

## 1.22. ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

**Цель лекции:** ознакомление с основными полупроводниковыми фоточувствительными элементами.

### 1.22.1. ФОТОПРИЕМНИКИ

Фотодетекторы или фотоприемники — полупроводниковые приборы, регистрирующие оптическое излучение и преобразующие оптический сигнал на входе в электрический сигнал на выходе. Рассмотрим некоторые наиболее важные параметры фотоприемников.

Вольтовая чувствительность  $S_V$  показывает, насколько изменится напряжение  $\Delta U$  на выходе фотоприемника при единичном изменении мощности  $\Delta P$  падающего оптического излучения:

$$S_V = \frac{\Delta U}{\Delta P} \text{ [В/Вт]}.$$

Токовая чувствительность  $S_i$  показывает, насколько изменится ток  $\Delta I$  в цепи фотоприемника при единичном изменении мощности  $\Delta P$  падающего оптического излучения:

$$S_i = \frac{\Delta I}{\Delta P} \text{ [А/Вт]}.$$

Пороговая чувствительность — минимальная энергия оптического излучения  $P_m$ , которая вызовет на выходе фотоприемника сигнал, находящийся в заданном отношении  $m$  к шуму:

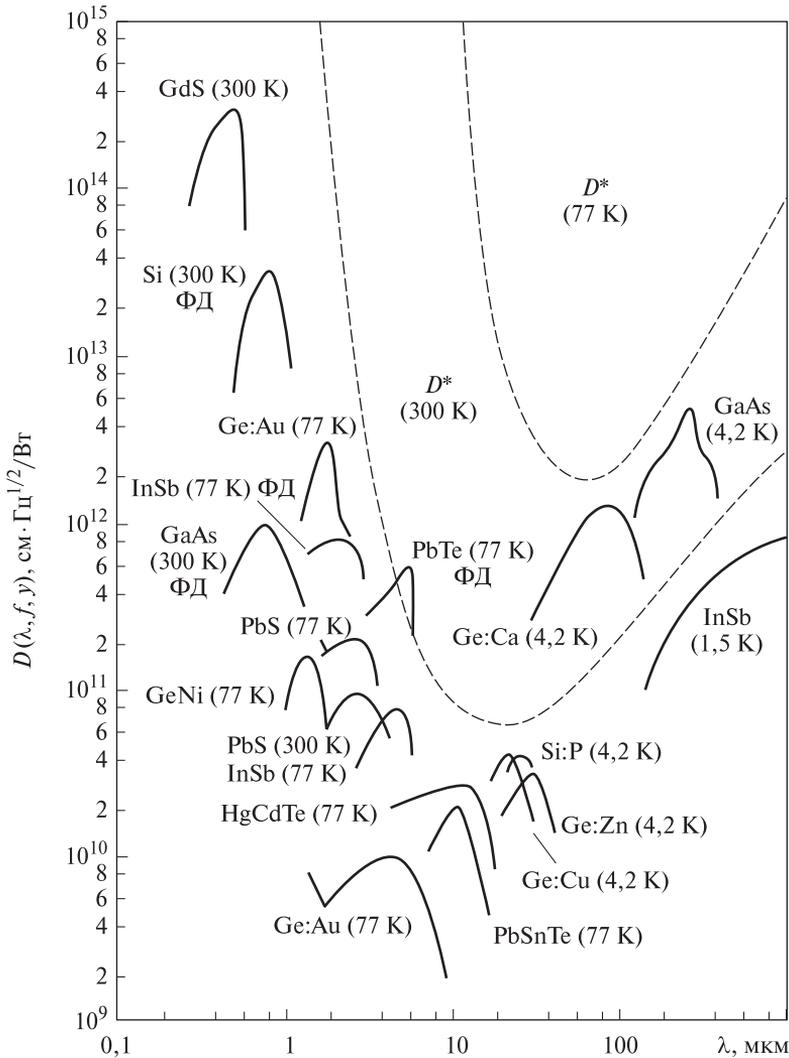
$$P_m = \frac{m\sqrt{\bar{U}_m^2}}{S_V};$$
$$m = \frac{\Delta U}{\sqrt{\bar{U}_m^2}} = \frac{P_m S_V}{\sqrt{\bar{U}_m^2}},$$

где  $\sqrt{\bar{U}_m^2}$  — среднеквадратичное значение шумового напряжения.

Величина, обратная пороговой чувствительности, называется обнаружительной способностью:

$$D = \frac{1}{P_m}.$$

Зависимость обнаружительной способности от длины волны излучения представлена на рис. 1.110. Видно, что обнаружительная способность значительно зависит от материала фотоприемника. У каждого типа полупроводника имеется своя граничная длина волны, зависящая от ширины запрещенной зоны. При длинах волн, больших граничной, энергии квантов света оказываются недостаточными для генерации электронно-дырочных пар, и в этом случае обнаружительная способность становится нулевой.



**Рис. 1.110.** Обнаружительная способность фотоприемников из различных материалов в зависимости от длины волны излучения ( $D$  — идеальная)

Граничная длина волны

$$\lambda_{\text{гр}} = \frac{1,22}{E_g} [\text{мкм}].$$

Значения длины волны для некоторых полупроводников приведены ниже.

Материал.....	SiC	GaP	GaAs	Si	Ge	InAs	InSb	KPT	CdHgTe
$E_g$ , эВ .....	3,0	2,26	1,42	1,12	0,66	0,36	0,17		0,10
$\lambda_{\text{гр}}$ , мкм.....	0,4	0,54	0,86	1,09	1,85	3,4	7,2		12,2

### 1.22.2. ФОТОРЕЗИСТОРЫ

Фоторезисторами называются полупроводниковые резисторы, изменяющие свое электрическое сопротивление под действием оптического излучения. Условно-графическое изображение (УГО) фоторезистора на схемах представлено на рис. 1.111.

На рис. 1.112 представлено схематическое устройство фоторезистора. На диэлектрическую подложку 1 нанесен слой полупроводника 2, на который нанесено два металлических контакта 3. Контакты подключены к внешнему источнику питания и нагрузке. Когда световой поток  $\Phi$  отсутствует, то в цепи течет небольшой, так называемый темновой ток. При освещении полупроводника 2 световым потоком  $\Phi$  в полупроводнике происходит генерация

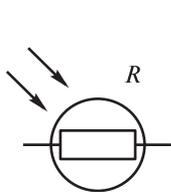


Рис. 1.111. Условно-графическое изображение фоторезистора

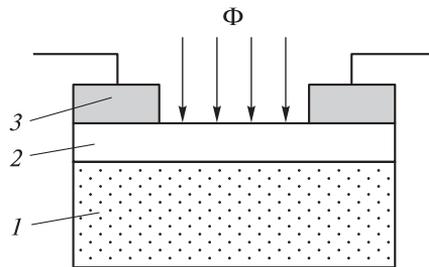


Рис. 1.112. Схематическое устройство фоторезистора

электронно-дырочных пар, т. е. число носителей тока увеличивается, а сопротивление полупроводника падает. Это приводит к увеличению тока в цепи и изменению напряжения на нагрузке.

### 1.22.3. ФОТОДИОДЫ

Фотодиодом называется полупроводниковый диод, в основе принципа действия которого лежит явление внутреннего фотоэффекта (рис. 1.113).

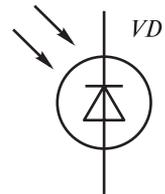
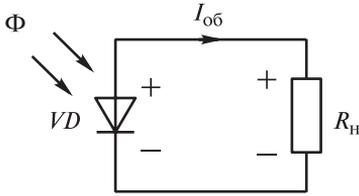


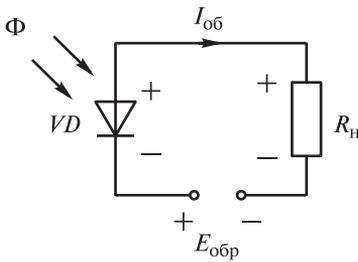
Рис. 1.113. Условно-графическое изображение фотодиода



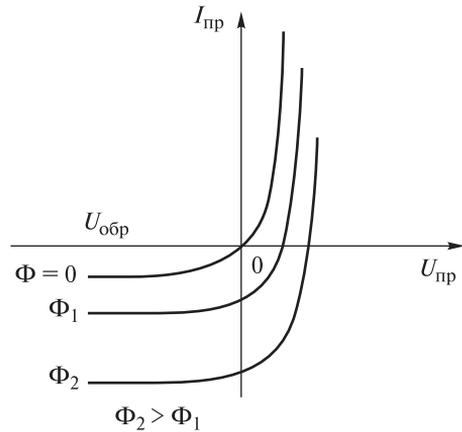
**Рис. 1.114.** Схема включения фотодиода в гальваническом режиме:

( $I_{об}$  — обратный ток фотодиода;  
 $R_{н}$  — сопротивление нагрузки)

Дырки перемещаются в зону  $p$ , а электроны в зону  $n$ . Таким образом, дырки заряжают  $p$ -область положительно, а электроны —  $n$ -область отрицательно; образуется разность потенциалов и возникает обратный ток. Чем выше освещенность, тем больше обратный ток. В фотодиодном режиме необходимо обеспечить смещение фотодиода в обратном направлении (рис. 1.115).



**Рис. 1.115.** Схема подключения фотодиода в фотодиодном режиме



**Рис. 1.116.** Зависимость изменения тока фотодиода  $I_{пр}$  от светового потока  $\Phi$

При отсутствии освещения ( $\Phi = 0$ ) сопротивление обратно смещенного фотодиода велико и через него протекает темновой обратный ток небольшой величины (рис. 1.116). Под действием светового потока ток увеличивается.

#### 1.22.4. ЛАВИННЫЙ ФОТОДИОД

Высококочувствительный полупроводниковый прибор, преобразующий свет в электрический сигнал за счет фотоэффекта и обеспечивающий внутреннее усиление посредством эффекта лавинного умножения, называется лавинным

фотодиодом. Он может применяться в условиях незначительного светового потока. Схема устройства лавинного фотодиода приведена на рис. 1.117. В кристалле полупроводника 1 формируют  $p$ - и  $n$ -области таким образом, чтобы на область  $p$ - $n$ -перехода мог падать световой поток  $\Phi$ . Также наносят омические контакты 2 для подключения внешнего источника питания, антиотражающее покрытие 3, которое выполняет функцию своеобразного фильтра. Лавинный фотодиод включают в схему с обратным смещением. При подаче сильного обратного смещения (близкого к напряжению лавинного пробоя, обычно порядка нескольких сотен вольт для кремниевых приборов) происходит усиление фототока (примерно в 100 раз) за счет ударной ионизации (лавинного умножения) генерированных светом носителей заряда.

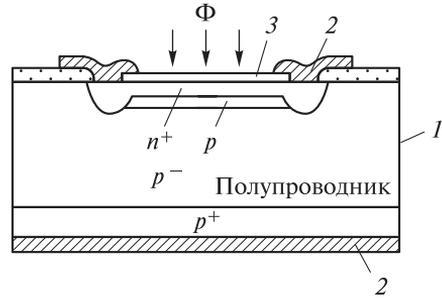


Рис. 1.117. Схема устройства лавинного фотодиода

### 1.22.5. ФОТОТРАНЗИСТОР

Фототранзистор — оптоэлектронный полупроводниковый прибор, вариант биполярного или полевого транзистора. Условное графическое обозначение биполярного фототранзистора представлено на рис. 1.118.

Если фототранзистор создан на базе биполярного, то область базы доступна для светового облучения, за счет этого появляется возможность управлять усилением электрического тока с помощью оптического излучения. Если фототранзистор создан на базе полевого, то падающий световой поток генерирует в  $n$ -канале и  $p$ - $n$ -переходе (канал—затвор) электроны и дырки.

Концентрация электронов в  $n$ -канале повышается, и уменьшается его сопротивление, а ток стока возрастает. Увеличение дырок в  $p$ -области вызывает появление фототока в цепи затвора.

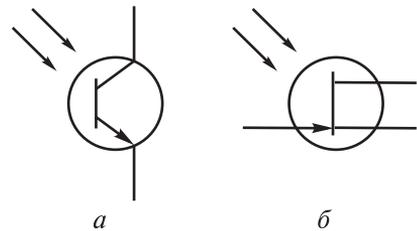


Рис. 1.118. Условное графическое изображение биполярного фототранзистора  $n$ - $p$ - $n$ -типа (а) и полевого фототранзистора с  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$ -типа (б)

### 1.22.6. ОПТРОНЫ

Оптрон или оптопара — полупроводниковый прибор, в котором конструктивно объединены источник и приемник излучения, имеющие между собой оптическую связь.

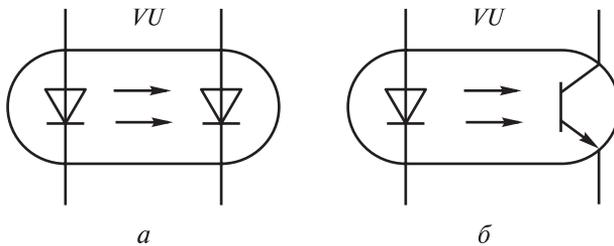
Оптрон состоит из оптического передатчика (излучателя), оптического канала и приемника оптического сигнала. Фотопередатчик преобразовывает

электрический сигнал в оптический. Передатчиком в большинстве случаев служит светодиод.

Оптический сигнал передается по оптическому каналу к приемнику. Канал бывает закрытым, когда излученный передатчиком свет не выходит за пределы корпуса оптрона и сигнал, сформированный приемником, синхронизирован с сигналом на входе передатчика. Такие каналы бывают воздушными или заполненными специальным оптическим компаундом. Также есть «длинные» оптроны, каналом в которых служит оптоволокно. Если оптрон сконструирован так, что генерируемое излучение, перед тем как попасть на приемник, покидает пределы корпуса, такой канал называется открытым. С его помощью можно регистрировать препятствия, возникающие на пути светового луча. Фотоприемник производит обратное преобразование оптического сигнала в электрический. В качестве приемника чаще всего применяются фотодиоды, фоторезисторы, фототранзисторы.

Широкое применение получили оптронные микросхемы — сборки оптронов с обвязкой в одном корпусе. Такие оптроны используют как переключающие устройства.

На рис. 1.119, *а* приведено УГО диодной оптопары. Диодные оптопары применяются в каналах передачи информации, для гальванической развязки и т. п.



**Рис. 1.119.** Условно-графические изображения диодной (*а*) и транзисторной (*б*) оптопар

На рис. 1.119, *б* приведено УГО транзисторной оптопары. Транзистор обычно работает в ключевом режиме, и такая оптопара применяется в коммутирующих устройствах.

### 1.22.7. ПРИБОРЫ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Прибор с зарядовой связью (ПЗС) — полупроводниковый прибор, действие которого основано на накоплении и хранении локализованного заряда (зарядового пакета) в потенциальных ямах, образуемых в полупроводниковом кристалле под действием внешнего электрического поля, и последующей направленной передаче зарядовых пакетов из одной потенциальной ямы в

другую при изменении напряжения на внешних электродах. Конструктивно ПЗС выполняются в виде интегральной схемы.

Прибор с зарядовой связью применяют в качестве приемников оптического излучения для преобразования оптических изображений в последовательность электрических импульсов, т. е. для формирования видеосигнала.

Прибор с зарядовой связью изобретен американскими физиками У. Бойлом и Дж. Смитом в 1969 г.

Упрощенно ПЗС можно рассматривать как матрицу близко расположенных МДП-конденсаторов.

С физической точки зрения ПЗС интересны тем, что электрический сигнал в них представлен не током или напряжением, как в большинстве других твердотельных приборах, а зарядом. При соответствующей последовательности тактовых импульсов напряжения на электродах МДП-конденсаторов зарядовые пакеты можно переносить между соседними элементами прибора. Поэтому такие приборы получили название приборов с переносом заряда или с зарядовой связью.

Фрагмент структуры линейного ПЗС в режиме накопления показан на рис. 1.120. Структура состоит из слоя кремния  $p$ -типа (подложка), изолирующего слоя диоксида кремния и набора пластин-электродов. Один из электродов смещен более положительно, чем остальные два, и именно под ним происходит накопление заряда. Полупроводник  $p$ -типа получают легированием кристалла кремния акцепторной приме-

сью, которая создает в кристалле полупроводника свободные положительно заряженные носители — дырки. Дырки в полупроводнике  $p$ -типа являются основными носителями заряда, а свободных электронов там очень мало, поскольку они являются неосновными носителями. Если подать небольшой положительный потенциал на один из электродов ячейки трехфазного ПЗС, а два других электрода оставить под нулевым потенциалом относительно подложки, то под положительно смещенным электродом образуется область, обедненная основными носителями — дырками. Они будут оттеснены вглубь кристалла. Это означает, что под электродом формируется потенциальная яма.

В основе работы ПЗС лежит явление внутреннего фотоэффекта. Когда в кремнии поглощается фотон, генерируется пара носителей заряда: электрон и дырка. Электростатическое поле в области пиксела вытесняет дырку вглубь кремния, а неосновные носители заряда — электроны — будут накапливаться в потенциальной яме под электродом, к которому подведен положительный потенциал. Здесь они могут храниться достаточно длительное время, поскольку дырок в обедненной области нет и электроны не рекомбинируют.

Заряд, накопленный под одним электродом, в любой момент может быть перенесен под соседний электрод, если его потенциал будет увеличен, в то время как потенциал первого электрода будет уменьшен (рис. 1.121). Пере-

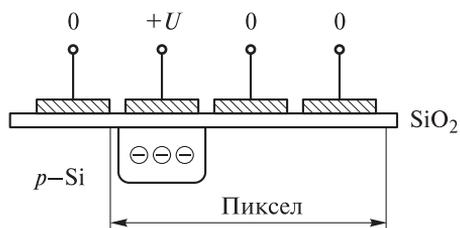


Рис. 1.120. Фрагмент структуры линейного ПЗС

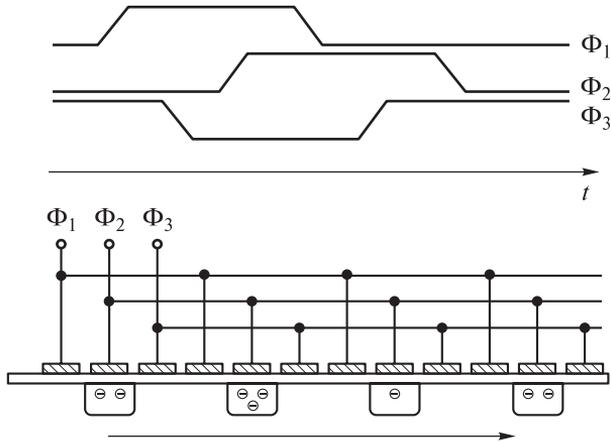


Рис. 1.121. Схема переноса зарядов в ПЗС

нос в ПЗС можно выполнить в одном из двух направлений: влево или вправо. Все зарядовые пакеты линейки пикселей будут переноситься в ту же сторону одновременно. Перемещением накопленного в потенциальных ямах заряда управляют подачей на электроды ПЗС-матрицы определенной последовательности импульсов напряжения, так называемых тактовых импульсов, смещенных по фазе  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  относительно друг друга на  $120^\circ$ .

В качестве преобразователей оптического изображения в видеосигнал используют ПЗС-матрицы. Они являются твердотельным аналогом передающих электронно-лучевых приборов в телевизионных передающих камерах.

## Тесты к лекции 1.22

### 1. Какие приборы называются фотоприемниками?

- приборы, регистрирующие оптическое излучение и преобразующие оптический сигнал на входе в электрический сигнал на выходе;
- приборы, фотографирующие изображения в цветном или черно-белом варианте;
- приборы, регистрирующие акустические сигналы и преобразующие их в видимое изображение.

### 2. Что такое вольтовая чувствительность?

- вольтовая чувствительность показывает, насколько изменится напряжение на выходе фотоприемника при единичном изменении мощности падающего оптического излучения;
- это минимальный уровень напряжения в вольтах, которое необходимо приложить к фотоприемнику, чтобы он начал регистрировать оптическое излучение;
- вольтовая чувствительность определяет диапазон рабочих напряжений фотоприемника.

**3. Что такое токовая чувствительность фотоприемника?**

а) токовая чувствительность показывает, насколько изменится ток в цепи фотоприемника при единичном изменении мощности падающего оптического излучения;

б) минимальное значение тока, который должен протекать через фотоприемник, чтобы он начал регистрировать оптическое излучение;

в) токовая чувствительность определяет диапазон рабочих токов фотоприемника.

**4. Что такое пороговая чувствительность?**

а) минимальная энергия оптического излучения, которая вызовет на выходе фотоприемника сигнал, находящийся в заданном отношении к шуму;

б) средняя энергия оптического излучения, которая вызовет на выходе фотоприемника сигнал, находящийся в заданном отношении к шуму;

в) максимальная энергия оптического излучения, которая вызовет на выходе фотоприемника сигнал, находящийся в заданном отношении к шуму.

**5. Что называется обнаружительной способностью фотоприемника?**

а) величина, обратная пороговой чувствительности;

б) величина, равная логарифму пороговой чувствительности;

в) среднеквадратичное отклонение пороговой чувствительности.

**6. Что такое фоторезистор?**

а) полупроводниковый резистор, изменяющий свое электрическое сопротивление под действием оптического излучения;

б) полупроводниковый резистор, излучающий световую энергию при пропускании через него тока;

в) полупроводниковый резистор, изготавливаемый методом фотонабора.

**7. Что такое фотодиод?**

а) полупроводниковый диод, в основе принципа действия которого лежит явление внутреннего фотоэффекта;

б) полупроводниковый диод, в основе принципа действия которого лежит явление внешнего фотоэффекта;

в) полупроводниковый диод, в основе принципа действия которого лежит явление излучения квантов света при пропускании через него тока.

**8. Из каких основных элементов состоит оптрон?**

а) из излучателя, оптического канала и приемника оптического сигнала;

б) из эмиттера, оптического канала и коллектора;

в) из истока, оптического канала и стока.

**9. Каким образом в ПЗС управляют перемещением заряда, накопленного в потенциальных ямах?**

а) управляют подачей на электроды ПЗС-матрицы определенной последовательности тактовых импульсов напряжения;

б) управляют последовательным освещением ПЗС-матрицы слева направо;

в) управляют включением яркой вспышки с энергией, достаточной для генерации пары электрон–дырка.