц ППЗ-202, охлажденных до  $-10^{\circ}\text{C}$ , на порядок превышает чувствительность самой лучшей пленки Кодак SO-143. Было также обнаружено, что охлаждение ППЗ ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  нецелесообразно, так как в этой области преобладают шумы выходных цепей. ППЗ-201, охлажденный до температуры  $-50^{\circ}\text{C}$ , был с успехом использован в астрономических фотоприемниках. Для охлаждения матрицы ППЗ был использован термоэлектрический холодильник. Измеренная зависимость среднего темнового тока от температуры описывается экспонентой. Охлаждение целесообразно вести до такой температуры, при которой темновой сигнал становится существенно меньше полезного сигнала.

Высокая чувствительность матрицы ППЗ, охлажденной до  $-10^{\circ}\text{C}$ , позволяет уменьшить длительность высоковольтного импульса, который создает стримеры вдоль пути заряженной частицы. Более короткие стримеры повышают точность измерений и уменьшают интенсивность паразитной засветки объема камеры.

Изображение, получаемое с матрицы ППЗ, имеет квантованную форму и его можно перенести на экран электронно-лучевой трубки диалоговой системы для последующей обработки методом светового карандаша. Эту информацию можно обрабатывать на линии с экспериментом. Преимущества бесфильмовых систем съема информации с трековых камер реализуются в системах ППЗ наиболее ярко.



## 9. ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НА СТАДИИ СЧИТЫВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТРЕКОВ ПРИ ПОМОЩИ ППЗ

Объем информации, поступающий со стримерной камеры, относительно невелик, и только небольшая часть элементов изображения содержит сигнальные заряды. Например, освещенными оказываются не более  $5 \cdot 10^4$  ячеек в полной матрице из  $10^6$  ячеек. Подавляющая часть ячеек оказывается либо пустой, либо содержит сигнал непустого нуля. При этом каждый стример трека имеет высокую пространственную корреляцию с соседним стримером. Стримеры образуют простые геометрические линии: прямые, дуги окружности или кривые третьего порядка — и все они исходят из точечной области, где произошло ядерное событие. Это означает, что число независимых компонент информации на фотографиях в стримерной камере весьма невелико. Желательно найти эти независимые компоненты непосредственно в процессе считывания информации с матрицы ППЗ.

В работе [45] был разработан алгоритм считывания прямолинейных треков при помощи масок Уолша. Сущность его состоит в том, что на стадии считывания прямолинейных треков ведется быстрый поиск инвариантных компонент дискретного уолш-образа, минуя операцию нахождения полного набора компонент двумерного уолш-образа. При построении алгоритма поиска инвариантных компонент двухмерного уолш-образа прямолинейного трека был использован тот факт, что инвариантные к сдвигу компоненты уолш-образа находятся на последней строке и на последнем столбце матрицы-образа трека. Основой алгоритма является итерационный процесс просмотра краевых элементов матрицы-образа с последовательными разбиениями на две равные части соответствующего массива компонент уолш-образа. Этот массив является либо исходным, либо возникает после предыдущего такта просмотра.

Существует последовательность модифицированных масок Уолша, которые позволяют непосредственно определить значения сумм, вычисляемых на различных этапах считывания информации. Процесс считывания ведут при помощи модифицированных масок Уолша, минуя операцию нахождения всех компонент уолш-образа.

Описанный в [45] алгоритм поиска инвариантных компонент уолш-образа прямолинейных треков можно реализовать при помощи приборов с инъекцией заряда, используя, в частности, метод неразрушающего считывания [13] или же последовательное инъецирование сигнальных зарядов в горизонтальные шины.

Однако этому алгоритму присущи некоторые недостатки, главным образом, вызванные тем, что поиск не топологический и на всех шагах, кроме последнего, не оперирует с полным изображением трека.

Был разработан принцип действия алгоритма топологического анализа треков частиц на примере прямолинейного трека [46]. Процесс считывания ведут при помощи матрицы ППЗ с тем существенным отличием, что тактовые импульсы подаются не на все строки матрицы ППЗ, а выборочно. В случае прямолинейных треков число тактовых импульсов, пропущенных на каждую строку матрицы ППЗ, изменяют по ступенчато-линейному закону. Поэтому прямоугольные треки поворачиваются относительно матрицы ППЗ как единое целое, без нарушения его топологических характеристик.

Такой поворот ведут до тех пор, пока трек не займет вертикальное положение. На обратной стороне матрицы ППЗ или прибора с инжекцией заряда расположены вертикальные шины, имеющие электрическую емкостную связь с каждым из столбцов матрицы ППЗ. В тот момент, когда трек займет вертикальное положение, сигнал на соответствующей вертикальной шине достигнет максимального значения. Координата вертикальной шины, на которой образуется максимальный сигнал, равна координате выхода трека в верхнюю часть кадра. Значение угла наклона трека в исходном положении до начала считывания определяется числом тактовых периодов работы генератора тактовых импульсов. Данные о координате входа трека в кадр и его угол наклона квантуют и направляют в блок памяти. Для дополнительного ускорения процесса считывания изображений треков весь кадр разбивают на небольшие фрагменты размером  $8 \times 8$  или  $16 \times 16$  и топологические операции считывания ведут одновременно во всех фрагментах. При частоте следования тактовых импульсов около 50 МГц полное время считывания кадра составит около 0,5 мкс. Если в кадре имеется несколько треков с различными координатами входа и различными углами наклона, то максимумы на гребенке вертикальных шин возникают столько раз, сколько треков имеется в кадре.

На рис. 21 приведены восемь векторов-столбцов, которые задают последовательность сдвигов на один шаг вправо. Черные поля означают, что в данном регистре картина сдвигается на один шаг вправо, а белые поля соответствуют тем регистрам, на которые тактовые импульсы не подаются. В нижней строке указаны номера тактов. Нулевому такту соответствует исходная картина треков в кадре. Небезынтересно отметить, что матрица на рис. 21, харак-

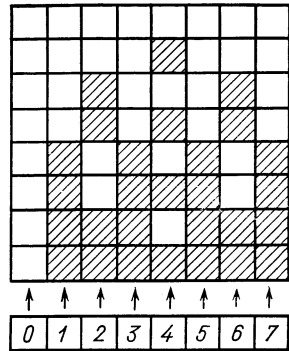


Рис. 21. Совокупность восьми векторов-столбцов, задающих алгоритм пропуска тактовых импульсов в горизонтальные регистры матрицы ППЗ

теризующая последовательность сдвигов на один шаг вправо, совпадает с матрицей отпирающих напряжений на  $J - K$ -триггерах, входящих в состав генераторов дискретных функций Уолша [48].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полупроводниковая микроминиатюрная техника, составляющая базу для приборов с переносом зарядов, развивается высокими темпами. Число областей науки и техники, где ППЗ находят применение, адекватное их физическим и техническим характеристикам, постоянно расширяется. Приведем некоторые типичные иллюстрации этого процесса.

ППЗ-матрица в качестве приемника инфракрасного излучения была успешно использована в астрономии на Аризонском,  $D = 155$  см, и Паломарском,  $D = 510$  см, телескопах. Космический корабль, который послан к планете Юпитер, оснащен телевизионной камерой в виде ППЗ-матрицы размером  $800 \times 800$  элементов. Отсутствие каких-либо геометрических искажений в такой системе считывания позволит определить координаты объектов с высокой точностью.

Изготовлены новые модели линий задержек на ППЗ с числом элементов 4096 и временем задержки 0,2 с. Изготовлены трансверсальные ППЗ-фильтры и системы преобразования Фурье в реальном времени с числом элементов 512. Ожидают, что точность вычислений в этих системах будет выше, чем в цифровых компьютерах.

Интенсивно развиваются запоминающие устройства на ППЗ с большой емкостью и произвольной выборкой. Ожидают, что к 1980 г. будут созданы компактные блоки ППЗ-памяти емкостью 128К и 256К.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sèquin C., Tompsett M. Charge transfer devices. N. Y., Academic Press, 1975.  
На рус. яз.: Секин К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда.— М.: Мир, 1978.
2. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью.— М.: Сов. радио, 1976.
3. Barbe D. F.— Proc. IEEE, 1975, v. 63, p. 38.  
На рус. яз.: — ТИИЭР, 1975, т. 63, № 1, с. 45.
4. Boyle W. S., Smith G. E.— BSTJ, 1970, v. 49, p. 587.
5. Steckl A. J. e.a.— Proc. IEEE, 1975, v. 63, p. 67.  
На рус. яз.: — ТИИЭР 1975, т. 63, № 1, с. 79.
6. Berglund C. N. e.a.— Appl. Phys. Lett., 1972, v. 20, p. 413.
7. Melen R. D., Meindl J. D.— IEEE J., 1972, v. SC-7, p. 92.
8. Walden R. H. e.a.— BSTJ, 1972, v. 51, p. 1635.
9. Гергель В. А.— Микроэлектроника, 1973, т. 2, № 5, с. 415.

10. Boonstra L., Sangster F. L.— Electronics, 1972, v. 45, p. 64.
11. Barbe D. F.— Electronics Lett., 1972, v. 8, p. 207.
12. Villa F., Wang L. C.— Nucl. Instrum. and Methods, 1977, v. 144, p. 533.
13. Burke H. K., Michon G. J.— IEEE J., 1976, v. SC-11, p. 121.
14. Séquin C. H. e.a.— Ibid., p. 115.
15. Wen D. D., Salsbury P. J.— ISCCC, Philadelphia, Digest Techn. Papers, 1973, p. 154.
16. Wen D. D.— IEEE J., 1974, v. SC-9, p. 410.
17. Collins D. R. e.a.— Electronics Lett., 1972, v. 8, p. 328.
18. Жалуд В., Кулешов В. Н.— В кн.: Шумы в полупроводниковых устройствах. М., Сов. радио — Прага, Изд-во техн. лит., 1977.
19. Seib D. H.— IEEE Trans., 1974, v. ED-21, p. 210.
20. Кондрацкий Б. А., Логунов Л. А., Шилин В. А.— Зарубежная электронная техника, 1974, № 15, 16.
21. Хотянов Б. М., Шилин В. А.— Там же, 1975, № 9, 10.
22. Хотянов Б. М., Шилин В. А.— Там же, 1976, № 23, 24; 1977, № 1, 2.
23. Вето А. В. и др.— В кн.: Микроэлектроника. Вып. 8. М., Сов. радио, 1975, с. 50.
24. Кандыба П. Е. и др.— В кн.: Микроэлектроника. Вып. 7.— М., Сов. радио, 1974, с. 55.
25. Носов Ю. Р., Шилин В. А.— Зарубежная [электронная техника, 1974, № 13.
26. Tompsett M. F., Zimany E. F.— IEEE J., 1973, v. SC-8, p. 151.
27. Tozer R. C., Hobson G. S.— Electronics Lett., 1976, v. 12, p. 444
28. Meindl J. D.— In: Acoustic Imaging. Ed. G. Wade, Plenum Publ. Co., 1976, p. 127.
29. Baertsch R. D. e.a.— IEEE J., 1976, v. SC-11, p. 65.
30. Brodersen R. W. e.a.— Ibid., p. 75.
31. Butler N. J. e.a.— Electronics Lett., 1972, v. 8, p. 543.
32. Barbe D. F.— IEEE J., 1976, v. SC-11, p. 109.
33. Вето А. В. и др.— В кн.: Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. Вып. 2. М., Сов. радио, 1977, с. 216.
34. Brown D. M. e.a.— IEEE J., 1976, v. SC-11, p. 128.
35. Jaspers P. G. A., Millet J. M.— Ibid., p. 133.
36. Villa F., Wang L. C.— Electronics, 1975, v. 48, p. 138.
37. Roberts J. V. G.— Electronics Lett., 1976, v. 12, p. 452;— IEEE J., 1976, v. SC-11, p. 100.
38. Ермолаев В. В. и др.— Сообщение ОИЯИ P10-9949. Дубна, 1976.
39. Козлов В. С. и др.— Препринт ЛИЯФ № 262. Ленинград, 1976.
40. Заневский Ю. В.— ЭЧАЯ, 1977, т. 8, вып. 3, с. 631.
41. Бергер Ю. и др.— Сообщение ОИЯИ P13-10219. Дубна, 1976.
42. Villa F., Wang L. C.— SLAC-PUB-1890, 1977.
43. Wallick W., Kenyon R.— Reprint DN-28, University of Washington, Seattle, 1976.
44. Wallick W. O. e.a.— Nucl. Instrum. and Methods, 1977, v. 146, p. 403.
45. Кожевникова С. О., Сороко Л. М.— Сообщение ОИЯИ P10-7757. Дубна, 1974.
46. Сороко Л. М.— Сообщение ОИЯИ P10-11515. Дубна, 1978.
47. Сороко Л. М.— ЭЧАЯ, 1972, т. 3, вып. 3, с. 688.
48. Besslich P. M.— IEEE Trans., 1973, v. EMC-15, p. 177.
49. Крымко М. М. и др.— В кн.: Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. Вып. 2. М., Сов. радио, 1977, с. 211.
50. Попов В. П. и др.— Там же, с. 243.
51. Власенко Е. В. и др.— Там же, с. 223.
52. Carnes I. E., Kosonocky W. F.— Appl. Phys. Lett., 1972, v. 20, p. 261;— RCA Review, 1972, v. 33, p. 327.
53. Copeland M. A. e.a.— IEEE J., 1976, v. SC-11, p. 84.

54. Lind L. F., Matheson W. S.— Electronics Lett., 1976, v. 12, p. 343.
55. Semiannual Technical Report USC IPI-660, 1976, p. 200.
56. Butler W. J. e.a.— IEEE J., 1976, v. SC-11, p. 93.
57. Chen S.— Ibid., p. 93.
58. Hense K. R., Collins T. W.— Ibid., p. 197.
59. Mohsen A. M. e.a.— Ibid., p. 49.
60. Tchou W. E. e.a.— Ibid., p. 25.
61. Terman L. M., Heller L. G.— Ibid., p. 4.
62. Tompsett M. F. e.a.— IEEE Trans., 1971, v. ED-18, p. 992.
63. Vanstone G. F.— Electronics Lett., 1972, v. 8, p. 13.
64. Wallmark J. T., Scott J. H.— RCA Review, 1969, v. 30, p. 335.
65. Зимогляд В. А. и др.— В кн.: Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. Вып. 2. М., Сов. радио, 1973.
66. Whitehouse H. J.— IEEE J., 1976, v. SC-11, p. 64.
67. Роуз А. Зрение человека и электронное зрение. Пер. с англ.— М., Мир, 1977.
68. Березин В. Ю. и др.— Техника кино и телевидения, 1977, № 6, с. 54.