

## ЛК №3 Оптическая структуроскопия. Интроскопы.

### Преобразователи изображения.

С помощью оптических систем можно в ряде случаев исследовать структуру ОК. К приборам этой группы относятся: *интроскопы, полярископы, лазерные и обычные нефелометры, приборы голографической структуроскопии (дисдрометры) и телевизионные структурные анализаторы (ТСЛ).*

### Интроскопы

*Интроскопы* (в дословном переводе – “заглядывающий внутрь”) весьма разнообразны по конструкции и областям применения. Интроскопы предназначены для визуализации внутренней структуры объектов, непрозрачных в видимой области спектра, но прозрачных в УФ(10 - 400 нм) (ультрафиолетовой) или ИК (0,74 -2000 мкм) (инфракрасной) областях спектра. Примером подобных задач может быть визуальный контроль структуры пластин кремния в микроэлектронике. Схема интроскопа показана на рис. 3.1. Она включает источник УФ или ИК излучения, оптическую систему фокусировки и спектральную фильтрацию излучения, а также преобразователь изображения.

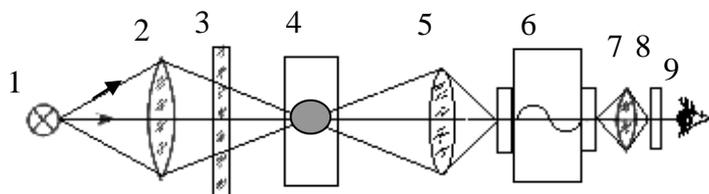


Рис. 3.1 Оптическая схема интроскопа

1- источник света, 2 - конденсор, 3 - ИК-фильтр, 4 - объект, 5 - объектив, 6 - преобразователь изображения, 7 - окуляр, 8 - сетка, 9 - наблюдатель.

Как видно из этого рисунка, все интроскопы объединяет то, что они, как правило, работают в ИК-области спектра. Существуют и УФ-интроскопы. По сути это ИК - микроскопы, телевизионные проекторы или полярископы.

Область, в которой работают интроскопы, вносит особенности в их оптические системы.

Оптические системы интроскопов используют для формирования и фокусировки излучения. Применяют линзовые, зеркальные и комбинированные системы. Наиболее просты *зеркальные*. Для них характерны широкий спектральный диапазон (0,1 —1000 мкм), сравнительная простота изготовления, невысокая стоимость материалов подложек зеркал. Однако они плохо работают при больших углах поля зрения, чувствительны к деформациям и вибрациям.

*Линзовые* системы сложнее и дороже, но обладают лучшими изобразительными характеристиками, особенно при значительных углах поля зрения. Спектр их пропускания определяется свойствами материалов, из которых они изготовлены. Наиболее часто используют кристаллы фтористого бария, фтористого лития, фтористого кальция, полупроводники германий и кремний, а также некоторые искусственные материалы — сапфир, плавленый кварц, полимеры, оптическую керамику. Разработаны материалы и для получения волоконных световодов, работающих в УФ- и ИК-областях спектра. Все перечисленные выше материалы можно использовать для фильтрации излучения в качестве абсорбционных фильтров. Применяют также фильтры других типов — интерференционные, рассеивающие, отражательные.

Основная часть интроскопа – *преобразователь изображения* (ПИ)-устройство, преобразовывающее ИК (УФ) оптическое изображение в видимое. Преобразователи изображения делят на две большие группы: *несканирующие* и *сканирующие*. Из несканирующих преобразователей наибольшее применение находят *электронно-*

оптические преобразователи (ЭОП), специальные фотоматериалы, эвапорографы, электролюминесцентные преобразователи (ЭЛПИ), жидкие кристаллы, преобразователи с краевым поглощением (эджеограф), люминофорные экраны и магнитооптические фотоматериалы.

### Электронно-оптические преобразователи

Действие ЭОП (Рис. 3.2) основано на явлении внешнего фотоэффекта. ЭОП

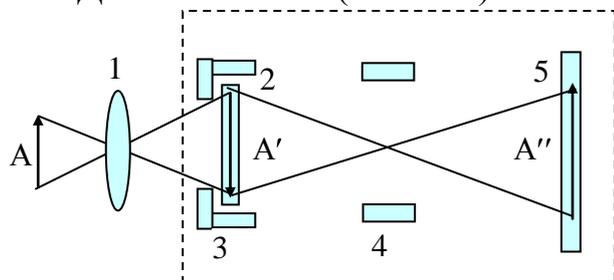


Рис. 3.2 Схема простейшего ЭОП

1 - оптическая линза, 2 - фотокаатод, 3 - ускоряющий электрод, 4 - электронная линза, 5 - флуоресцирующий экран, А - невидимое, А' - электронное, А'' - видимое изображения.

представляет собой стеклянный цилиндрический корпус, внутри которого создается высокий вакуум. На внутренней поверхности торцов корпуса наносят фотокатод и катодлюминофор (флуоресцирующий экран). Между катодом и слоем люминофора создают потенциал (15–40 кВ). На фотокатод проецируют изображение, при этом за счет фотоэлектронной эмиссии возникает электронное изображение, плотность электронов в котором соответствует распределению яркости в исходном оптическом изображении. С помощью электрического поля электроны ускоряются и системой электростатических или магнитных линз фокусируются на слое люминофора, вызывая его свечение. Изображение на люминесцентном экране наблюдается визуально или регистрируется с помощью обычных средств (фотосъемка и т.д.).

ЭОП применяют в области спектра 0,2—1,2 мкм. Для них характерны высокая временная (до  $10^{-12}$  с) и пространственная (до  $50 \text{ мм}^{-1}$ ) разрешающая способность, большая энергетическая чувствительность. Диаметр экранов ЭОП 10—100 мм. Существуют каскадные ЭОП, состоящие из нескольких последовательно соединенных блоков. Они позволяют усиливать яркость исходного изображения в  $10^6$  раз. В последнее время фотокатоды и экраны ЭОП наносят на специальные волоконно-оптические шайбы, герметично соединенные с его корпусом, что значительно повышает его эффективность.

ЭОП с микроканальными усилителями (МКУ) отличаются тем, что между катодом и экраном в вакуумном пространстве помещается диск, состоящий из миллионов стеклянных капилляров диаметром около 20 мкм и длиной 1—30 мм. Их внутренняя поверхность покрыта слоем вещества с высоким коэффициентом вторичной эмиссии, что позволяет усиливать первичное электронное изображение в  $10^3$ — $10^5$  раз при существенно меньших, чем в обычных ЭОП, напряжениях и габаритах прибора.

ЭОП с микроканальными усилителями (МКУ) отличаются тем, что между катодом и экраном в вакуумном пространстве помещается диск, состоящий из миллионов стеклянных капилляров диаметром около 20 мкм и длиной 1—30 мм. Их внутренняя поверхность покрыта слоем вещества с высоким коэффициентом вторичной эмиссии, что позволяет усиливать первичное электронное изображение в  $10^3$ — $10^5$  раз при существенно меньших, чем в обычных ЭОП, напряжениях и габаритах прибора.

В ИК-области ЭОП используют с обычной стеклянной оптикой, в УФ-спектре применяют кварцевые линзы или зеркальные объективы. Инфракрасные фотоматериалы представляют собой специальные эмульсии, сенсibilизированные в ИК-области (до 1,2 мкм). ИК-фотоматериалы имеют высокое разрешение ( $50$ — $80 \text{ мм}^{-1}$ ), однако небольшую чувствительность (0,02-1). Хранить их рекомендуется в холодных камерах, так как при комнатной температуре они быстро теряют чувствительность.

Для устранения вуалирующего действия фонового теплового излучения предложен метод, позволяющий включать чувствительность фотослоя только на время экспонирования. Он основан на использовании полупроводниковых материалов, изменяющих свои фоторезистивные свойства под действием электрического поля.

В качестве *фоточувствительного материала* используют тонкие пластинки монокристаллического кремния, германия, сернистого свинца или арсенида галлия. Изображение получают непосредственно на поверхности полупроводника или на специальной токочувствительной пленке, находящейся с ней в контакте. Спектральная чувствительность подобных систем определяется чувствительностью материала полупроводникового слоя и может быть очень широкой. Для сернистого свинца она достигает 3,0 мкм. При этом чувствительность равна чувствительности обычных фотоэмульсий. Аппаратура сравнительно проста и может быть смонтирована, например, в виде компактной приставки к стандартному фотоаппарату.

### ***Некоторые виды несканирующих преобразователей***

Действие *люминофорных преобразователей* основано на эффекте теплового тушения свечения люминофора, возбуждаемого УФ-излучением. Под действием ИК лучей происходит либо резкое повышение интенсивности люминесценции (вспышка), либо ослабление (тушение). Аналогичное действие оказывают ИК лучи на фотопроводимость. Появление вспышки или тушения люминесценции зависит от того, действуют ли ИК лучи на люминофор в момент его возбуждения или во время затухания люминесценции, а также от температуры и состава люминофора. При одновременном действии возбуждающего света и ИК лучей на цинксульфидные люминофоры при комнатной температуре имеет место только эффект тушения люминесценции.

Явления вспышки люминесценции при действии ИК лучей объясняется тем, что под действием ИК лучей электроны, находящиеся на ловушках, могут перейти в зону проводимости и затем рекомбинировать с центрами люминесценции. Тушение люминесценции происходит тогда, когда энергия ИК лучей оказывается достаточной для переноса электрона из валентной зоны на уровни ионизированных активаторов. Это приводит к уничтожению положительного заряда на уровнях активатора и, следовательно, к уменьшению числа переходов, сопровождающихся излучением света. Дырки, образовавшиеся в валентной зоне, могут перемещаться в ней и переходить на уровни активатора.

Разработанные приборы (*радиовизоры*) имеют широкую спектральную чувствительность (до 1000 мкм), инерционность 0,1 - 1 с, разрешающую способность до  $10 \text{ мм}^{-1}$  и минимальную регистрируемую облученность порядка  $10^{-2} - 10^{-3} \text{ Вт/см}^2$ . Их применяют при визуальном контроле распределения энергии в пучках мощных лазеров и в случаях, когда чувствительность не является определяющим свойством ПИ.

Работа *эджеографа* основана на изменении прозрачности пленок некоторых полупроводников в монохроматическом свете с определенной длиной волны в зависимости от температуры. ПИ с пленкой из аморфного селена имеет, например, разрешение  $4 \text{ мм}^{-1}$ , инерционность 0,5 с. Его чувствительность достаточна для получения изображения с температурой на 10—15°C выше комнатной.

Действие жидкокристаллического преобразователя основано на свойстве жидких кристаллов резко изменять свои оптические свойства (например, цвет) при повышении температуры. Жидкие кристаллы представляют собой такое агрегатное состояние вещества, при котором вещество сохраняет физические свойства твердых кристаллов (упорядоченность в расположении молекул, анизотропию) и одновременно обладает свойством жидкости - текучестью. Жидкие кристаллы принято делить на три группы: нематические, холестерические, смектические. Жидкие кристаллы, входящие в каждую из групп, различаются физическими, и, прежде всего, оптическими, свойствами.

Пленку такого вещества (обычно жидкого кристалла холестерического типа) наносят на тонкую мембрану, покрытую неселективно поглощающим ИК-лучи слоем. Создающие изображение объекта ИК-лучи при поглощении в этом слое вызывают местные изменения температуры, пропорциональные интенсивности излучения соответствующих участков объекта, наблюдаемые визуально в виде цветных термографических изображений.

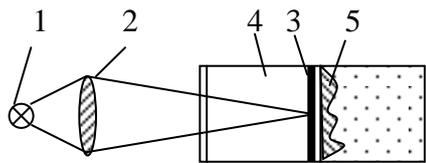


Рис. 3.3

Чувствительность таких преобразователей пока невелика. Разрешение порядка  $5 \text{ мм}^{-1}$ , инерционность 1—3 с. Спектральный диапазон очень широк.

На явлении интерференции лучей в тонком слое специального вещества при местном изменении его толщины за счет испарения под действием энергии ИК-лучей основано действие *эвапорографа*.

Эвапорограф - устройство, в котором получают изображение объектов испарением некоторых веществ за счет энергии облучения объекта, обычно в ИК области спектра (рис. 3.3). Изображение объекта 1 создается ИК объективом 2 на тонкой мембране 3, находящейся в вакуумной камере (кювете) 4 с прозрачным для ИК-лучей окном. На мембрану с одной стороны наносят поглощающий слой, а с другой — слой масла. На обратной стороне мембраны конденсируются пары жидкости, находящейся в этой части камеры (метод конденсации), или испаряется предварительно сконденсированный слой жидкости.

Скорости конденсации и испарения в каждой точке мембраны зависят от ее температуры, которая в свою очередь обусловлена ИК-излучением соответствующего участка объекта. При подсветке внешним источником света жидкостного рельефа 5, наблюдается его интерференционное цветное изображение, которое может быть сфотографировано.

Эвапорографы имеют спектральную чувствительность, определяемую используемым в приборе оптическим материалом. Обычно она равна 1 - 15 мкм. Разрешение прибора около  $10 \text{ мм}^{-1}$ , инерционность 1 - 10 с в зависимости от контрастности входного изображения и его интенсивности. Современные эвапорографы "чувствуют" различия в температуре деталей объекта  $\sim 1 \text{ К}$  при комнатной температуре, разность освещенностей в плоскости мембраны  $10^{-5} \text{ Вт/см}^2$ .

Работа *электролюминесцентных преобразователей* (ЭЛПИ) (рис. 3.4) основана на свойстве люминофоров, светящихся под действием электрического тока, изменять свою яркость при внешней засветке. Освещение какого-либо места фотопроводника приводит к перераспределению напряжения в пользу электролюминофора, и в этом месте он начинает светиться ярче. Таким образом, можно превратить невидимое изображение в видимое или усилить слабое видимое изображение.

Созданы ЭЛПИ из селенида кадмия с чувствительностью до  $10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup> в спектральном диапазоне до 2,5 мкм при разрешении 5—10 мм<sup>-1</sup> и инерционности 0,1—1 с. Важной особенностью ЭЛПИ является возможность управлять оптическими характеристиками получаемого при проектировании на него ИК (или УФ) изображения изменением его электрического режима. При этом можно усиливать яркость и контрастность изображения.

*Магнитооптические фотографические материалы* изготавливают в виде тонких пленок с полосовой доменной структурой. Излучение объекта, сфокусированное на пленку, вызывает ее нагрев и локальное изменение направления этой структуры. При освещении пленки внешним источником воспроизводится изображение объекта в видимых лучах за счет дифракции на элементах ее структуры. Подобные материалы неселективны, поскольку их действие основано на тепловых эффектах.

Разрешающая способность зависит от времени экспозиции и при длительности облучения  $10^{-6}$  с составляет 1000 мм<sup>-1</sup>. Магнитные пленки имеют невысокую чувствительность. Основная область их применения — регистрация импульсных процессов при сравнительно больших энергиях, например, изучение распределения интенсивности в пучках лазеров и т. п.

### **Сканирующие преобразователи изображения**

К сканирующим преобразователям изображения относятся электронно-лучевые вакуумные передающие телевизионные трубки различных типов: суперорбитрон, диссектор, видикон, ньювикон, уникон, трубка с диэлектрической (пироэлектрической) мишенью и термикон, кремникон, системы типа "бегущий луч", а также твердотельные аналоги передающих трубок и оптико-механические сканирующие системы различных типов.

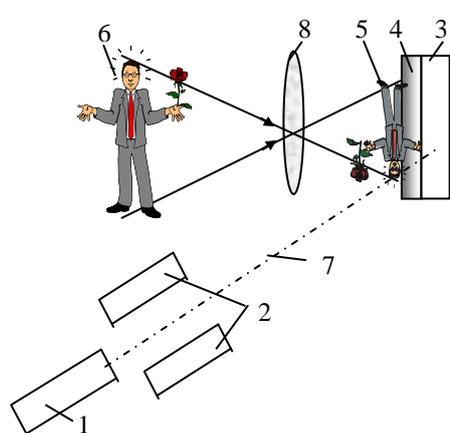


Рис. 3.5

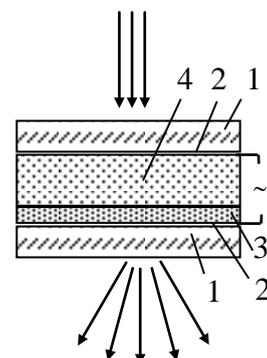


Рис. 3.4 - стекло, 2 - прозрачный проводящий слой, 3 - электролюминофор, 4 - слой фотопроводника.

трической) мишенью и термикон, кремникон, системы типа "бегущий луч", а также твердотельные аналоги передающих трубок и оптико-механические сканирующие системы различных типов.

Передающие телевизионные трубки (ПТТ) электронно-лучевые приборы для преобразования светового изображения в последовательность электрических сигналов. В основе работы всех ПТТ лежит внешний или внутренний фотоэффект. Все ПТТ (рис. 3.5) содержат электронный прожектор 1, отклоняющую систему 2 и мишень 3 с фоточув-

ствительный слой 4, на который проецируется оптическое изображение 5 передаваемого объекта 6. Свет, проецируемый на люминофорный слой трубки, вызывает вырывание электронов из кристаллической решетки люминофора. Число вырванных электронов пропорционально освещенности, и таким образом формируется потенциальный рельеф изображения. Чем больше фотонов попало в данное место мишени, тем ниже ее сопротивление в данном месте.

Работа всех ПТТ основывается на принципе сканирования электронным лучом 7 мишени внутри трубки. Объектив 8 проецирует круглое по форме изображение, но лучом сканируется только прямоугольник 4:3. Сканирование осуществляется при помощи электромагнитного поля. Когда анализирующий электронный луч сканирует фоточувствительный слой, он нейтрализует накопленные положительные заряды, так что по локальным сопротивлениям протекает ток. Заряды компенсируются ("считываются") пучком, после чего начинается новый цикл накопления зарядов. Когда электронный луч попадает в конкретную часть потенциального рельефа, электрический ток теряет заряд пропорционально количеству света, ранее попавшему в данное место мишени. Этот слабый ток ( $\sim 1$  пА) подается на видеоусилитель с очень высоким входным сопротивлением, который и формирует напряжение видеосигнала. Далее при помощи электронной системы добавляются синхроимпульсы и получается полный видеосигнал, называемый композитным.

Существует большое количество различных ПТТ.

*Суперортиконы* относятся к наиболее чувствительным трубкам. Их спектральная чувствительность ограничена областью длин волн при которых возможен внешний фотоэффект (0,25— 1,2 мкм). Суперортиконы сравнительно малоинерционны, их разрешающая способность может достигать  $20 \text{ мм}^{-1}$  и более. Недостатком их является сложность конструкции как самой трубки, так и передающей камеры и связанные с этим трудности настройки при их эксплуатации.

*Диссекторы*— трубки, действие которых основано на внешнем фотоэффекте. Они обладают сравнительно невысокой чувствительностью и пониженным разрешением (около  $10 \text{ мм}^{-1}$ ). Их преимуществами являются отсутствие термокатода и вследствие этого высокая надежность. Диссекторы обладают большим динамическим диапазоном (до  $10^3$ ), быстродействием (до  $10^3$  кадр/с), линейностью световой характеристики. Основная область их применения – автоматические системы контроля непрерывного действия.

Действие *видикона* основано на внутреннем фотоэффекте, поэтому область спектральной чувствительности определяется границами его проявления. Современные видиконы могут работать в диапазоне 0,1—2,5 мкм (при охлаждении до 4,5 мкм). Видиконы имеют разрешение 12— 15  $\text{мм}^{-1}$ . Для них характерна большая инерционность, что мешает наблюдать быстропротекающие процессы. Созданы трубки, способные запомнить видеосигнал на длительное время, что в ряде случаев является необходимым, например, при контроле импульсных процессов. Световая характеристика видикона нелинейна, а его динамический диапазон не превышает 40 дБ.

Однако все ПТТ имеют большие габаритные размеры, используют высокое (1 кВ) напряжение, имеют ограниченный срок службы люминофора, имеет место геометрическое искажение проецируемого изображения и т.д. Этих проблемы исключены в ПЗС.

### Приборы с зарядовой связью (ПЗС).

Перспективны *твердотельные многоэлементные ПИ* (фотодиодные матрицы ФДМ, линейки и матрицы ПЗС - приборов с зарядовой связью). Современная технология микроэлектронной техники позволяет создавать многоэлементные фотоприемники. Такие матрицы фотоприемников при сравнительно небольших размерах (несколько десятков миллиметров) могут содержать несколько десятков и даже тысяч элементов. Многоэлементные фотоприемники позволяют создавать полный зрительный образ, поскольку они реагируют не только на яркостные, но и на пространственные характеристики объекта.

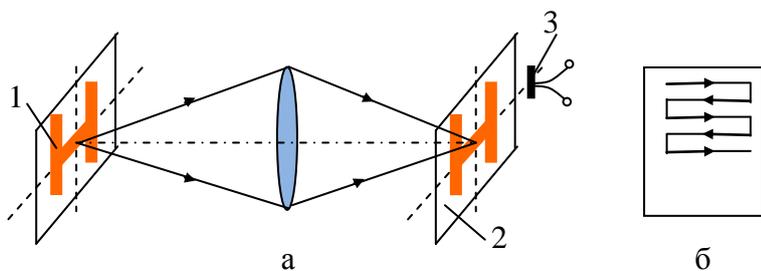


Рис. 3.6

ПЗС), широкий спектр чувствительности (0,3—1,5 мкм), быстродействие (до  $10^{-6}$  с на элемент для ФДМ и  $10^{-4}$  с для ПЗС), возможность применения нестандартных типов разверток и малокадровых режимов работы с накоплением информации.

Рассмотрим принцип работы многоэлементных фотоприемников.

Допустим, объект 1 представляет собой светящийся предмет в виде буквы Н (рис. 3.6а). Пусть оптическая система воспроизводит его в плоскости изображений 2. Проанализировать это изображение можно, произведя его последовательный просмотр (поэлементное разложение) с помощью фотоприемника (ФП) 3 малых размеров. Для этого фотоприемник нужно перемещать вначале по верхней, первой строке, затем по второй и т.д. Траектория перемещения ФП показана на рис. 3.6б. Просканировав (просмотрев) все изображение, получим последовательность электрических сигналов, в которой закодирован образ предмета. Для анализа изображения таким способом понадобится большое время.

Проанализировать изображение можно значительно быстрее, если в плоскости 1 расположить мозаичный приемник оптического излучения с большим числом элементарных фоточувствительных ячеек. В этом случае оптическая система преобразует распределение яркости объекта в распределение освещенности на поверхности матричного элемента. Здесь световая энергия преобразуется в электрическую, причем отклик каждого элемента (ток, заряд или напряжение) будет пропорционален его освещенности. Если далее с помощью специальной опросной системы (электронной системы сканирования) произвести последовательный опрос каждого элемента и считывание содержащейся в нем информации, то на выходе устройства мы получим последовательность электрических сигналов, в которой закодирован воспринимаемый образ предмета.

Фотоприемные матрицы могут быть построены на основе большого числа фоторезистивных, фотодиодных и фототранзисторных элементов. Они могут использоваться как твердотельные аналоги вакуумных передающих телевизионных трубок.

Весьма перспективны матричные формирователи сигналов изображений на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) (рис. 3.7), представляющие собой матрицу 1, которая выполнена на полупроводниковой подложке  $n$ - или  $p$ -типа (слой кремния  $p$ -типа на рисунке) нанесением металлических электродов (алюминий) 2 с изоляцией от полупроводника тонким слоем диэлектрика (0,1 - 0,2 мкм двуокиси кремния) 3. Размеры электродов несколько мкм, расстояние между ними – 1 мкм.

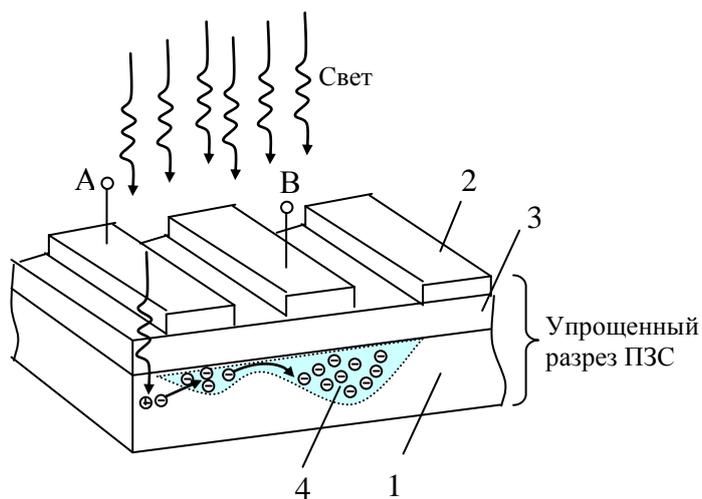


Рис. 3.7

При подаче на электрод напряжения в слое полупроводника под этим электродом уменьшается число основных носителей заряда. Образуется так называемая потенциальная яма 4, способная накапливать вблизи границы раздела диэлектрика и полупроводника неосновные носители заряда, возникающие при освещении пропорционально яркости оптического сигнала.

Линейка ПЗС переводит распределение освещенности в строке изображения в так называемые зарядовые пакеты носителей, а также хранит зарядовую информацию.

Вывод зарядов из линейки и преобразование в видеосигнал осуществляется через обратно смещенный  $p$ - $n$  переход путем подачи специально сформированной последовательности импульсов напряжений на электроды. При некотором соотношении потенциалов соседних ячеек ( $+U_A > +U_B$ ) можно обеспечить перетекание накопленных зарядов в определенном направлении. Если под одним из электродов (А) сформирован пакет из электронов, то при  $+U_A > +U_B$  произойдет перетекание пакета под электрод В. Последовательная подача напряжения с уменьшающейся амплитудой приводит к сдвигу пакета вдоль линейки. Таким образом, перемещая заряды, можно считывать последовательно сигналы всех ячеек прибора.

Отличительной особенностью формирователей сигнала на основе ПЗС является высокая разрешающая способность - сотни линий на миллиметр. Например, 50 линий на миллиметр – означает, что формирователи могут "различить" две линии на поверхности изображения, расположенные на расстоянии 20 мкм друг от друга. Средняя толщина человеческого волоса 50 мкм.

При использовании ФЗС в ИК - области спектра на электроды подается напряжение такой полярности, которая вызовет приток основных носителей из объема полупроводника к поверхности. Для подложек используется примесный кремний. В этом случае положение максимума поглощаемого в подложке излучения определяет примесь. Например, максимум чувствительности кремния, легированного индием, соответствует 5 мкм, а при легировании германием достигает 15 мкм.

ЛОМО выпускает интроскоп, выполненный на базе серийного стереомикроскопа на окулярах которого установлены миниатюрные ЭОП (чувствительные к излучению с длинами волн до 1,3 мкм), а также телевизионные ИК-микроскопы на ос-

нове ИК-видикона, чувствительного в диапазоне длин волн до 8 - 10 мкм. При этом эффективно использование лазеров на окиси углерода ( $\lambda = 5$  мкм),  $\text{CO}_2$  - ( $\lambda = 10,6$  мкм). В этом диапазоне прозрачны германий, многие другие кристаллы, полимеры, композиты.

### КМОП-матрицы (CMOS)

С [2008 года](#) альтернативой ПЗС стали КМОП-матрицы.

КМОП – комплементарная логика на транзисторах – металл оксид полупроводник. (CMOS –complementary symmetry/ metal/oxide/semiconductor)

Используются полевые транзисторы с изолированным затвором с каналами разной проводимости.

В процессе экспозиции происходит накопление заряда фотодиодом. В процессе считывания выборка значения напряжения на конденсаторе.

В конце [1960-х гг.](#) многие исследователи отмечали, что структуры КМОП (CMOS) обладают чувствительностью к свету. Однако [приборы с зарядовой связью](#) обеспечивали настолько более высокую светочувствительность и качество изображения, что матрицы на КМОП технологии не получили сколько-нибудь заметного развития. В начале [1990-х](#) характеристики КМОП-матриц, а также технология производства были значительно улучшены. Прогресс в субмикронной [фотоли-тографии](#) позволил применять в КМОП-сенсорах более тонкие соединения. Это привело к увеличению светочувствительности за счет большего процента облучаемой площади матрицы.

Переворот в технологии КМОП-сенсоров произошел, когда в [лаборатории реактивного движения \(Jet Propulsion Laboratory — JPL\) NASA](#) успешно реализовали Active Pixel Sensors (APS). Теоретические исследования были выполнены еще несколько десятков лет тому назад, но практическое использование активного сенсора отодвинулось до [1993 года](#). APS добавляет к каждому пикселу транзисторный усилитель для считывания, что даёт возможность преобразовывать заряд в напряжение прямо в пикселе. Это обеспечило также произвольный доступ к фотодетекторам наподобие реализованного в микросхемах [ОЗУ](#). В [2011](#) году на форуме MWC в Барселоне компания [Samsung](#) продемонстрировала КМОП-сенсоры нового типа, которые ориентированы на применение в смартфонах.

#### Преимущества

- Основное преимущество [КМОП](#) технологии — низкое энергопотребление в статическом состоянии. Это позволяет применять такие матрицы в составе энерго-независимых устройств, например, в датчиках движения и системах наблюдения, находящихся большую часть времени в режиме «сна» или «ожидания события».

- Важным преимуществом КМОП матрицы является единство технологии с остальными, цифровыми элементами аппаратуры. Это приводит к возможности объединения на одном кристалле аналоговой, цифровой и обрабатывающей части. (КМОП-технология, являясь в первую очередь процессорной технологией, подразумевает не только «захват» света, но и процесс преобразования, обработки, очистки сигналов не только собственно-захваченных, но и сторонних компонентов РЭА), что послужило основой для миниатюризации камер для самого разного оборудования и снижения их стоимости ввиду отказа от дополнительных процессорных микросхем.

- С помощью механизма произвольного доступа можно выполнять считывание выбранных групп пикселов. Данная операция получила название кадрированного считывания ([англ. windowing readout](#)). Кадрирование позволяет уменьшить размер захваченного изображения и потенциально увеличить скорость считывания по сравнению с ПЗС-сенсорами, поскольку в последних для дальнейшей обработки необходимо выгрузить всю информацию. Появляется возможность применять одну и ту же матрицу в принципиально различных режимах. В частности, быстро считывая только малую часть пикселей, можно

обеспечить качественный режим живого просмотра изображения на встроенном в аппарат экране с относительно малым числом пикселей. Можно отсканировать только часть кадра и применить её для отображения на весь экран. Тем самым получить возможность качественной ручной фокусировки. Есть возможность вести репортажную скоростную съёмку с меньшим размером кадра и разрешением.

- В дополнение к усилителю внутри пиксела, усилительные схемы могут быть размещены в любом месте по цепи прохождения сигнала. Это позволяет создавать усилительные каскады и повышать чувствительность в условиях плохого освещения. Возможность изменения коэффициента усиления для каждого цвета улучшает, в частности, [балансировку белого](#).

- Дешевизна производства в сравнении с ПЗС-матрицами, особенно при больших размерах матриц.

- Наличие на матрице большого по сравнению с фотодиодом объёма электронных элементов создаёт дополнительный нагрев устройства в процессе считывания и приводит к возрастанию теплового шума.

#### Недостатки

- Фотодиод ячейки занимает существенно меньшую площадь элемента матрицы, по сравнению с [ПЗС матрицей с полнокадровым переносом](#). Поэтому ранние матрицы КМОП имели существенно более низкую светочувствительность, чем ПЗС. Но в 2007 году компания [Sony](#) выпустила на рынок новую линейку видео- и фотокамер с КМОП-матрицами нового поколения с технологией EXMOR, которая ранее применялась только для КМОП-матриц в специфических оптических устройствах таких как электронные [телескопы](#). В этих матрицах электронная «обвязка» пиксела, препятствующая продвижению [фотонов](#) на светочувствительный элемент, была перемещена из верхнего в нижний слой матрицы, что позволило увеличить как физический размер пиксела при тех же геометрических размерах матрицы, так и доступность элементов свету, что, соответственно, увеличило светочувствительность каждого пиксела и матрицы в целом. Матрицы КМОП впервые сравнились с ПЗС-матрицами по светочувствительности, но оказались более энергосберегающими и лишенными главного недостатка ПЗС-технологии — «боязни» точечного света. В 2009 году компания Sony улучшила КМОП-матрицы с технологией EXMOR применив к ним технологию «Backlight illumination» («освещение с задней стороны»). Идея технологии проста и полностью соответствует названию.

- Фотодиод ячейки матрицы имеет сравнительно малый размер, величина же получаемого выходного напряжения зависит не только от параметров самого фотодиода, но и от свойств каждого элемента пикселя. Таким образом, у каждого пикселя матрицы оказывается своя собственная [характеристическая кривая](#), и возникает проблема разброса [светочувствительности](#) и [коэффициента контраста](#) пикселей матрицы. В результате чего первые произведённые КМОП-матрицы имели сравнительно низкое разрешение и высокий уровень так называемого «структурного шума» ([англ. pattern noise](#)).

-