

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЗАПИСИ И СЧИТЫВАНИЯ НА ПЗС – МАТРИЦЕ

Ковалевский Я. Н., студент гр.458303

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Григорьев А. А. – канд. физ.-мат. наук

Аннотация. Работа раскрывает принцип действия ПЗС-матриц - кремниевых сенсоров, преобразующих свет в электрические сигналы через систему МДП-структур и потенциальных ям. Описан механизм переноса зарядов, ключевые характеристики, преимущества и недостатки. Рассмотрено применение в фотоаппаратах, медицине и системах безопасности.

Ключевые слова. ПЗС-матрица, КОМП-матрица, прибор с зарядовой связью (ПЗС), МДП-структуры, физика работы ПЗС, достоинства ПЗС-матриц, недостатки ПЗС-матриц, сферы и примеры применения ПЗС-матриц, р-п переход, полнокадровый перенос, построчный перенос.

Общие сведения о ПЗС-матрице

ПЗС-матрица — это аналоговая микросхема, созданная на кремниевой основе, в которой используются светочувствительные элементы (фотодиоды) и принцип зарядовой связи для преобразования света в электрические сигналы.

Первые ПЗС были созданы в конце 1960-х годов исследователями из корпорации Bell Labs (Уиллард Бойл и Джордж Смит, позже получившие Нобелевскую премию по физике в 2009 году). Изначально они разрабатывались как альтернатива памяти для компьютеров, но вскоре обнаружилось их уникальное свойство — высокая чувствительность к свету. Это открыло путь к использованию ПЗС в качестве светочувствительных сенсоров.

Одними из первых преимуществ ПЗС оценили астрономы. Уже в 1972 году NASA запустило программу по адаптации этой технологии для космических наблюдений, а в 1975 году было получено первое изображение астрономического объекта (Урана) с помощью ПЗС-матрицы.

В 1970-е годы началось активное внедрение ПЗС в телевизионные системы, и к концу 1980-х они практически полностью вытеснили электронно-лучевые трубки. Однако широкому распространению ПЗС в первые годы мешали технологические ограничения: неоднородность светочувствительных элементов, высокий уровень шумов и сложность производства крупноформатных матриц.

Прорыв произошёл благодаря совершенствованию технологий изготовления кремниевых пластин и развитию аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Это позволило ПЗС-матрицам занять доминирующее положение в цифровой фотографии, научной и медицинской визуализации, став основой современных светочувствительных сенсоров. На рисунке 1 приведён общий вид ПЗС-матрицы.

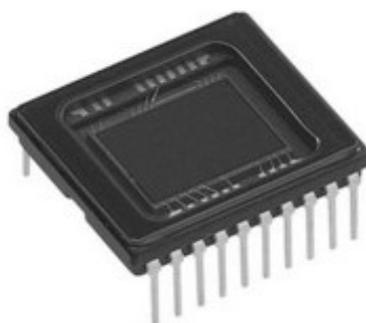


Рисунок 1 – Общий вид ПЗС-матрицы

Прибор с зарядовой связью

Прибор с зарядовой связью представляет собой массив МДП-структур (металл–диэлектрик–полупроводник), интегрированных на общей полупроводниковой подложке. Электроды из поликристаллического кремния, изолированные слоем оксида, формируют линейную или матричную конфигурацию с минимальными зазорами, обеспечивая взаимное влияние соседних элементов. На рисунке 2 приведена структура прибора с зарядовой связью.

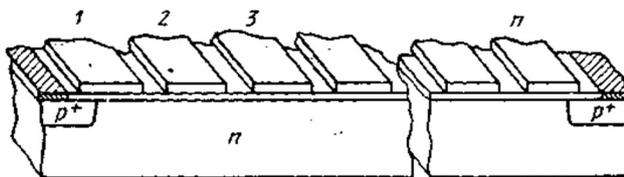


Рисунок 2 – Структура прибора с зарядовой связью

Принцип функционирования ПЗС (Рис. 3) основан на динамическом управлении зарядовыми состояниями в полупроводниковой среде. При подаче потенциала отрицательной полярности на металлизированный электрод возникает электрическое поле, отталкивающее основные носители (электроны) вглубь подложки p-типа. Возле поверхности формируется зона обеднения, выступающая в энергетической модели как область пониженного потенциала для неосновных носителей — положительных зарядов (дырок). Эти носители, попадая в указанную зону, концентрируются у границы диэлектрика, образуя локализованный заряд.

Изменяя амплитуду отрицательных импульсов на соседних электродах, можно создавать градиент потенциалов. Более глубокие зоны пониженного потенциала становятся «ловушками», вызывая направленное перемещение зарядовых пакетов вдоль поверхности. Последовательная активация электродов управляющими сигналами позволяет как фиксировать заряды в конкретных участках, так и осуществлять их транспортировку между элементами структуры. Инициирование зарядовых пакетов реализуется через инжекцию из p-n-перехода (например, возле крайнего элемента) или посредством фотоэлектрического эффекта, тогда как их детектирование выполняется аналогичным переходом на выходной стороне системы.

Ключевой особенностью ПЗС является временное ограничение хранения информации. Термическая генерация пар носителей в объёме полупроводника и на межфазных границах приводит к постепенному накоплению фонового заряда, искажающего исходные данные. Период сохранения информации, хотя и достигает десятков секунд, конечен, что определяет требование к минимальной частоте обновления сигнала. Данный механизм функционирования основан на переходных процессах в МДП-структурах, что относит ПЗС к динамическим устройствам с циклическим характером работы.

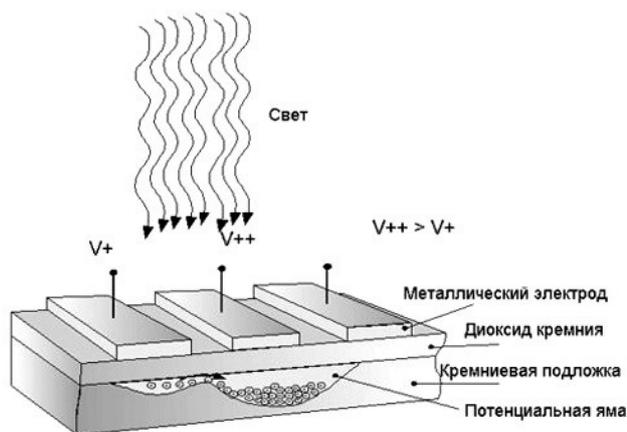


Рисунок 3 – Конструкция ПЗС-элемента

Устройство и физика работы приборов с зарядовой связью

ПЗС-технология использует электрофизические особенности полупроводников. Инжекция заряда осуществляется через p-n переход или путём генерации носителей под действием света.

p-n переход — граница между зонами полупроводника с противоположными типами проводимости: p-типом (дырочная проводимость) и n-типом (электронная проводимость). Эта область обеспечивает управление движением зарядов, необходимое для работы ПЗС-элементов.

Для модификации электронных свойств кремния применяются методы легирования — диффузия и ионная имплантация. При введении атома с пятью валентными электронами (например, фосфора) в кристаллическую решётку один электрон остаётся слабо связанным с ядром. Под действием внешнего поля этот электрон легко отрывается, становясь подвижным носителем заряда. Такой материал, обогащённый свободными электронами, классифицируется как полупроводник n-типа, а добавленная примесь именуется донорной.

Для создания полупроводника р-типа в кремний внедряют трёхвалентные атомы (например, бор). Недостаток электрона в одной из связей формирует локальную область с положительным зарядом — дырку. Хотя проводимость здесь обусловлена перемещением электронов между дырками, энергетический барьер для их движения выше, чем в n-типе, что снижает общую проводимость. Увеличение концентрации примесей в обоих случаях уменьшает сопротивление, приближая материал к проводниковым свойствам.

При контакте областей n- и р-типа в едином кристалле возникает диффузия носителей: электроны из n-зоны мигрируют в р-зону, а дырки — в обратном направлении. Этот процесс приводит к появлению на границе неподвижных ионов — положительных в n-области и отрицательных в р-области. Формируется запирающий слой, препятствующий дальнейшему перемещению носителей и устанавливающий электрическое равновесие.

При подключении к р-области отрицательного полюса источника, а к n-области — положительного, внешнее поле усиливает запирающий слой, оттягивая электроны и дырки к противоположным электродам. Ток через переход практически отсутствует.

При прямом смещении (р-зону к «+», n-зону к «-») внешнее поле преодолевает барьер, направляя электроны и дырки к переходу. Носители рекомбинируют, а новые электроны поступают из источника, замыкая цепь. Это обеспечивает устойчивый ток, пропорциональный приложенному напряжению.

Принцип переноса зарядов между МДП-структурами

Простейшие ПЗС-матрицы используют поверхностный канал переноса, где электроды расположены на изолирующем слое однородного р-кремния. В такой конструкции накопление и перенос заряда происходят в приповерхностном слое, что приводит к существенным ограничениям: дефекты поверхности вызывают захват и медленное высвобождение зарядов (размазывание изображения), а также спонтанную эмиссию электронов (рост темнового тока). Эти фундаментальные недостатки удалось преодолеть в ПЗС с объёмным каналом, где под оксидным слоем формируется тонкая n-область, смещающая зону переноса зарядов вглубь кристалла. Аналогичный принцип применяется в выходных усилителях — переход на объёмный канал позволил значительно снизить шумы и улучшить общие характеристики устройства. Принцип переноса зарядов между МДП-структурами приведён на рисунке 5.

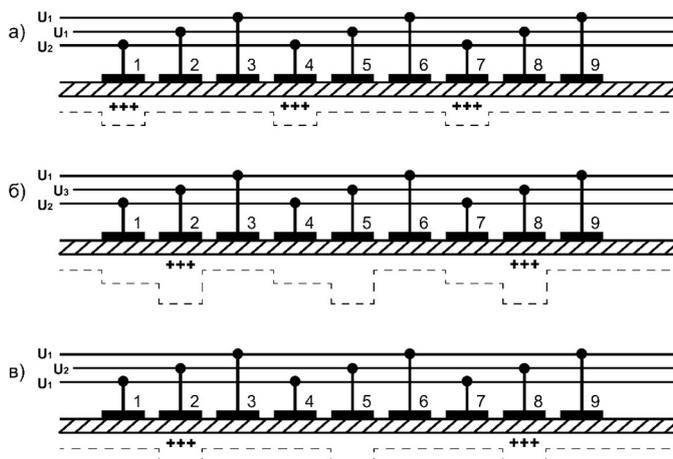


Рисунок 5 – Принцип переноса зарядов между МДП-структурами ПЗС

Существуют два основных типа переноса заряда. В архитектуре полнокадрового переноса (Full-Frame Transfer) вся площадь ПЗС-матрицы используется одновременно для накопления света и хранения зарядов. После экспонирования весь массив зарядов быстро сдвигается в закрытую от света область хранения, откуда построчно передаётся в выходной регистр. Такой подход обеспечивает 100% заполнение пикселей светочувствительными элементами, что даёт максимальную эффективность использования площади и высокую светочувствительность. Однако система требует механического затвора для блокировки света во время переноса данных и имеет ограниченную скорость считывания, что делает FT-матрицы идеальными для научных и астрономических применений, где приоритетны качество изображения и точность, а не быстродействие.

Архитектура построчного переноса (Interline Transfer) использует чередование светочувствительных пикселей с вертикальными буферными регистрами, экранированными от света (Рис. 6). Это позволяет мгновенно переносить заряды из фотоактивной области в соседние буферные столбцы, после чего начинается новое накопление света без необходимости в механическом затворе. Хотя такая конструкция уменьшает полезную площадь пикселя (примерно на 30-50%), она обеспечивает

высокую скорость считывания и возможность непрерывной съёмки, что критично для видео и серийной фотосъёмки. IT-матрицы доминируют в потребительской электронике благодаря компромиссу между скоростью и чувствительностью.

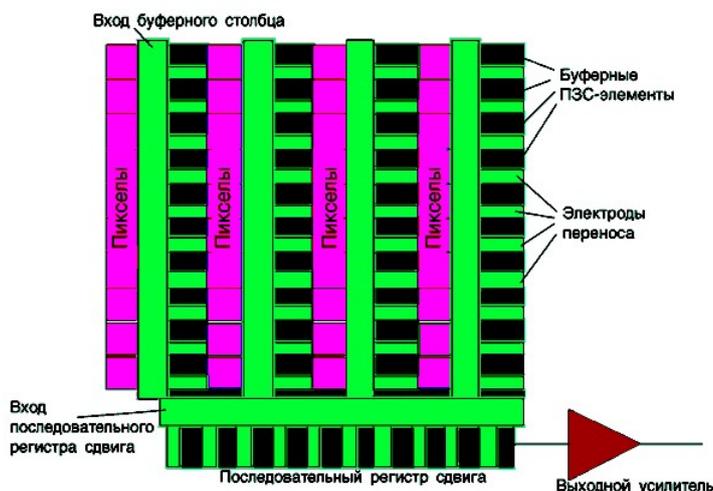


Рисунок 6 – Матрица с буферизацией столбцов

Для ускорения обработки в крупноформатных матрицах применяется параллельный перенос зарядов, при котором целые строки одновременно смещаются к выходу. Это достигается за счёт создания разности потенциалов между строками, а не отдельными элементами, что значительно сокращает время считывания. Такой подход позволяет эффективно преобразовывать двумерное распределение зарядов в аналоговый сигнал без потери производительности.

При каждом переносе зарядов изображение постепенно искажается из-за изменений в выходном сигнале. Чтобы минимизировать этот эффект, используется затвор, который блокирует попадание света на матрицу во время считывания, предотвращая возникновение фотоэффекта. Однако пока затвор закрыт, свет не попадает на полупроводник, новые заряды не формируются, и следующее изображение нельзя получить до завершения считывания. Эту проблему решили, добавив рядом с каждым столбцом матрицы дополнительный столбец ПЗС-элементов, экранированный от излучения. После формирования заряды перемещаются в эти защищённые элементы, где на них больше не влияет свет, а основные элементы остаются свободными для записи нового изображения.

Преимущества ПЗС-матриц:

- Практически 100% использование светочувствительной поверхности – минимальные потери площади на структурные элементы.
- Крайне малое количество мёртвых зон между пикселями – высокая эффективность сбора света.
- Простота конфигурации и регулярность структуры – одинаковые ячейки, предсказуемое поведение.
- Относительная простота производства – по сравнению с современными КМОП-матрицами.
- Минимальный уровень шумов – особенно при низкой освещённости (низкий темновой ток).
- Высокая однородность изображения – мало различий между пикселями.

Недостатки ПЗС-матриц:

- Низкая скорость считывания – из-за последовательного переноса зарядов.
- Высокое энергопотребление – требует сложных схем управления.
- Дорогое производство – особенно для крупноформатных матриц.
- Необходимость механического затвора (в FT-архитектуре) – ограничивает скоростную съёмку.

Сравнение КМОП и ПЗС

КМОП-сенсоры (комплементарные металл-оксид-полупроводниковые матрицы) — это технология, лежащая в основе большинства современных устройств цифровой визуализации. С момента своего появления ПЗС-матрицы совершили революцию в цифровой визуализации, став основой для астрономических наблюдений, научных исследований и профессиональной фотографии. Однако с развитием КМОП-технологий на рынке произошёл заметный сдвиг — современные смартфоны и камеры теперь почти исключительно используют КМОП-сенсоры.

Главное отличие КМОП-технологии заключается в интеграции усилителей и аналого-цифровых преобразователей непосредственно в структуру каждого пикселя. В отличие от ПЗС, где заряд последовательно переносится к единому усилителю, КМОП-матрицы позволяют параллельное считывание отдельных участков изображения. Такая архитектура обеспечивает принципиально иной подход к обработке сигнала — каждый пиксель содержит собственный транзисторный усилитель, что устраняет необходимость сложных схем переноса заряда. Технологически это достигается за счёт стандартных КМОП-процессов, используемых в производстве микропроцессоров, что делает изготовление таких матриц более универсальным и масштабируемым.

Широкое распространение КМОП-матриц в смартфонах и цифровых камерах обусловлено их принципиальными эксплуатационными преимуществами. Они потребляют значительно меньше энергии, что критически важно для мобильных устройств, и позволяют реализовать более высокие скорости съёмки — до тысяч кадров в секунду. Возможность произвольного считывания отдельных областей изображения открывает новые функциональные возможности, такие как быстрый автофокус и HDR-съёмка без механического затвора. Кроме того, себестоимость производства КМОП-матриц существенно ниже благодаря совместимости с массовыми полупроводниковыми технологиями.

Современное развитие гибридных КМОП-сенсоров постепенно сокращает разрыв в ключевых параметрах, однако ПЗС сохраняют нишевое превосходство в задачах, где важна абсолютная точность измерений. Интересно, что некоторые новейшие КМОП-матрицы теперь заимствуют принципы архитектуры ПЗС, что свидетельствует о взаимном обогащении этих технологий. Тем не менее, для массового потребителя преимущества КМОП остаются неоспоримыми, в то время как научное сообщество продолжает совершенствовать ПЗС для экстремальных условий работы.

Применение ПЗС-технологий

В астрономических исследованиях ПЗС-детекторы обеспечивают беспрецедентную точность фотометрических измерений. Их способность регистрировать до 95% падающих фотонов при минимальном темновом токе делает их незаменимыми для наблюдений слабых астрономических объектов. Особое значение имеет свойство линейного отклика в широком динамическом диапазоне, что позволяет точно измерять интенсивность излучения как от ярких, так и от слабых источников. Именно эти характеристики обусловили применение ПЗС в большинстве профессиональных астрономических инструментов, включая орбитальные телескопы.

В медицинской диагностике ПЗС-технологии находят применение в рентгеновской визуализации и эндоскопическом оборудовании. Высокая однородность отклика пикселей и стабильность характеристик во времени обеспечивают точность количественных измерений, необходимую для диагностических процедур. В цифровой рентгенографии ПЗС-детекторы позволяют снизить дозовую нагрузку на пациента при сохранении высокого качества изображения. Эндоскопические системы с ПЗС-матрицами обеспечивают разрешение, необходимое для проведения малоинвазивных хирургических вмешательств.

Несмотря на конкуренцию с современными КМОП-технологиями, ПЗС-матрицы продолжают оставаться востребованными в науке, промышленности и специализированных областях. Их производством занимаются как мировые гиганты вроде Sony, Samsung и Philips, так и российские предприятия, например, питерская компания «Силар», сохраняющая традиции разработки высококачественных сенсоров. Уникальные характеристики ПЗС — превосходная чувствительность, стабильность и точность — делают их незаменимыми там, где важна каждая частица света, будь то астрономические наблюдения, медицинская диагностика или прецизионные промышленные системы.

Список использованных источников:

1. Носов, Ю.Р. *Приборы зарядовой связи*. М.: Знание, 1989.
2. Ривкин, Я.Я., Енеибарян, В.В. *Приборы с зарядовой связью: Физика и применение*. М.: Издательство МГУ, 1988.
3. П. Йесперса, Ф. Ван де Виле, М. Уайта, Р. А. Суриса. *Полупроводниковые формирователи сигналов изображения*. — М.: Мир, 1979.
4. Воробьев, С.И., Дороднов, В.А., Шиманский, А.П. *Приборы с зарядовой связью*. М.: Наука, 1982.
5. Ю.Р. Носов, В.А. Шилин. *Основы физики приборов с зарядовой связью*. — М.: Наука, 1986.
6. Носов, Ю.Р., Шилин, В.А. *Полупроводниковые приборы с зарядовой связью*. М.: Сов. радио, 1976.-141с.
7. Носов Ю.Р., Шилин В. А. *Основы физики приборов с зарядовой связью*. М.: Наука, 1986.-319с.
8. М. Хоувза, Д. Моргана. *Приборы с зарядовой связью*. — М.: Энергоиздат, 1981.

PHYSICAL PRINCIPLES OF RECORDING AND READING ON A CCD MATRIX

Kovalevsky Y. N.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Grigoriev A.A. – PhD in Physics and Mathematics

Abstract. The paper elucidates the operating principles of CCD matrices — silicon sensors that convert light into electrical signals via a system of MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) structures and potential wells. The charge transfer mechanism, key characteristics, advantages, and limitations are described. Applications in digital cameras, medical imaging, and security systems are discussed.

Keywords. CCD-matrix, CMOS matrix, charge-coupled device (CCD), MIS structures, physics of CCD operation, advantages of CCD-matrices, disadvantages of CCD-matrices, application areas and examples of CCD-matrices, p-n junction, full-frame transfer, interline transfer.