

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2009

История изобретения приборов с зарядовой связью

Дж.Е. Смит

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2009 г.)

PACS numbers: 01.30.Bb, 85.30.-z, 85.60.Gz

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201012j.1357

Я расскажу о том, как У.С. Бойл и я в 1969 г. изобрели приборы с зарядовой связью (ПЗС). Наше изобретение было сделано на стыке трёх стремительно развивавшихся в то время направлений. Это цилиндрические магнитные домены. Это видикон на матрице кремниевых диодов (видикон разрабатывался для видеотелефона). И, наконец, это полупроводниковая МОП-технология.

Цилиндрические магнитные домены (ЦМД) образуются при помещении специального магнитного материала, обычно граната, в магнитное поле, как показано на рис. 1¹. На поверхность пластины наносились пермаллоевые аппликации, что делало возможным захват домена. При наложении в плоскости пластины вращающегося магнитного поля ЦМД перемещался от одного центра захвата к другому. Используя входное устройство, которое инжектировало или не инжектировало ЦМД, что соответствовало нулям или единицам, а

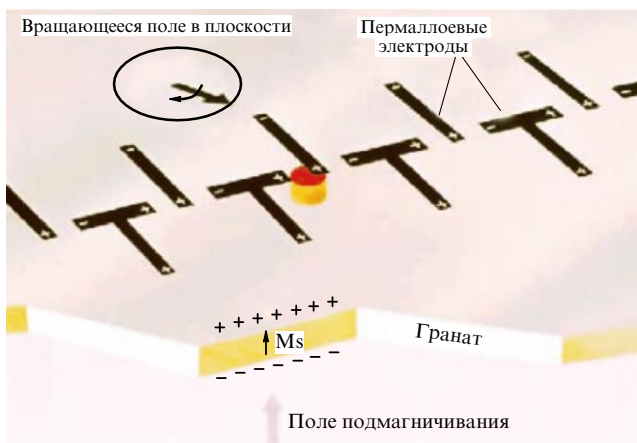


Рис. 1. Последовательный сдвиговый регистр на цилиндрических магнитных доменах.

¹ В электронной версии рисунки даны в цветном изображении (см. сайт УФН www.ufn.ru)

Дж.Е. Смит (G.E. Smith). Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA
(на пенсии)



Рис. 2. Видеотелефон и передающая электронно-лучевая трубка на матрице кремниевых диодов.

также детектирующее выходное устройство, можно получить запоминающее устройство с последовательной выборкой.

Второй важной разработкой, которая осуществлялась как раз в моём отделе, была передающая электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) на матрице кремниевых диодов, показанная на рис. 2. Она предназначалась для видеотелефона, на который, как полагали в AT&T (Американской телефонно-телеграфной компании), — материнской компании Bell Labs и в то время крупнейшем поставщике услуг телефонной связи — возникнет огромный спрос, после того как люди убедятся, что они могут не только слышать, но и видеть друг друга во время телефонного разговора. Прототипом формирова-

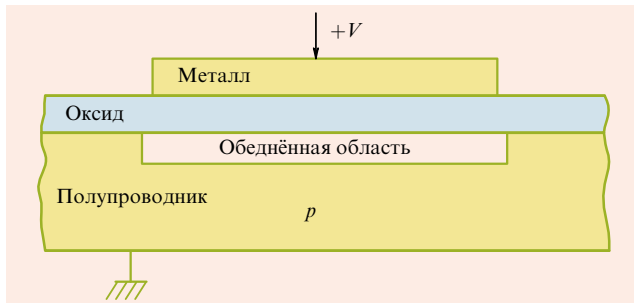


Рис. 3. Схема МОП-структуры.

теля видеосигнала являлся стандартный промышленный видикон, в котором светочувствительным элементом был трисульфид сурьмы, нанесённый на стекло. Сканирование осуществлялось электронным пучком. Это устройство пользовалось дурной славой из-за его низкой надёжности и недолговечности. Взамен мы работали над трубкой на основе кремниевой пластины с миллионами диодов на её поверхности, которые аналогичным образом сканировались электронным пучком. Использование кремния было шагом вперёд; мы, однако, надеялись создать полностью твердотельное устройство, исключаящее электронный пучок.

Третьей областью интенсивных исследований была транзисторная МОП-технология. Эта технология в конечном счёте стала основной для всех современных интегральных схем. МОП-конденсатор (МОП — это структура металл–оксид–полупроводник), служащий затвором МОП-транзистора, показан на рис. 3. Фундаментальные исследования этой структуры также проводились в моём отделе.

Чтобы понять атмосферу того времени, нужно рассмотреть структуру Отделения электроники в Bell Labs, которым руководил вице-президент Джек Мортон. Оно состояло из двух подразделений: одно по разработке полупроводниковых устройств, а другое для всех остальных направлений. Директором подразделения полупроводниковых приборов был Билл Бойл, а я был руководителем одного из его отделов. Джек Мортон стремился ускорить разработку ЦМД как главной технологии для устройств памяти, и заходила речь о переброске ресурсов из отделения Билла в другое, где шла работа над ЦМД. Чтобы этого не произошло, Мортон потребовал от отделения Билла сделать полупроводниковое устройство, которое могло бы соперничать с ЦМД. Реагируя на это требование, 17 октября 1969 г. мы с Биллом собрались в его кабинете. В ходе обсуждения, которое длилось не намного более часа, на доске появился набросок структуры ПЗС, был определён принцип действия, а также предварительно сформулированы идеи в отношении применений. Ход мысли был следующим.

Во-первых, требуется полупроводниковый аналог цилиндрических магнитных доменов. Электрическим аналогом ЦМД является зарядовый пакет. Следующая проблема состоит в том, как удержать этот заряд в ограниченной пространственной области. Структурой, которая пришла нам в голову, был, разумеется, обычный МОП-конденсатор, показанный на рис. 3. В обеднённую область может быть введён заряд, причём величина этого заряда и есть значение сигнала. Для лучшего понимания механизма работы устройства на рис. 4 показано распределение энергии электрона по глубине

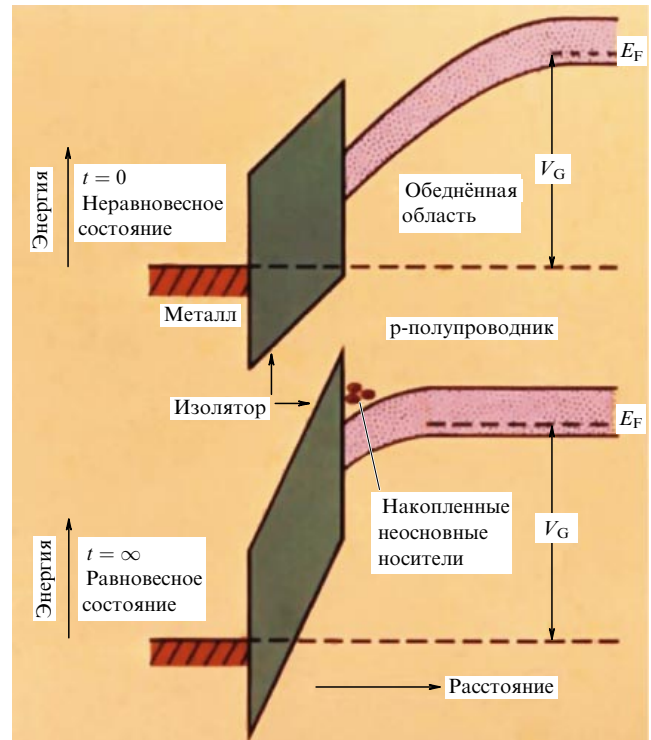


Рис. 4. Распределение энергии электрона по глубине в полупроводниковой "обкладке" МОП-конденсатора.

структуры. В результате введения заряда в обеднённую область потенциал вблизи поверхности растёт (потенциальная яма уменьшается. — *Примеч. научного ред.*) Это происходит до тех пор, пока не будет достигнута максимально допустимая величина заряда. Любой избыточный заряд стечёт в подложку.

Последняя проблема состояла в том, чтобы перемещать заряд из одной ячейки в другую и тем самым создать условия для передачи информации. Это легко достигается при размещении заряженного и незаряженного МОП-конденсаторов очень близко друг к другу, как показано на рис. 5. Чтобы переместить заряд из одной ячейки в другую, достаточно просто приложить к соседней ячейке большее напряжение. В результате её обеднённая область перекроется с обеднённой областью первой ячейки, и заряд перетечёт вдоль поверхности во вторую МОП-конденсатор (во вторую ячейку).

На основе этого механизма зарядовой связи была разработана новая структура сдвигового регистра (рис. 6). Большое число МОП-конденсаторов располо-

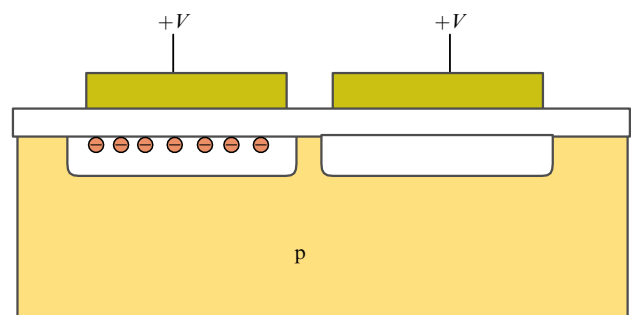


Рис. 5. Два близко расположенных (зарядово-связанных) МОП-конденсатора.

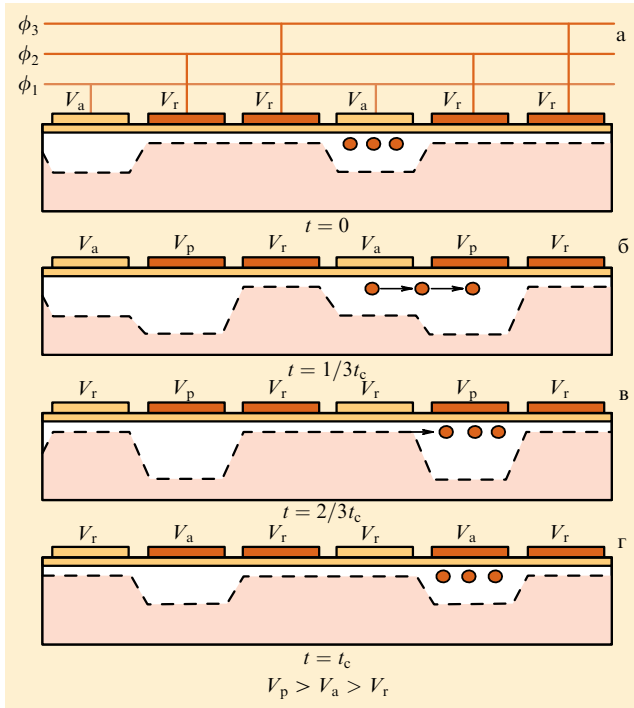


Рис. 6. Принципиальная схема ПЗС.

жено в ряд с очень малым зазором между ними и подсоединено к трёхфазному источнику напряжения. На рисунке ба показана фаза хранения, когда напряжение V_a приложено к электродам одной фазы и значительно меньшее напряжение V_r приложено к электродам двух других фаз. В одной ячейке есть заряд, в другой заряда нет. На рисунке бб показана фаза переноса, когда большее напряжение, V_p , приложено к соседним обкладкам для переноса заряда от одной ячейки к следующей. На последних двух рис. бв, г показано возвращение напряжений в первоначальное состояние при состоявшемся сдвиге информационного заряда на одну ячейку. Фазы переноса повторяются до тех пор, пока заряд не поступит на выход линейки — в выходное устройство. Это устройство и считывает поступивший заряд (накопленную информацию). Можно предложить множество других схем хранения и переноса информации. Возможна электрическая инжекция заряда в начале ряда, образующего сдвиговый регистр, или генерация светом, падающим на структуру с пустыми (незаряженными) ячейками. В этом случае величина заряда, накопленного при поглощении фотонов, определяется интенсивностью излучения, а результирующее распределение заряда может быть считано с помощью сдвигового регистра после соответствующего времени интегрирования.

Таким образом, изобретение стало полностью завершённым. Следует подчеркнуть, что основным носителем информации в приборе был дискретный зарядовый пакет, а не напряжения и токи в схемных устройствах. ПЗС действительно является функциональным устройством, а не набором отдельных устройств, соединённых проводами.

Наконец, было принято решение продолжать работу и продемонстрировать принцип работы прибора на экспериментальном образце. Менее чем за неделю были изготовлены маски, изготовлены и испытаны образцы.

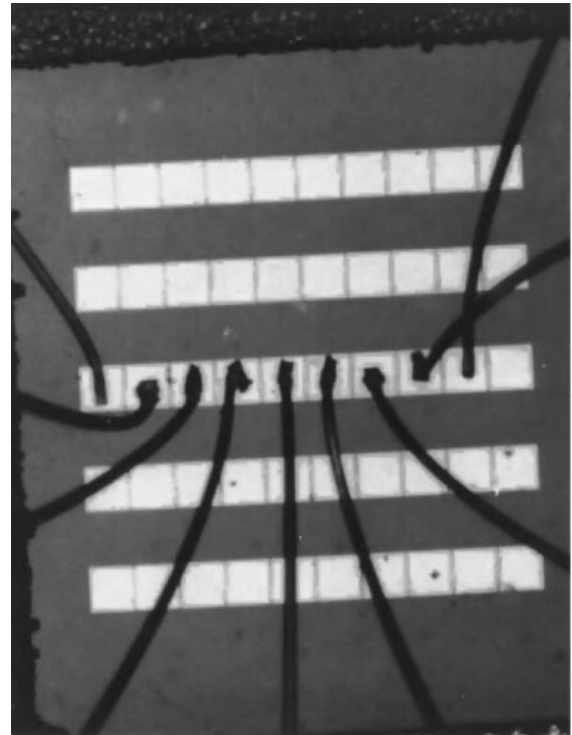


Рис. 7. Первый ПЗС.

Простая структура первого прибора показана на рис. 7. В первом МОП-конденсаторе происходила тепловая генерация заряда, затем под действием приложенного напряжения заряд перемещался к выходу, где он инжектировался в подложку и детектировался путём измерения тока на выходе.

Первое устройство было очень грубым, однако перенос заряда был успешно продемонстрирован, а вслед за этим последовало создание первой интегральной структуры, показанной на рис. 8. В этой структуре имелась трёхфазная система металлизации и осуществлялись диффузионный ввод и диффузионный вывод информационного заряда. Была успешно продемонстрирована работа прибора в качестве запоминающего устройства с

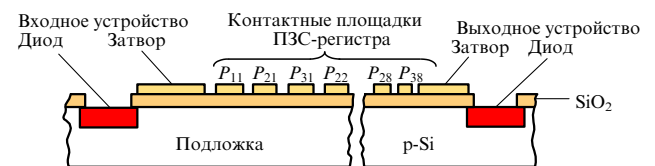


Рис. 8. Первый ПЗС в интегральном исполнении.



Рис. 9. Вывод на экран осциллографа выходного сигнала с восьми-пиксельного ПЗС, используемого в качестве детектора изображения.

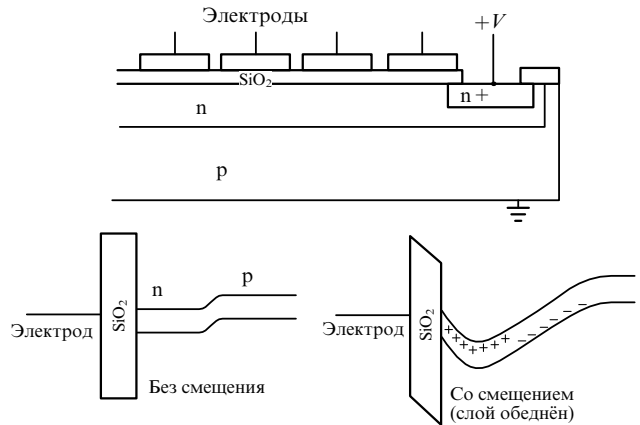


Рис. 11. ПЗС со скрытым каналом.

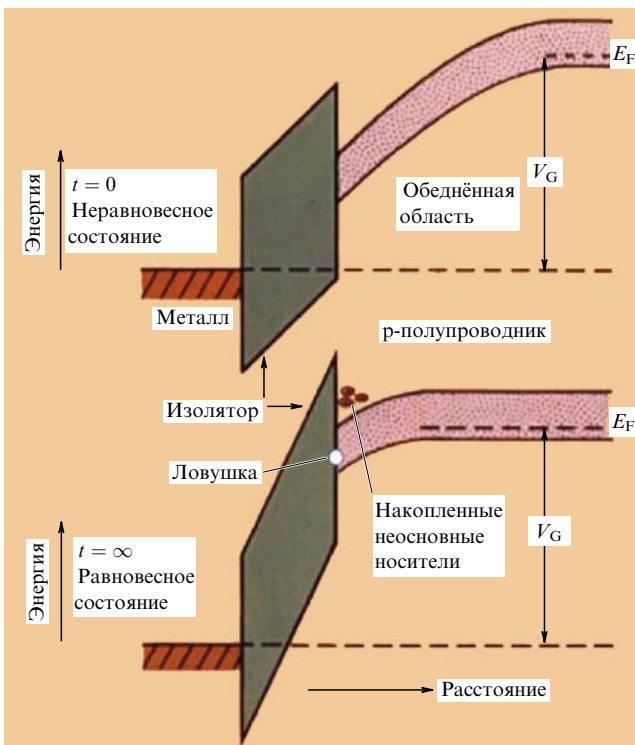


Рис. 10. Ловушки на границе раздела структуры Si – SiO₂.

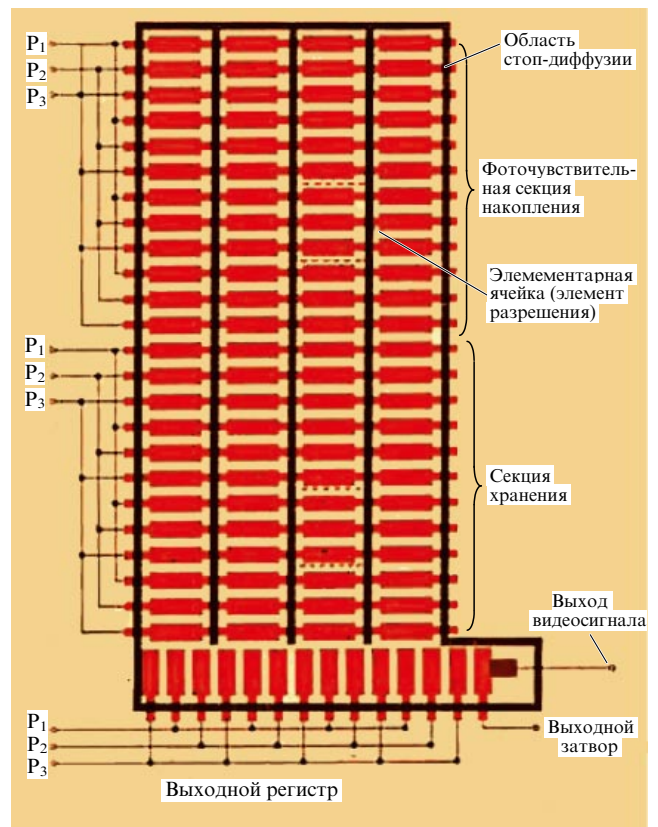


Рис. 12. Геометрия матричного ПЗС.

последовательной выборкой — первая движущая сила изобретения. Не удивительно, что мы попытались использовать этот восьмиразрядный ПЗС как линейное сканирующее устройство изображения. Первое, ещё довольно грубое изображение показано на рис. 9.

На начальной стадии эксперименты показали, что основная проблема с данным устройством состояла в неэффективности переноса заряда, в невозможности переноса всего заряда целиком от одного элемента к другому. Главной причиной этого был захват зарядов в ловушки на границе между кремнием и диоксидом кремния (рис. 10). Захваченные в ловушки электроны будут высвобождаться при последующих опросах, вызывая размывание изображения. Поэтому Билл и я собрались снова и предложили ПЗС со скрытым каналом, в котором накопленный заряд помещался в объёме полупроводника, где захваты относительно редкие. Такая структура показана на рис. 11, где на поверхности исходной структуры дополнительно формировался слабо-

легированный n-слой. На рисунке показан потенциал, возникающий после того как этот слой обедняется вследствие переноса электронов к выходному устройству — диоду. Теперь электроны в скрытом канале накапливаются в потенциальной яме, создаваемой в объёме кремния, и пространственно отделены от поверхностных ловушек.

Одно из главных направлений последовавшего периода стремительного развития как в Bell Labs, так и в других компаниях, включало создание матричного фотоприёмника для видеотехнических приложений. Было изобретено множество разнообразных схем. Та, которую мы выбрали для видеотелефона, схематически изображена на рис. 12. Линейные ПЗС формируются рядом друг с другом и делятся на секцию накопления и секцию хранения. На рисунке 12 секция накопления



Рис. 13. Фоточувствительная ПЗС-микросхема, изготовленная для видеотелефона, и автономная телекамера.

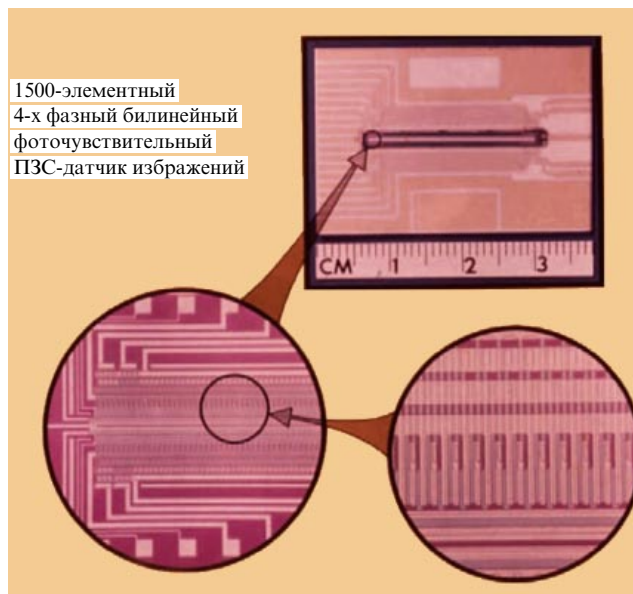


Рис. 14. У.С. Бойл и Д.Е. Смит, 1970 г.

расположена сверху, а секция хранения — ниже неё. При проектировании изображения на секцию накопления в ней генерируются фотозаряды, которые и накапливаются в течение времени кадра. Затем эти фотозаряды быстро переносятся в секцию хранения. А с секции хранения фотозаряды последовательно считываются строка за строкой специальным сдвиговым регистром. Регистрация каждого заряда производится выходным устройством, расположенным в конце сдвигового регистра. В это же время в секции накопления накапливаются фотозаряды следующего кадра. Микросхема, которую мы изготовили для видеотелефона, показана на рис. 13 вместе с автономной экспериментальной телекамерой. Фотография на рис. 14 демонстрирует успешное тестирование прибора.

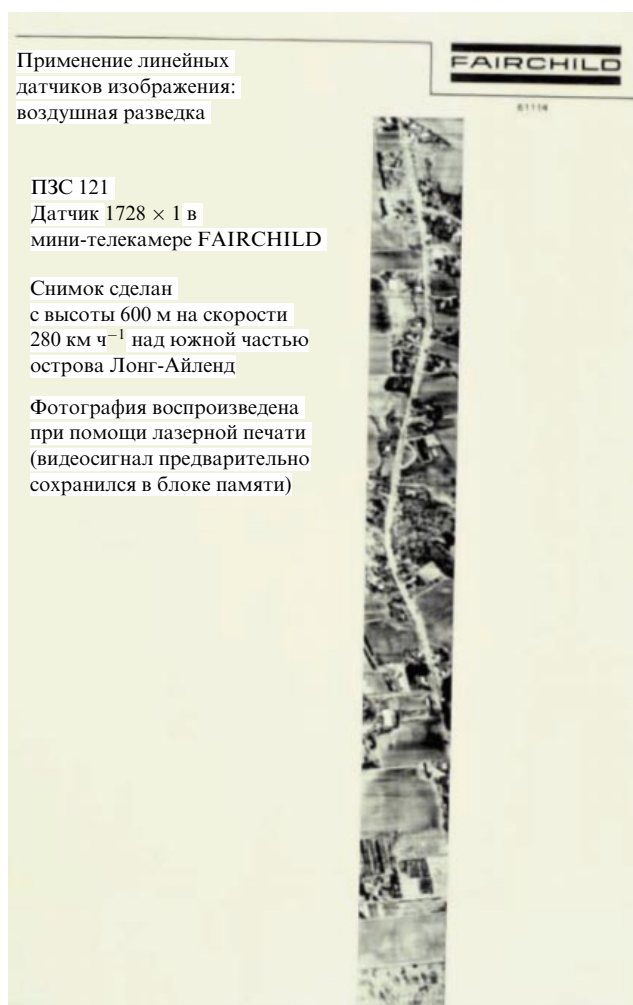
Другой разработанный нами на первых шагах прибор представлял собой линейное сканирующее устройство (рис. 15), которое предназначалось для формирования факсимильных изображений. После первого сообщения об открытии, сделанного в начале 1970 г., многие другие компании начали энергично вести проектно-конструкторские работы в этой области, и вскоре это направление стало быстро развиваться. На рисунке 16 представлен аэрофотоснимок, полученный с помощью линейного сканирующего устройства фирмы Fairchild.

Пожалуй, наиболее впечатляющие научные применения ПЗС нашли в астрономии, где их преимущества



1500-элементный
4-х фазный билинейный
фоточувствительный
ПЗС-датчик изображений

Рис. 15. Одна из первых ПЗС-линеек для регистрации изображений.



Применение линейных датчиков изображения: воздушная разведка

ПЗС 121
Датчик 1728×1 в
мини-телекамере FAIRCHILD

Снимок сделан с высоты 600 м на скорости 280 км ч^{-1} над южной частью острова Лонг-Айленд

Фотография воспроизведена при помощи лазерной печати (видеосигнал предварительно сохранился в блоке памяти)

Рис. 16. Аэрофотоснимок, полученный с помощью ПЗС-линейки фирмы Fairchild.

перед фотоплёнкой, перечисленные в табл. 1, привели ко многим новым открытиям. На рисунке 17 показан один

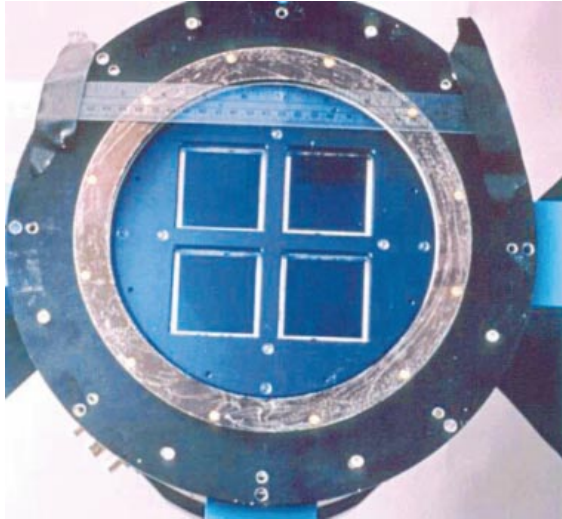


Рис. 17. Один из первых фоточувствительных ПЗС с четырьмя мегапикселями для астрономического телескопа.

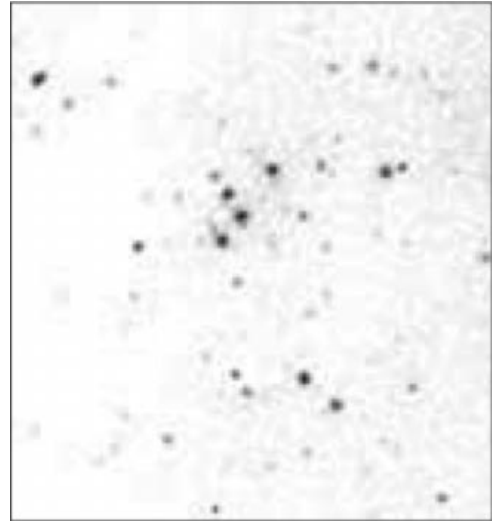


Рис. 18. Снимок участка неба, полученный при помощи фотоплёнки.

Таблица 1. Преимущества перед фотоплёнкой

Квантовая эффективность 90 % (у фотоплёнки 5 %)
Большие времена интегрирования (при температуре 160 К) (20 электронов в час на ячейку)
Широкий динамический диапазон: 10^5 электронов на ячейку
Воспроизводимость исключает систематические ошибки

Таблица 2. Применение ПЗС в устройствах формирования изображения

Цифровые фотоаппараты
Телевизионные камеры (видеокамеры)
Сканеры
Медицинская аппаратура
Аппараты факсимильной связи
Устройства считывания штрихового кода
Наблюдения с помощью искусственного спутника Земли
Наблюдения на Земле
Астрономия

из первых ПЗС с четырьмя мегапикселями. Он был предназначен для астрономического телескопа. Преимущества ПЗС иллюстрирует сравнение снимков одного и того же участка неба, полученных при помощи современной фотоплёнки (рис. 18) и ПЗС (рис. 19). Эти усовершенствования привели к таким открытиям, как экспериментальное подтверждение существования тёмной материи во Вселенной.

В заключение отметим, что ПЗС появились на свет в ходе революционного развития структур Si-SiO₂. Благодаря уникальным свойствам ПЗС произвели свою собственную революцию среди многочисленных применений фотодетекторов, перечисленных в табл. 2.

Перевёл с английского *Е.Н. Рагозин*
Научная редакция перевода *М.А. Трищенко*



Рис. 19. Снимок того же участка неба, что и на рис. 18, полученный при помощи ПЗС.

Список литературы

1. Boyle W S, Smith G E "Charge coupled semiconductor devices" *Bell Syst. Tech. J.* **49** 587 (1970)
2. Amelio G F, Tompsett M F, Smith G E "Experimental verification of the charge coupled device concept" *Bell Syst. Tech. J.* **49** 593 (1970)
3. Boyle W S, Smith G E "Buried channel charge coupled devices", U.S. Patent No. 3,792,322 (February 12, 1974)