

6 ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Оптоэлектроника – раздел науки и техники, в котором изучаются вопросы генерации, обработки, запоминания и хранения информации на основе совместного использования оптических и электрических явлений.

В современной технике находят широкое применение оптоэлектронные полупроводниковые приборы.

Оптоэлектронный полупроводниковый прибор – это полупроводниковый прибор, излучающий или преобразующий электромагнитное излучение, чувствительный к этому излучению в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой областях спектра или использующий подобное излучение для внутреннего взаимодействия его элементов.

В оптоэлектронике в качестве носителя информации используются электромагнитные волны оптического диапазона. Длины волн оптического излучения лежат в диапазоне от 1 нм до 1 мм (рисунок 6.1).

Световой луч в оптоэлектронике выполняет те же функции управления, преобразования и связи, что и электрический сигнал в электрических цепях.

В оптических цепях в качестве носителей сигналов выступают электрически нейтральные фотоны, которые в световом потоке не взаимодействуют между собой, не смешиваются и не рассеиваются. Оптические цепи не подвержены влиянию электрических и магнитных полей. В электрических же цепях носителями заряда являются электроны, которые взаимодействуют с внешними электрическими и магнитными полями, что требует экранирования и защиты от них. В электрических цепях трудно осуществить гальваническую развязку по постоянному току и на низких частотах.

Невосприимчивость оптического излучения к различным внешним воздействиям и электронейтральность фотона являются не только достоинствами, но и недостатками, поскольку затрудняют управление интенсивностью распространения светового потока.

Компоненты оптоэлектроники и электроники существуют, не противореча друг другу, и применяются в тех областях, где их применение целесообразно.

По принципу действия оптоэлектронные приборы подразделяются на приборы, использующие *внешний фотоэффект* и *внутренний фотоэффект*.

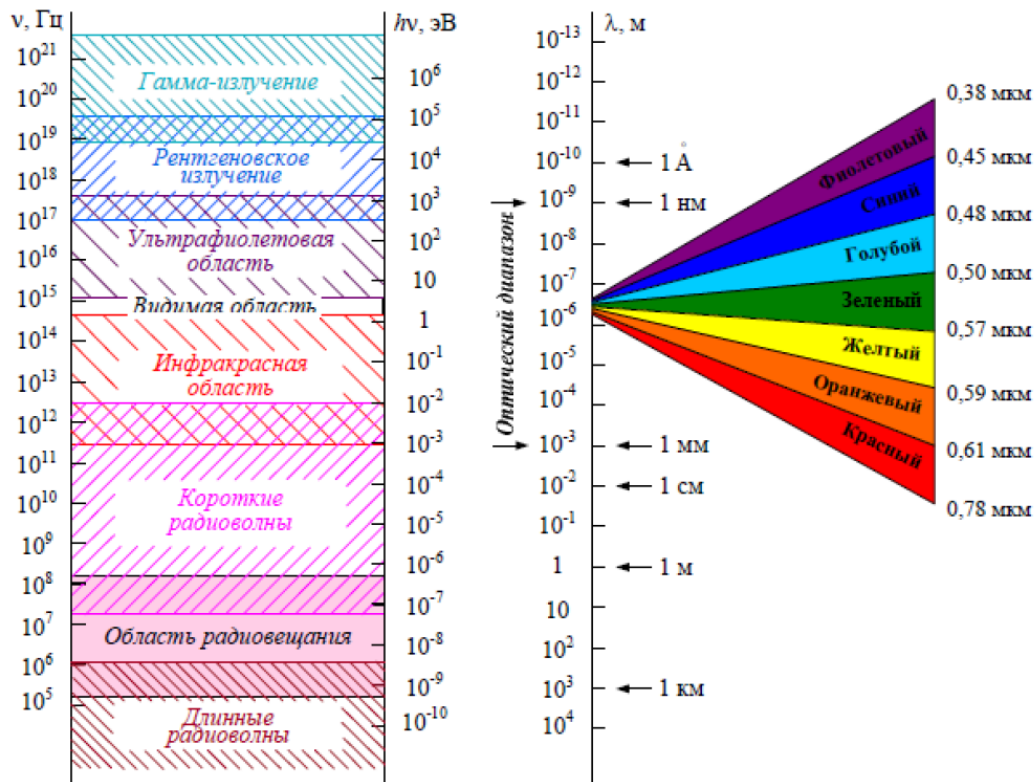


Рисунок 6.1 – Шкала электромагнитных волн

6.1 Фотоэлектрические приборы на основе внешнего фотоэффекта

Внешний фотоэффект – это явление выбивания электронов с поверхности металла под действием светового излучения. Это явление ещё называют фотоэлектронной эмиссией. Лучистая энергия излучается в виде квантов света (фотонов) с энергией

$$E = \hbar \cdot \nu, \quad (6.1)$$

где \hbar – постоянная Планка ($\hbar = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с);
 ν – частота электромагнитного колебания.

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (6.2)$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ – скорость света;
 λ – длина волны электромагнитного излучения.

Квант лучистой энергии, будучи поглощённым атомом металла, может сообщить ему свою энергию, и если её будет достаточно для совершения работы выхода электрона из металла, то электрон покинет поверхность металла и станет свободным носителем электрического заряда.

Приборами, использующими явление внешнего фотоэффекта, являются *фотоэлементы* и *фотоэлектронные умножители*.

6.1.1 Фотоэлементы

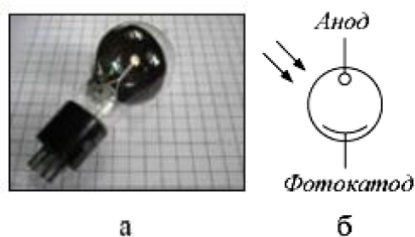


Рисунок 6.2 – Цезиевый фотоэлемент (а) и условное графическое обозначение фотоэлементов (б)

Фотоэлемент (рисунок 6.2) представляет собой стеклянную колбу, в которой создан вакуум и в которой размещены два электрода: *фотокатод* и *анод*. Фотокатод – это чувствительный к световому излучению слой, состоящий из соединений сурьмы, теллура, щелочных металлов с примесями различных элементов. Этот слой покрывает больше половины внутренней поверхности колбы. Анод имеет вид проволочного кольца, сетки либо рамки.

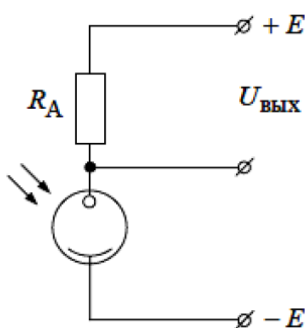


Рисунок 6.3 – Схема включения фотоэлемент

Схема включения фотоэлемента показана на рисунке 6.3. Внешний источник E создаёт между анодом и катодом электрическое поле, под действием которого электроны, выбитые с поверхности катода, устремляются к аноду, создавая анодный ток (фототок) в цепи источника. Этот ток создаёт на резисторе R_A падение напряжения, которое при неизменной величине E зависит от све-

тового потока, падающего на фотокатод. Фотоэлементы подразделяются на *вакуумные* и *газонаполненные*. В вакуумных фотоэлементах внутри колбы создан вакуум, а в газонаполненных – под небольшим давлением введено небольшое количество инертного газа. Принцип действия у них одинаков, но у газонаполненных фотоэлементов гораздо выше чувствительность к излучению, что объясняется эффектом ионизации молекул газа и появлением дополнительных носителей электрического заряда.

Основными характеристиками фотоэлементов являются:

1 *Вольт-амперная характеристика:* $I_{\Phi} = f(U_A) \Big|_{\Phi = const}$. Это зависимость

фототока от напряжения между анодом и катодом при постоянном световом потоке. Вид типовых вольт-амперных характеристик представлен на рисунке 6.4.

Видно, что в режиме насыщения фототок не зависит от анодного напряжения. Этот режим и является рабочим.

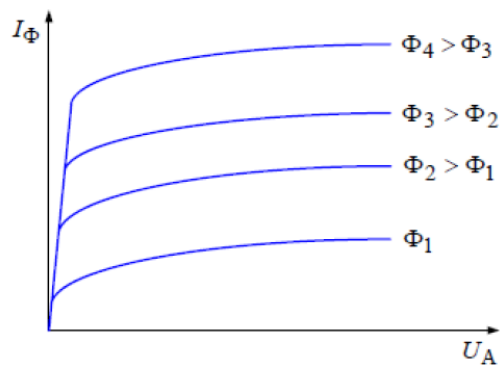


Рисунок 6.4 – Вольт-амперная характеристика фотоэлемента

2 *Световая характеристика* $I_{\Phi} = f(\Phi) \Big|_{U_A = const}$.

Это зависимость фототока светового потока при неизменном напряжении на аноде фотоэлемента. Вид семейства этих характеристик представлен на рисунке 6.5.

3 *Спектральная характеристика:* $S_{\Phi}^* = f(\lambda)$ – это зависимость относительной мощности фотоэлемента от длины волны падающего на катод излучения. Вид типовой спектральной характеристики показан на рисунке 6.6.

Спектральные характеристики фотоэлементов используют для их правильной эксплуатации.

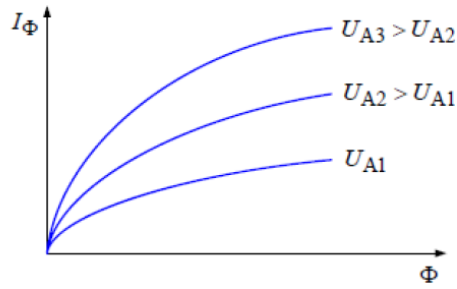


Рисунок 6.5 – Световая характеристика фотоэлемента

Основными параметрами фотоэлементов являются:

- 1 *Чувствительность* – это отношение фототока I_ϕ к вызвавшему этот ток

$$\text{потоку излучения } \Phi : K = \frac{I_\phi}{\Phi} \Big|_{U_A = \text{const}}.$$

- 2 *Пороговая чувствительность* – минимальный световой поток, при котором полезный электрический сигнал фотоэлемента становится, различим на уровне помех.

- 3 *Внутреннее сопротивление* R_i : $R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_\phi} \Big|_{\Phi = \text{const}}.$

Это отношение приращения анодного напряжения к приращению фототока при неизменной величине светового потока.

Фотоэлементы применяются в различных областях науки и техники. В частности их применяют в фотореле, которые обеспечивают контроль различных величин на производстве: освещенности, прозрачности сред, качества обработки поверхности деталей и т. п. Но их недостатками являются невозможность микроминиатюризации и довольно высокие анодные напряжения (десятки – сотни вольт). Поэтому в настоящее время во многих видах аппаратуры они заменяются полупроводниковыми приемниками излучения.

6.1.2 Фотоэлектронные умножители

Фотоэлектронный умножитель – электровакуумный прибор, в котором фотоэлемент дополнен устройством усиления фототока за счет вторичной электронной эмиссии.

Схематическое устройство этого прибора показано на рисунке 6.7. Обычно это стеклянная колба, в торце которой устанавливается полупрозрачный фотокатод 1, за которым устанавливается фокусирующая диафрагма 2 и несколько вторичных катодов 3, которые иногда называются ещё *динодами*, за которыми располагается анод 4. Каждый из этих электродов подключается к различным точкам делителя напряжения, подающего на эти электроды различные потен-

циалы. Слабый световой поток попадает на фотокатод и выбивает из него некоторое количество электронов. Под действием создаваемого источником E электрического поля эти электроны ускоряются и, попадая на вторичный катод, выбивают из него уже значительно большее количество электронов, которые, в свою очередь, ускоряются и попадают на следующий вторичный катод и т. д. Поток электронов всё время возрастает от одного вторичного катода к другому и на анод попадает уже мощный электронный поток, который создаёт на нагрузке R_H большое падение напряжения, пропорциональное входному световому потоку.

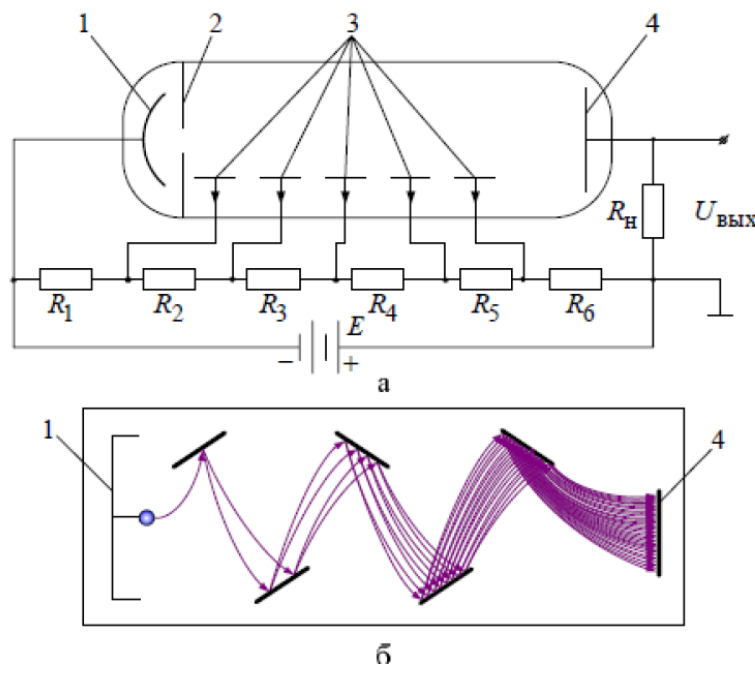


Рисунок 6.7 – Фотоэлектронный умножитель

а – включение фотоумножителя с пятью анодами вторичной эмиссии;
 б – расположение электродов в фотоумножителе

Коэффициент усиления фотоэлектронного умножителя:

$$K_y = \frac{I_A}{I_0} = \sigma^n, \tag{6.3}$$

- где I_A – ток анода;
- I_0 – ток фотокатода;
- σ – коэффициент вторичной эмиссии;
- n – число вторичных фотокатодов.

Для фотоэлектронного умножителя, как и для обычных фотоэлементов, характерен темновой ток, который обусловлен термоэлектронной эмиссией фотокатода и динодов. Его величина составляет малые доли микроампера, и он может быть уменьшен охлаждением. Значением темнового тока ограничивается минимальный световой поток, который может зарегистрировать с помощью умножителя.

Фотоэлектронные умножители применяются во многих областях науки и техники: в астрономии, для измерения световых потоков, для спектрального анализа и т. п.

6.2 Фотоэлектрические приборы на основе внутреннего фотоэффекта

Внутренний фотоэффект наблюдается в полупроводниковых материалах при облучении их поверхности лучами света. Он заключается в том, что при поглощении энергии фотона атомом полупроводника может возникнуть пара «электрон – дырка», если этой энергии достаточно для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости, т. е. если поглощённая энергия превышает ширину запрещённой зоны. Интенсивность фотоионизации определяется энергией излучения, её потоком и спектром поглощения полупроводника.

Образование пар «электрон – дырка» обуславливает собственную электропроводность полупроводника, которая в данном случае является фотопроводимостью, причём собственная электропроводность может оказаться значительно больше проводимости примесной.

Внутренний фотоэффект широко применяется в различных фотоэлектрических приборах: *фоторезисторах, фотодиодах, фототранзисторах и фототиристорах.*

11.3. Полупроводниковые приемники излучения

Полупроводниковые приемники излучения или фотоприемники – это оптоэлектронные приборы для преобразования оптического излучения в электрическую энергию.

Под действием оптического излучения происходит изменение электрофизических параметров фотоприемника, обусловленное образованием дополнительных свободных носителей заряда в полупроводнике. Процесс образования дополнительных носителей заряда внутри полупроводника под действием оптического излучения называется внутренним фотоэффектом.

В фотоприемниках используются две разновидности внутреннего фотоэффекта: фотогальванический и фотопроводимости.

Фотогальванический эффект возникает в полупроводнике с внутренним потенциальным барьером (например с *pn*-переходом): внутреннее электрическое поле перехода разделяет возникшие под воздействием оптического излучения фотоносители. Пространственно разделенные фотоносители разных знаков – дырки и электроны – создают фотоЭДС.

Эффект фотопроводимости в отличие от фотогальванического состоит только в создании фотоносителей. Результатом изменения концентрации носителей в полупроводнике является увеличение проводимости полупроводника.

Оба эффекта используются в практике конструирования фотоприемников: фотогальванический эффект – в фотодиодах, фототранзисторах, фототиристорах и других фотоприемниках с *pn*-переходом, эффект фотопроводимости – в фоторезисторах.

11.3.1. Фоторезисторы

Основной частью конструкции фоторезистора является полупроводниковый фоточувствительный слой, который может быть выполнен в виде монокристаллической пластинки полупроводника. В качестве полупроводникового материала для фоторезисторов используют сульфид кадмия, селенид кадмия, сульфид свинца. На поверхность фоточувствительного слоя наносят металлические электроды. Поверхность полупроводникового фоточувствительного слоя, расположенную между электродами, называют рабочей площадкой. Фоторезисторы делают с рабочими площадками прямоугольной формы или в виде кольца. Площадь рабочих площадок составляет обычно от десятых долей до десятков квадратных миллиметров.

При облучении фоторезистора фотонами в полупроводниковом фоточувствительном слое возникает избыточная концентрация носителей заряда. В результате увеличения концентрации носителей заряда уменьшается сопротивление полупроводника. Если к фоторезистору приложено напряжение, то через него будет проходить дополнительная составляющая тока – фототок, обусловленный избыточной концентрацией носителей.

Вольтамперные характеристики фоторезистора представляют собой зависимость светового тока I_{CB} при неизменном световом потоке Φ_v от приложенного к фоторезистору напряжения U , а также темнового тока $I_{ТЕМ}$ от приложенного к фоторезистору напряжения U (рис. 11.15).

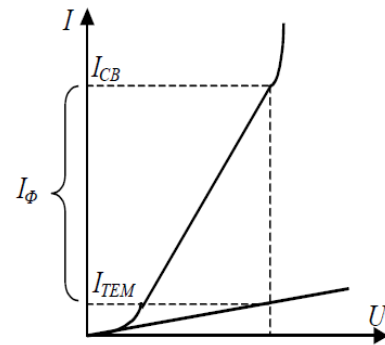


Рис. 11.15

В рабочем диапазоне напряжения ВАХ фоторезисторов при различных значениях светового потока практически линейны.

Световая или люкс - амперная характеристика фоторезистора представляет собой зависимость фототока $I_{\phi} = I_{CB} - I_{ТЕМ}$ от освещенности E_v (рис. 11.16).

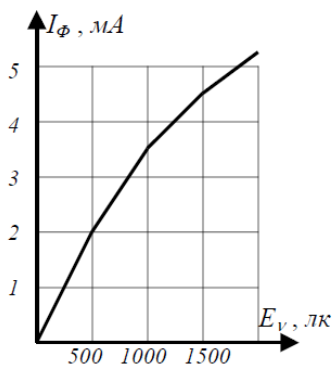


Рис. 11.16

Фоторезисторы имеют обычно нелинейную световую характеристику, которая в узком диапазоне освещенностей аппроксимируется зависимостью $I_{\phi} = A \cdot E_v^x$, где A и x - коэффициенты, являющиеся постоянными для данного фоторезистора в выбранном диапазоне освещенности.

Спектральная характеристика фоторезистора – это зависимость фототока (обычно в относительных единицах) от длины волны падающего на фоторезистор света (рис. 11.17).

При больших длинах волн, т.е. малых энергиях квантов света, энергия

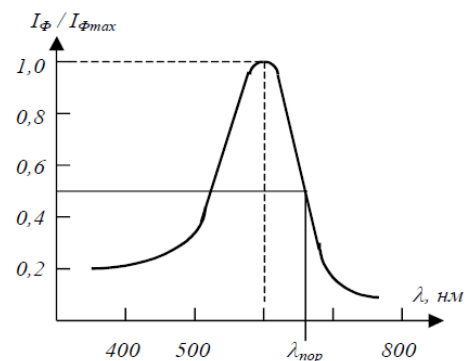


Рис. 11.17

кванта оказывается недостаточной для переброса электрона из валентной зоны в зону проводимости. Поэтому для каждого фоторезистора существует пороговая длина волны (наибольшая), которую обычно определяют как длину волны, соответствующую спаду фототока на 50% со стороны больших длин волн. При малых длинах волн растет показатель поглощения, уменьшается глубина проникновения квантов света в полупроводник, увеличивается роль поверхностной рекомбинации и уменьшается время жизни неравновесных носителей. Таким образом, спектральная характеристика имеет спад и при малых длинах волн.

Постоянная времени фоторезистора – это время, в течение которого фототок фоторезистора изменяется после освещения или после затемнения на 63% или в e раз по отношению к установившемуся значению. Таким образом, постоянные времени характеризуют скорость реакции фоторезистора на изменение светового потока, т.е. характеризуют инерционность фоторезистора. Числовые значения постоянных времени различных фоторезисторов от десятков микросекунд до десятков миллисекунд.

Темновое сопротивление – это сопротивление фоторезистора в отсутствие освещения.

Удельная интегральная чувствительность – это отношение фототока к световому потоку и к приложенному напряжению:

$$K_0 = \frac{I_\Phi}{\Phi_\nu U}.$$

Удельные интегральные чувствительности различных фоторезисторов составляют от 1 до 600 мА/(В лм).

11.3.2. Фотодиоды

Фотодиод – это фотоприемник, принцип действия которого основан на фотогальваническом эффекте и фоточувствительный элемент которого

имеет структуру полупроводникового диода.

Упрощенная структура фотодиода изображена на рис. 11.18. Пусть излучение воздействует в направлении перпендикулярном плоскости pn -перехода. В результате поглощения фотонов в n - базе возникают электронно-дырочные пары (фотоносители). Фотоносители диффундируют в глубь n - области. Ширина n - области такова, что основная доля созданных излучением фотоносителей не успевает рекомбинировать в n - области и доходит до границы pn -перехода.

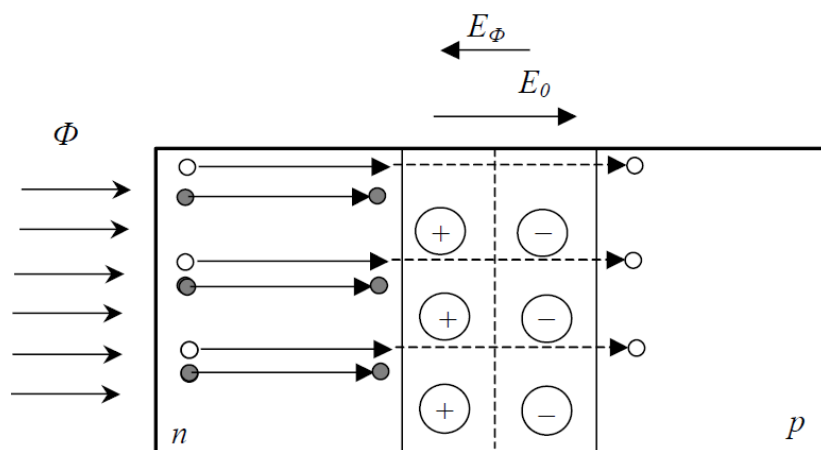


Рис. 11.18

Электроны и дырки разделяются электрическим полем pn -перехода напряженностью E_0 , при этом дырки переходят в p - область, а электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы pn -перехода в n - области. Таким образом, ток фотоносителей через pn -переход обусловлен дрейфом неосновных носителей – дырок.

Сравним принципы действия обычного выпрямительного диода и фотодиода.

Когда поток излучения отсутствует $\Phi = 0$, диод и фотодиод находятся в равновесном состоянии, при этом диффузионная составляющая тока через pn -переход – тока основных носителей – равна дрейфовой составляющей тока неосновных носителей. В обычном диоде равновесие наруша-

ется при приложении к pn -переходу прямого напряжения (плюс к p -области, минус к n -области), в результате чего снижается внутренний потенциальный барьер. Равновесие в потоках носителей через переход нарушается в пользу диффузионной составляющей тока, которая при достаточно большом прямом напряжении определяет значение тока через pn -переход. Дрейфовая составляющая тока через pn -переход в выпрямительном диоде является фактически паразитной и должна быть минимально возможной.

В фотодиоде pn -переход разделяют созданные излучением фотоносители. Это приводит к снижению внутреннего потенциального барьера в фотодиоде (аналогично приложению прямого напряжения в обычном диоде). Важно подчеркнуть, что в фотодиоде равновесие под действием излучения нарушается в пользу дрейфовой составляющей тока через pn -переход, а диффузионная составляющая в фотодиоде является паразитной составляющей тока через pn -переход.

Дрейфовый поток фотоносителей (дырочек и электронов) образует фототок I_ϕ . Дырочки заряжают p -область положительно относительно n -области, а электроны заряжают n -область отрицательно по отношению к p -области. Возникшая таким образом разность потенциалов, называемая фотоЭДС E_ϕ , снижает внутренний потенциальный барьер до значения $\Delta E = E_0 - E_\phi$. Очевидно, что E_ϕ должно быть меньше E_0 , так как разделение фотоносителей возможно только при наличии некоторого потенциального барьера. Уменьшение высоты потенциального барьера и соответственно напряженности электрического поля в pn -переходе ухудшает разделительные свойства pn -перехода.

Для обеспечения высокой чувствительности к излучению необходимо, чтобы в фотодиоде диффузионная составляющая тока была минимальной. Поэтому фотодиод работает или вообще без внешнего напряжения (фотогальванический режим), или при обратном внешнем напряжении

(фотодиодный режим).

Фотогальванический режим характеризуется отсутствием источника внешнего напряжения в цепи фотодиода (рис. 11.19), т.е. фотодиод работает генератором фотоЭДС.

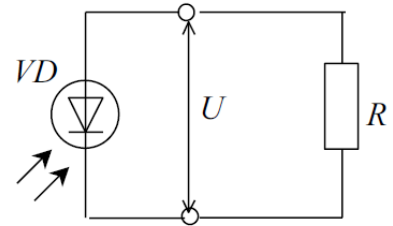


Рис. 11.19

При работе в этом режиме фотодиод называют **фотоэлементом**.

При этом ток фотодиода:

$$I_{\text{фд}} = \frac{U}{R} = I_{\Phi} - I_{pn} = I_{\Phi}(\Phi) - I_0(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1), \quad (11.1)$$

где I_{Φ} - ток фотоносителей (фототок); U - напряжение на диоде; R - сопротивление нагрузки; $I_{pn} = I_0(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1)$ - ток pn -перехода, описываемый выражением (8.7) для вольтамперных характеристик идеализированного pn -перехода.

При разомкнутой внешней цепи ($R = \infty, I_{\text{фд}} = 0$) из выражения (11.1) имеем $I_{\Phi} = I_{pn}$, откуда легко получить напряжение на переходе при холостом ходе, которое равно фотоЭДС:

$$U_{\text{ХХ}} = \varphi_T \cdot \ln\left(1 + \frac{I_{\Phi}}{I_0}\right). \quad (11.2)$$

При коротком замыкании в нагрузке ($R = 0, U = 0$) ток фотодиода $I_{\text{фд}} = I_{\Phi}$.

В фотодиодном режиме работы последовательно с фотодиодом включается источник обратного напряжения (рис. 11.20).

В этом режиме потенциальный барьер возрастает, и ток через переход I_{pn}

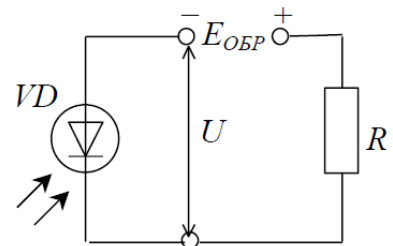


Рис. 11.20

будет определяться током I_0 , который протекает в отсутствие излучения.

Ток фотодиода при этом

$$I_{\text{фд}} = I_{\phi} - I_{\text{рп}} = I_{\phi} + I_0 \approx I_{\phi}. \quad (11.3)$$

В общем случае при любой полярности напряжения ток фотодиода описывается выражением (11.1). Это выражение представляет собой зависимость тока фотодиода $I_{\text{фд}}$ от напряжения на фотодиоде U при разных значениях потока излучения Φ , т.е. является уравнением семейства вольт-амперных характеристик фотодиода (рис. 11.21).

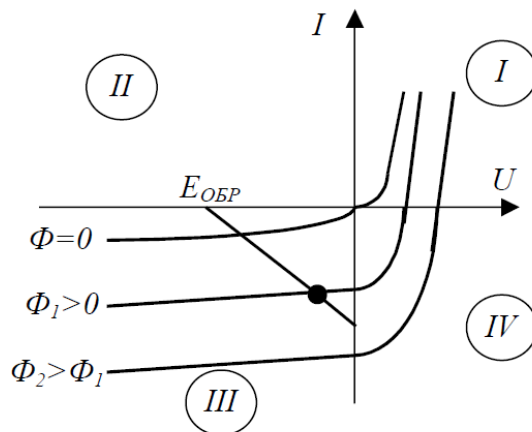


Рис. 11.21

Фотоуправление током через диод становится невозможным.

Квадрант III – это область работы фотодиода в фотодиодном режиме. К pn -переходу прикладывается обратное напряжение. Следует подчеркнуть, что в рабочем диапазоне обратных напряжений фототок практически не зависит от величины обратного напряжения и сопротивления нагрузки. ВАХ нагрузочного резистора R представляет собой прямую линию, уравнение которой имеет вид $E_{\text{ОБР}} - I_{\phi}R = U$, где $E_{\text{ОБР}}$ - напряжение источника обратного напряжения; U - обратное напряжение на фотодиоде; I_{ϕ} - фототок, являющийся током нагрузки. Ток I_{ϕ} можно определить по точке пере-

Семейство ВАХ фотодиода расположено в I, III и IV квадрантах.

Квадрант I – это не рабочая область для фотодиода: в этом квадранте к pn -переходу прикладывается прямое напряжение и диффузионная составляющая тока полностью подавляет фототок ($I_{\text{рп}} \gg I_{\phi}$).

сечения ВАХ фотодиода при заданном потоке излучения Φ_1 и ВАХ нагрузочного резистора. Таким образом, в фотодиодном режиме при заданном потоке излучения Φ фотодиод является источником тока I_ϕ по отношению к внешней цепи. Значение тока I_ϕ от параметров внешней цепи ($E_{обп}, R$) практически не зависит.

Квадрант *IV* (в укрупненном виде представленный на рис. 11.22) семейства ВАХ фотодиода соответствует фотогальваническому режиму работы фотодиода.

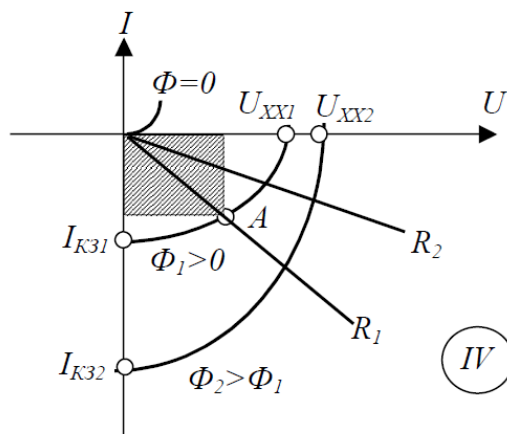


Рис. 11.22

По точкам пересечения ВАХ с осью напряжения можно определить значения фотоЭДС U_{xx} при разных потоках излучения Φ . У кремниевых фотодиодов значение фотоЭДС равно 0,5 – 0,55 В. Точка пересечения ВАХ с осью токов соответствует значениям токов короткого замыкания $I_{кз}$.

Промежуточные значения сопротивления нагрузки R определяются линиями нагрузки, которые при разных значениях R выходят из начала координат под разными углами. При заданном значении потока излучения по ВАХ фотодиода можно выбрать оптимальный режим работы фотодиода в фотогальваническом режиме. Под оптимальным режимом в данном случае понимают выбор такого сопротивления нагрузки R , при котором в нагрузку будет передаваться наибольшая электрическая мощность. Для потока Φ_1 оптимальному режиму соответствует линия нагрузки R_1 , поскольку электрическая мощность, численно равная площади заштрихованного прямоугольника с вершиной в точке A , где пересекаются линии Φ_1 и R_1 , будет максимальной $P_{H\max}$. Для кремниевых фотодиодов при оптималь-

ной нагрузке значение напряжения на фотодиоде равно 0,35 – 0,4 В.

Световой характеристикой фотодиода называется зависимость фототока I_ϕ от потока излучения Φ . В фотодиодном режиме и в рабочем диапазоне значений потока излучения Φ эта характеристика практически линейна (рис. 11.23). Это говорит о том, что практически все фотоносители доходят до pn -перехода и принимают участие в образовании фототока.

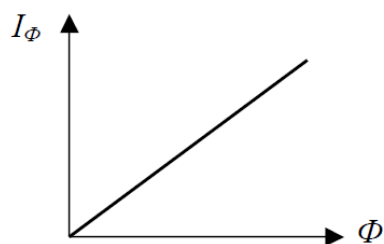


Рис. 11.23

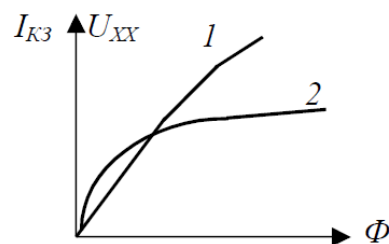


Рис. 11.24

В фотогальваническом режиме световые характеристики представляются зависимостями либо тока короткого замыкания $I_{кз}$ от потока излучения Φ (рис. 11.24, кривая 1), либо фотоЭДС $U_{хх}$ от потока излучения Φ (рис. 11.24, кривая 2). При больших потоках излучения Φ закон изменения этих зависимостей существенно отличается от линейного. Для функции $I_{кз} = f(\Phi)$ появление нелинейности связано прежде всего с ростом падения напряжения на объемном сопротивлении базы фотодиода. Снижение фотоЭДС $U_{хх}$ объясняется уменьшением высоты потенциального барьера при накоплении избыточного заряда электронов в n - области и дырок в p - области. Как следствие этого процесса, поле pn -перехода хуже разделяет фотоносители, и рост фотоЭДС при увеличении потока излучения замедляется.

Спектральная характеристика фотодиода – это зависимость фототока (обычно в относительных единицах) от длины волны падающего на фотодиод светового потока (рис. 11.25).

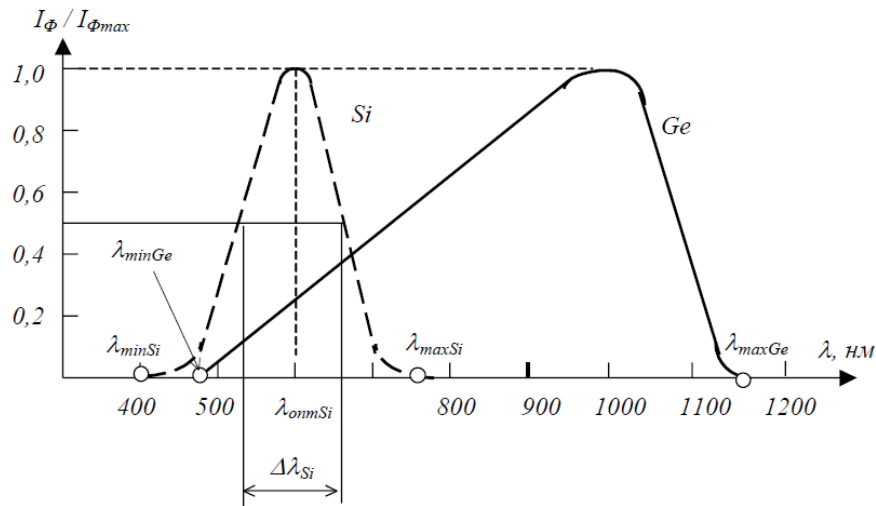


Рис. 11.25

Коротковолновая граница спектра λ_{\min} фотодиода зависит от толщины облучаемой базы и от скорости поверхностной рекомбинации. Уменьшая толщину базы и скорость рекомбинации, можно сдвигать коротковолновую границу в сторону уменьшения длины волны. Длинноволновая граница спектра λ_{\max} определяется шириной запрещенной зоны используемого материала.

Быстродействие фотодиода при работе в фотодиодном режиме определяется скоростью нарастания фототока при включении излучения и скоростью спада фототока при выключении излучения. При включении излучения фототок изменяется по закону $i_{\phi} = I_{\phi} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{np}}} \right)$, а при выключении

излучения – по закону $i_{\phi} = I_{\phi} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{np}}}$, где τ_{np} - время пролета неосновных носителей в n - базе. Для кремния $\tau_{np} \approx 100$ нс .

Быстродействие фотодиода при работе в фотогальваническом режиме определяется скоростью нарастания фотоЭДС E_{ϕ} при включении излучения и скоростью спада фотоЭДС E_{ϕ} при выключении излучения. При включении излучения фотоЭДС изменяется по закону

$E_{\phi} = \varphi_T \cdot \ln \left[\frac{I_{\phi}}{I_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) + 1 \right]$, а при выключении излучения – по закону

$E_{\phi} = \varphi_T \cdot \ln \left[\frac{I_{\phi}}{I_0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} + 1 \right]$, где τ_p - постоянная времени жизни избыточных носителей.

Кроме того, частотные свойства фотодиодов характеризуются частотной зависимостью чувствительности от частоты изменения интенсивности потока излучения. Чувствительность S является важнейшим параметром любого фотоприемника, в том числе и фотодиода. В общем случае чувствительность фотоприемника отражает изменение электрического состояния на выходе фотоприемника при подаче на его вход единичного оптического сигнала. До определенной степени этот параметр можно считать аналогичным коэффициенту усиления в приборах с электронной проводимостью. В соответствии с характеризующим параметром излучения различают чувствительность фотоприемника к потоку излучения, к световому потоку, к облученности и к освещенности. В зависимости от измеряемого электрического параметра на выходе фотоприемника различают токовую и вольтную чувствительность. Чувствительность фотоприемника не есть постоянная величина, и зависит от параметров излучения. Для учета этой зависимости вводят понятия статической и динамической дифференциальной чувствительности. Статическая чувствительность определяется отношением постоянных значений входной и выходной величин. Дифференциальная чувствительность равна отношению малых приращений этих величин. Чувствительность зависит от длины волны падающего излучения. Поэтому различают интегральную и монохроматическую зависимость. Интегральная чувствительность – это чувствительность фотоприемника к нехроматическому излучению заданного спектрального состава. Монохроматическая чувствительность – это чувствительность фотоприемника к хро-

матическому излучению. Таким образом, дифференциальная токовая чувствительность фотодиода к монохроматическому световому потоку может быть найдена в соответствии с выражением $S = \frac{\partial I_{\Phi}}{\partial \Phi_{\lambda}}$.

Вид зависимости чувствительности S от частоты f изменения светового потока приведен на рис. 11.26.

Значение $f_{ГР}$ может достигать сотен МГц.

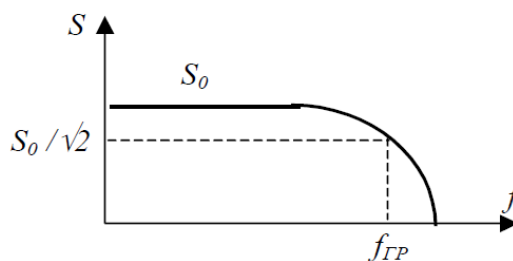


Рис. 11.26

Расширение частотного диапазона фотодиода без снижения его чувствительности возможно в $p-i-n$ - структурах. В $p-i-n$ - диоде i - область заключена между областями в p - типа и в n - типа и имеет удельное сопротивление в 10^6 раз больше, чем сопротивление этих областей. При достаточно больших обратных напряжениях сильное однородное поле распространяется на всю i - область. Поскольку эта область может быть сделана достаточно широкой, такая структура создает основу для получения быстродействующего и чувствительного фотоприемника. Повышение быстродействия обусловлено тем, что процесс диффузии через базу, характерный для обычной структуры фотодиода, в $p-i-n$ - диоде заменяется дрейфом носителей через i - область в сильном электрическом поле.

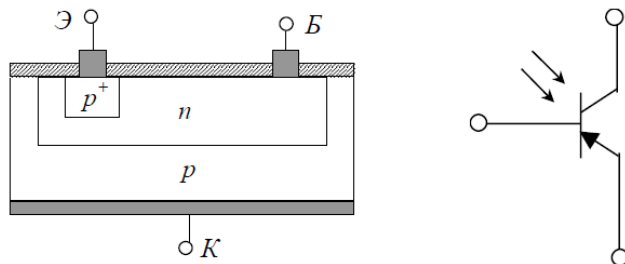
Повысить быстродействие до 10^{-10} с и выше позволяют фотодиоды со структурой металл – полупроводник (фотодиоды Шоттки).

Еще одним типом быстродействующих фотодиодов являются лавинные фотодиоды, использующие эффект лавинообразного размножения носителей.

11.3.3. Фототранзисторы

В фотоприемниках с внутренним усилением кроме преобразования оптического излучения в электрический ток (фототок) имеет место еще и увеличение (усиление) фототока. Основными разновидностями фотоприемников с внутренним усилением являются фототранзистор и фототиристор. Через фотоприемное окно оптическое излучение попадает в рабочую область структуры прибора. В этой области обеспечивается генерация фотоносителей, которые затем разделяются pn - переходом. Разделение фотоносителей сопровождается дополнительным увеличением их концентрации за счет механизма электрического усиления.

Типичная структура $p-n-p$ - фототранзистора и его условное графическое обозначение приведены на рис.



11.27.

Рис. 11.27

В электрическую цепь фототранзистор обычно включается по схеме с общим эмиттером, при этом у некоторых фототранзисторов база может не иметь внешнего вывода (рис. 11.28).

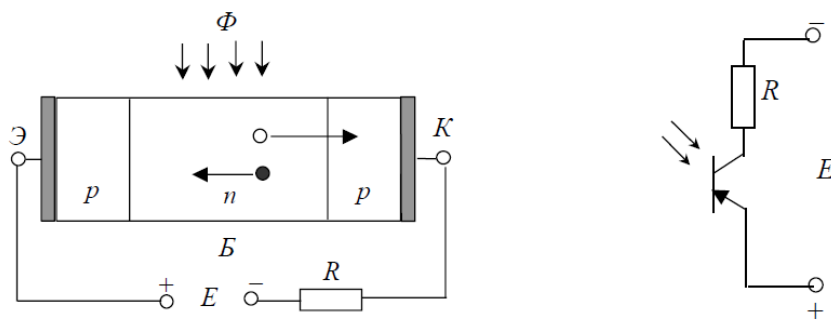


Рис. 11.28

Под действием излучения начинается генерация носителей в базе,

которые затем разделяются коллекторным переходом. Дырки уходят через коллекторный переход в коллектор, а электроны остаются в базе. Для того чтобы восстановить нейтральность заряда в базе при $I_B = 0$, эмиттер инжектирует дополнительное количество дырок. Соответственно возрастает и ток коллектора. Таким образом, фототок в данном случае играет роль тока базы. В связи с этим выходные характеристики фототранзистора аналогичны характеристикам обычного биполярного транзистора (рис. 11.29).

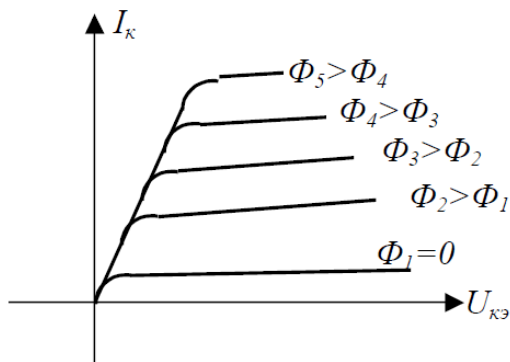


Рис. 11.29

По сравнению с обычным фотодиодом фототранзистор дает усиление фототока в β раз, где β - коэффициент передачи тока транзистора.

Повышение чувствительности – главное преимущество фототранзистора по сравнению с фотодиодом.

Однако это преимущество обычно достигается за счет снижения температурной стабильности прибора, так как фототранзистор работает при постоянном токе базы. Кроме того, у фототранзисторов снижается пороговая чувствительность, так как значительно возрастает темновой ток $I_T = I_0(1 + \beta)$, где I_0 тепловой ток транзистора.

Наличие вывода базы у фототранзистора позволяет использовать не только оптическое, но и электрическое управление фототранзистором (рис. 11.30). Возможность электрического управления позволяет осуществлять компенсацию посторонних внешних воздействий, например, изменение параметров, вызванное изменением температуры в процессе работы.

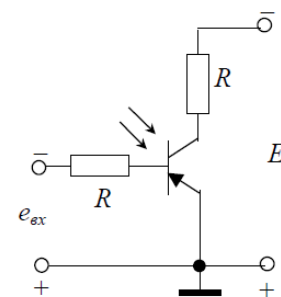


Рис. 11.30

11.3.4. Фототиристоры

Типичная структура фототиристора и его условное графическое обозначение приведены на рис. 11.31.

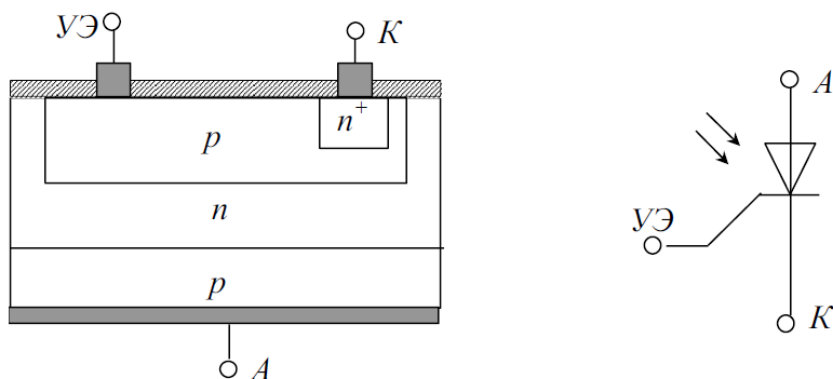


Рис. 11.31

При включении в электрическую цепь к четырехслойной структуре $p-n-p-n$ - фототиристора прикладывается прямое напряжение (положительный полюс к аноду, отрицательный к катоду) (рис. 11.32).

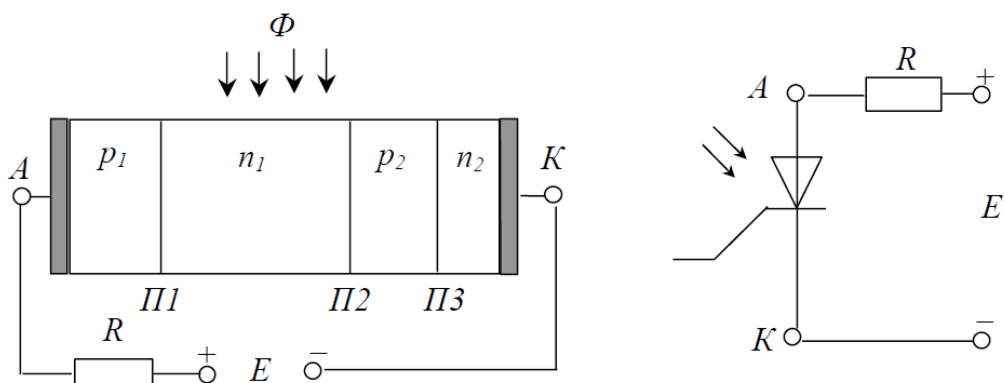


Рис. 11.32

В статическом режиме (при протекании постоянного тока) для тока I через тиристор можно записать следующее выражение

$$I \cdot (1 - \alpha_1 - \alpha_2) = I_0 + I_{\phi_1} \cdot \alpha_1 + I_{\phi_2} + I_{\phi_3} \alpha_2,$$

где $I_{\phi_1}, I_{\phi_2}, I_{\phi_3}$ - фототоки, возникающие вследствие деления соответствующими $p-n$ - переходами $\Pi 1, \Pi 2, \Pi 3$ генерированных излучением но-

сителей; α_1, α_2 - коэффициенты передачи по току $p_1-n_1-p_2$ - транзистора и $n_2-p_2-n_1$ - транзистора, в виде совокупности которых может быть представлен тиристор (рис. 9.6); I_0 - тепловой ток коллекторного перехода $П2$. При отсутствии освещения, т.е. при $I_{\phi_1} = I_{\phi_2} = I_{\phi_3} = 0$, получим выражение для ВАХ фототиристора в случае двухэлектродного (динисторного) включения, которое определяет темновую характеристику фототиристора. При освещении ток I , протекающий через структуру, будет определяться совместным действием фототоков $I_{\phi_1}, I_{\phi_2}, I_{\phi_3}$ через переходы $П1, П2, П3$ и током I_0 . Можно сказать, что величина $I_{\phi_1} \cdot \alpha_1 + I_{\phi_2} + I_{\phi_3} \alpha_2$, которая изменяется с изменением уровня освещенности, играет роль тока управления в обычном тиристоре, т.е. при воздействии потока излучения разной величины изменяется напряжение включения фототиристора.

В связи с этим выходные характеристики фототиристора (рис. 11.33) по виду аналогичны характеристикам обычного тиристора.

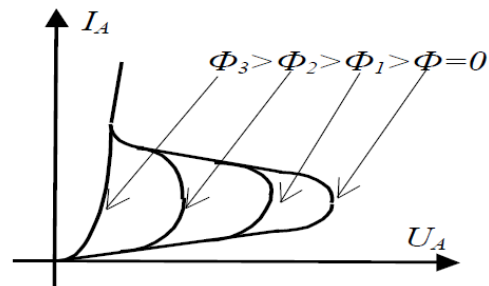


Рис. 11.33

6.3 Светодиоды

Светодиод, или *светоизлучающий диод (СИД)* – это полупроводниковый диод на основе $p-n$ - или гетероперехода, излучающий кванты света при протекании через него прямого тока.

Принцип действия светодиодов основан на использовании явления излучательной рекомбинации. Когда через $p-n$ -переход протекает прямой ток (рис. 6.26), то при этом происходит рекомбинация носителей, т. е. заполнение свободного энергетического уровня в валентной зоне электроном, находящимся в зоне проводимости, что, естественно, сопровождается выделением энергии. Чаще всего эта энергия выделяется в виде тепла, но можно подобрать такие полупроводниковые материалы, в которых явление рекомбинации будет сопровождаться излучением квантов лучистой энергии. Обычно это наблюдается в полупроводниках, представляющих собой двойные и тройные соединения.

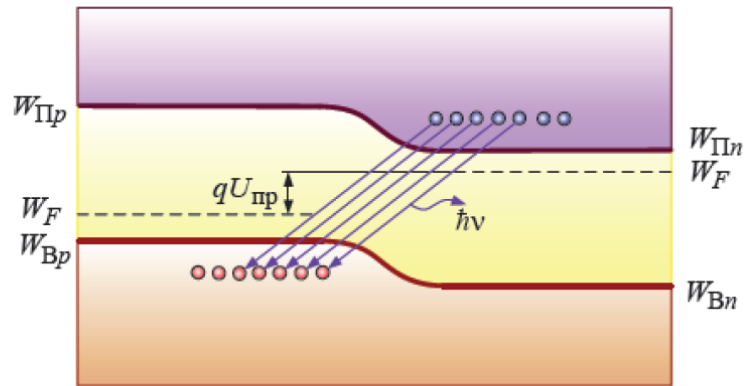


Рисунок 6.26 – Энергетическая диаграмма прямовключенного светодиода

По характеристике излучения светодиоды разделяют на две группы:

- Светодиоды с излучением в видимой части спектра;
- Светодиоды с излучением в инфракрасной части диапазона.

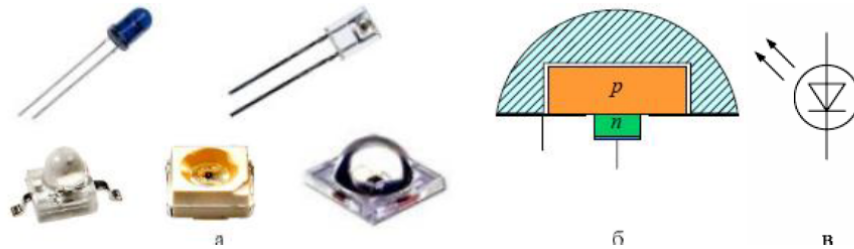


Рисунок 6.27 – Конструкции светодиодов (а), структура (б) и условное графическое обозначение светодиода (в)

Конструктивное оформление светодиодов также различное, однако, чаще всего они выполняются в виде монокристалла полупроводника, в котором создан $p-n$ -переход; кристалл смонтирован в стеклянный корпус-линзу, свободно пропускающую излучаемый свет (рисунок 6.27).

Светодиоды нашли широкое применение в устройствах отображения информации, в вычислительных устройствах для ввода – вывода информации, а также в устройствах оптоэлектроники.

Светодиоды могут иметь несколько $p-n$ -переходов, расположенных на одном монокристалле. В зависимости от их включения или режима работы они излучают в различных областях спектра и имеют управляемый цвет свечения. При этом используются или зависимость интенсивности отдельных частот излучения от тока $p-n$ -перехода, или смешение излучений двух светодиодов, имеющих свечение разного цвета.

Наибольшее распространение получил второй случай. Как видно из рисунка 6.28, на кристалле полупроводника созданы два $p-n$ -перехода.

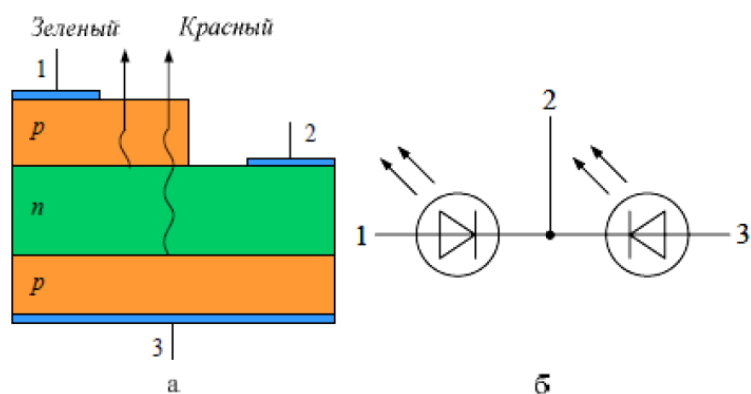


Рисунок 6.28 – Структура двухцветного светодиода (а);
условное графическое обозначение двухцветного светодиода (б)

Примеси подобраны таким образом, что один переход излучает свет красного цвета, а другой – зеленого. При их смешивании получается желтый цвет. В структуре имеется три (1, 2, 3) вывода, что позволяет через каждый p - n -переход пропускать свое значение тока. Изменяя токи переходов, удастся менять цвет излучения от желто-зеленого до красно-желтого оттенка, а также получать чистые красный и зеленый цвета.

Комбинируя включение отдельных переходов, можно получить изображение светящейся цифры, буквы или знака. Для этого на базе светодиодов выпускаются *знакосинтезирующие индикаторы* (рисунок 6.29), например цифровые, которые могут быть одноразрядными (рисунок 6.29, в) и многоразрядными (рисунок 6.29, г). В сегментных знакосинтезирующих индикаторах каждый сегмент выполнен в виде отдельного светодиода. Для высвечивания цифр от нуля до девяти необходимо иметь, по меньшей мере, семь сегментов (рисунок 6.29, д).

Низкое напряжение питания, малые токи, миниатюрность, долговечность, высокое быстродействие – основные достоинства светодиодных индикаторов отображения информации.

Долгое время развитие светодиодов сдерживалось отсутствием приборов, излучающих в синем диапазоне. Попытки реализовать синие и зелёные светодиоды были связаны с использованием кристаллов нитрида галлия GaN и селенида цинка ZnSe.

У светодиодов на основе SiC оказался слишком мал КПД и низок квантовый выход излучения (то есть число излучённых квантов на одну рекомбинировавшую пару). У светодиодов на основе твёрдых растворов селенида цинка ZnSe квантовый выход был выше, но они перегревались из-за большого сопротивления и служили недолго. Оставалась надежда на нитриды.

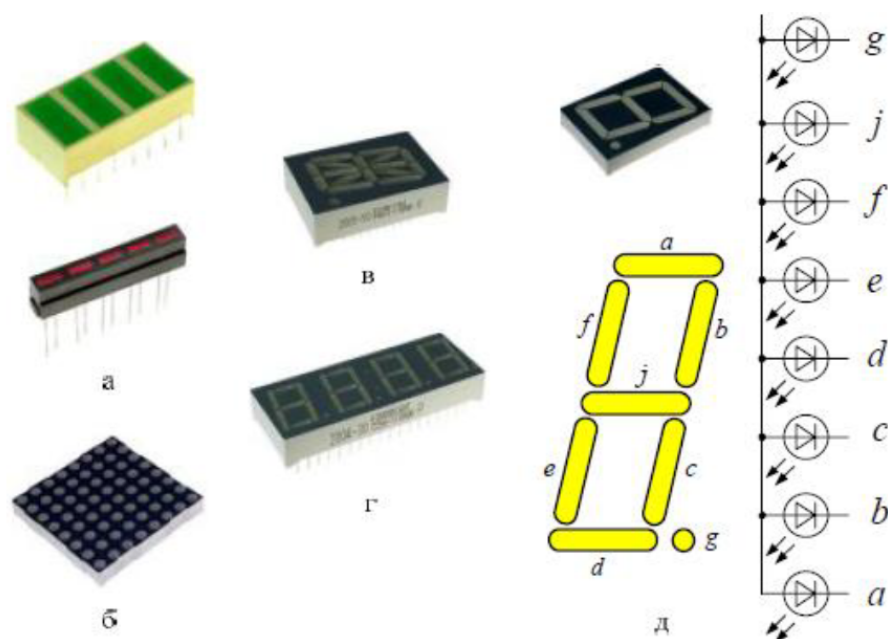


Рисунок 6.29 – Знакосинтезирующие индикаторы: линейные шкалы (а), светодиодная матрица (б), цифровые индикаторы (в, г, д)

Исследования свойств нитридов элементов группы III (AlN, GaN, InN) и их сплавов, представляющих собой широкозонные полупроводники с прямыми оптическими переходами, позволили заключить, что они являются наиболее перспективными материалами для изготовления светодиодов, излучающих во всей видимой и ультрафиолетовой (240...620 нм) областях спектра.

Основной причиной, препятствовавшей получению высококачественных пленок GaN, было отсутствие подходящих подложек, параметры решётки и коэффициент теплового расширения которых соответствовали бы GaN. Долгое время такие плёнки выращивали на сапфире (рассогласование решеток 13,5%), достоинствами которого являются лишь термическая стойкость и возможность очистки перед началом роста. Другая проблема – получение кристаллов *p*-типа. Первые работы в этом направлении были начаты ещё в 60е годы XX века, однако все попытки надёжно внедрить элементы группы II (Mg, Zn, Be) как примеси замещения, которые бы действовали как акцепторы, завершились неудачей.

Впоследствии, в разработке синих светодиодов участвовали отечественные и зарубежные ученые.

Первый коммерческий синий светодиод был сделан Шуджи Накамурой (*Shuji Nakamura*) (*Nichia Chemical Industries*, Япония) в начале 1994 года на основе гетероструктуры InGaN/AlGaIn с активным слоем InGaIn, легированным Zn (рисунок 6.30). Выходная мощность составляла 3 мВт при прямом токе

20 мА с квантовым выходом 5,4% на длине волны излучения 450 нм. Вскоре после этого за счёт увеличения концентрации In в активном слое был изготовлен зелёный светодиод, излучавший с силой света 2 кд. Он состоит из 3 нм активного слоя InGaN, заключённого между слоями p-AlGaN и n-GaN, выращенными на сапфире. Такой тонкий слой InGaN сводит к минимуму влияние рассогласования решёток: упругое напряжение в слое может быть снято без образования дислокаций и качество кристалла остаётся высоким. В 1995 году при ещё меньшей толщине слоя InGaN и более высоком содержании In удалось повысить силу света до 10 кд на длине волны 520 нм, а квантовую эффективность до 6,3%, причём измеренное время жизни светодиодов составляло 50000 ч, а по теоретическим оценкам – более 106 тысяч часов (~150 лет!).

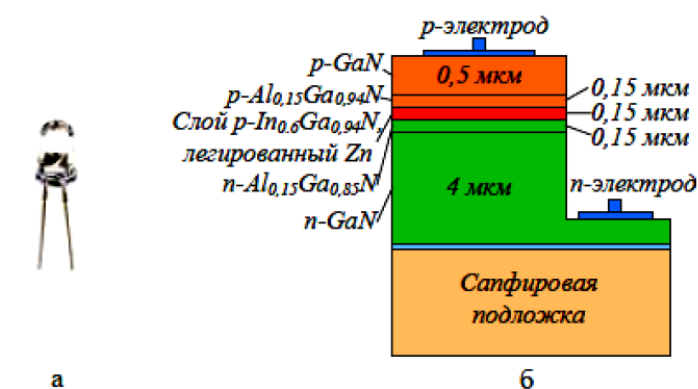


Рисунок 6.30 – Синий светодиод (а) на основе нитрида галлия и его структура (б)

На сегодняшний день внешний квантовый выход излучения светодиодов на основе GaN и его твёрдых растворов (InGaN, AlGaN) достиг значений 29/15/12% соответственно для фиолетовых/голубых/зелёных светодиодов; их светоотдача достигла значений 30...50 лм/Вт. Внутренний квантовый выход для «хороших» кристаллов с мощным теплоотводом достигает почти 100%, рекорд внешнего квантового выхода для красных светодиодов составляет 55%, а для синих 35%. Внешний квантовый выход излучения жёлтых и красных светодиодов на основе твёрдых растворов AlInGaP достиг значений 25...55%, а светоотдача соответственно достигла 100 лм/Вт, т. е. сравнялась со светоотдачей лучших современных люминесцентных ламп.

Создание синих светодиодов сделало возможным получение светодиодов белого свечения. Существует четыре способа получения белых светодиодов, каждый из которых имеет свои достоинства недостатки:

Смешение излучения светодиодов трёх или более цветов. На рисунке 6.31 белый свет получается путем смешивания в определённой пропорции излучения красного, зелёного и синего светодиодов.

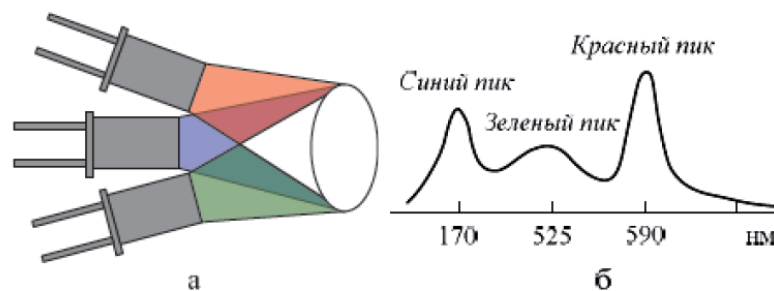


Рисунок 6.31 – Получение белого света путём смешивания излучения красного, синего и зелёного светодиодов

Для каждого из светодиодов можно подобрать значения тока, соответствующие максимуму его внешнего квантового выхода излучения (число излученных квантов на одну рекомбинировавшую пару «электрон – дырка»). Однако при этих токах и напряжениях интенсивности каждого цвета не будут соответствовать значениям, необходимым для создания белого цвета. Добиться этого можно путем изменения числа светодиодов каждого цвета, при этом источник состоит из многих диодов. На практике данный способ неудобен, т.к. необходимо иметь несколько источников различного напряжения, множество контактов, а также устройства, смешивающие и фокусирующие свет используемых светодиодов.

Смешение синего излучения светодиода с излучением жёлто-зелёного люминофора либо зелёного и красного люминофоров. Эти два способа наиболее простые в настоящее время наиболее экономичны. На рисунке 6.32 показано получение белого света при помощи кристалла синего светодиода и нанесённого на него слоя жёлтого люминофора. Состав кристалла подбирается так, чтобы его спектр излучения соответствовал спектрам возбуждения люминофоров. Люминофор наносится таким образом, что часть голубого излучения возбуждает люминофор, а часть проходила без поглощения. Толщина люминофора, форма держателя и пластикового купола подбираются так, чтобы излучение имело белое свечение в нужном телесном угле.

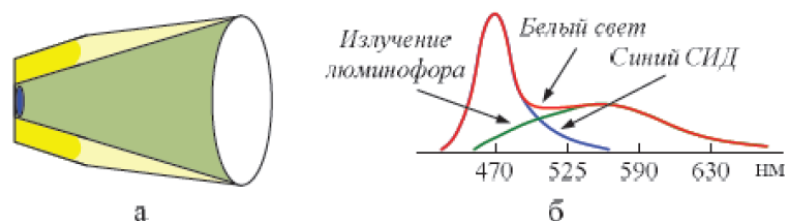


Рисунок 6.32 – Получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесённого на него слоя жёлтого люминофора

Смешение излучения трёх люминофоров (красного, зелёного и голубого), возбуждаемых ультрафиолетовым светодиодом (рис. 6.33). Данный способ использует технологии и материалы, которые разрабатывались для люминесцентных ламп. Однако этот способ связан с потерями энергии при преобразовании света от диода в люминофорах, а также эффективность источника излучения уменьшается, т.к. разные люминофоры имеют разные спектры возбуждения люминесценции (электромагнитное нетепловое излучение, обладающее длительностью, значительно превышающей период световых колебаний), не точно соответствующие ультрафиолетовому спектру излучения светодиода.

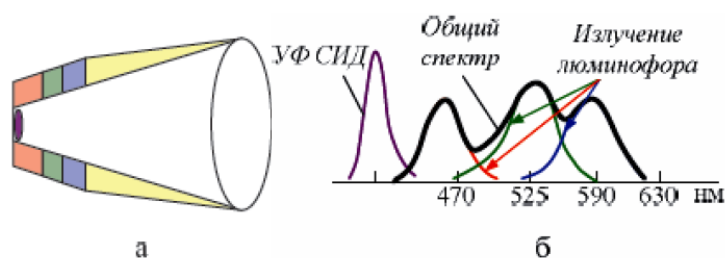


Рисунок 6.33 – Получение белого света с помощью ультрафиолетового светодиода и RGB-люминофора

Светоотдача (световой поток на единицу потребляемой мощности) белых светодиодов ниже, чем у светодиодов с узким спектром излучения, потому что в них происходит двойное преобразование энергии, часть её теряется в люминофоре. В настоящее время светоотдача лучших белых светодиодов (к примеру, рисунок 6.34) доходит до $65...75 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$.

Светодиоды кроме высокой светоотдачи, малого энергопотребления и возможности получения любого цвета излучения имеют и ряд других замечательных свойств.

Отсутствие нити накала благодаря нетепловой природе излучения светодиодов обуславливает длительный срок службы. Производители светодиодов декларируют срок службы до 100000 часов. У ламп накаливания средний срок службы составляет 1000 часов, у люминесцентных в большинстве случаев срок службы ограничивается 10...15000 ч. Отсутствие стеклянной колбы у светодиодов определяет очень высокую механическую прочность и надежность.

Малое тепловыделение и низкое питающее напряжение гарантируют высокий уровень безопасности, а безынерционность делает светодиоды незаменимыми, когда нужно высокое быстродействие. Сверхминиатюрность и встроенное светораспределение определяют другие, не менее важные достоинства. Световые приборы на основе светодиодов оказываются компактными и удобными в установке.

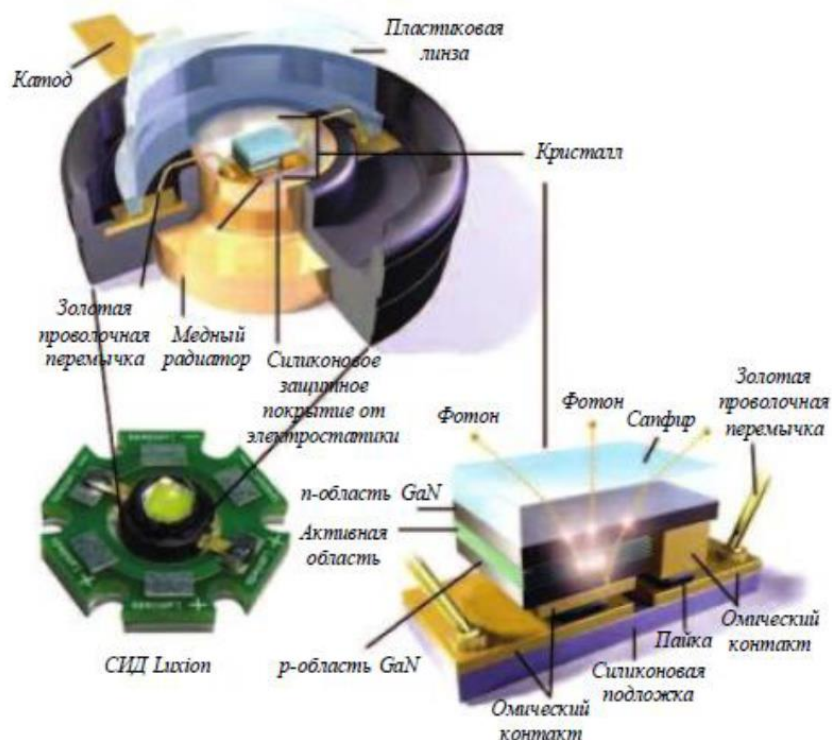


Рисунок 6.34 – Конструкция высокоэффективного светодиода белого света Luxion

Не следует забывать об экологичности светодиодов (отсутствии у них ртутьсодержащих компонентов по сравнению с люминесцентными лампами), а также отсутствии электромагнитных излучений и помех, что крайне важно в современных условиях ужесточения экологических норм.

Единственный недостаток светодиодов на сегодняшний день – их цена. Пока что один люмен, излучённый светодиодом, стоит в 100 раз выше, чем газосветная лампа.

Во всех устройствах, требующих передачи информации знаками определенного цвета: автодорожных и железнодорожных светофорах, панелях управления в автомобилях и самолетах, задних огнях автотранспорта, дорожных световых табло, фонарях аэродромных полос, цветовые характеристики светодиодов имеют существенные преимущества перед обычными лампами. Они не требуют цветных светофильтров; они лучше различимы глазом, поскольку близки к монохроматическим источникам света. Как источники «цветного» света светодиоды давно обогнали лампы накаливания со светофильтрами. Так, световая отдача лампы накаливания с красным светофильтром составляет всего 3 лм/Вт, в то время как красные светодиоды сегодня дают 50 лм/Вт и более.

6.4 Оптоэлектронные устройства

Элементами оптоэлектронных устройств являются фотоэлектронные приборы, рассмотренные выше, а связь между элементами не электрическая, а оптическая. Таким образом, в оптоэлектронных устройствах практически полностью устранена гальваническая связь между входными и выходными цепями и практически полностью устранена обратная связь между входом и выходом. Комбинируя элементы, входящие в оптоэлектронные устройства, можно получать самые различные их функциональные свойства. На рисунке 6.35 представлены конструкции различных оптронов.



Рисунок 6.35 – Конструкции оптронов

Простейшим оптоэлектронным устройством является оптрон.

Оптрон – это устройство, объединяющее в одном корпусе светодиод и приёмник фотоизлучения, например фотодиод (рис. 6.36).

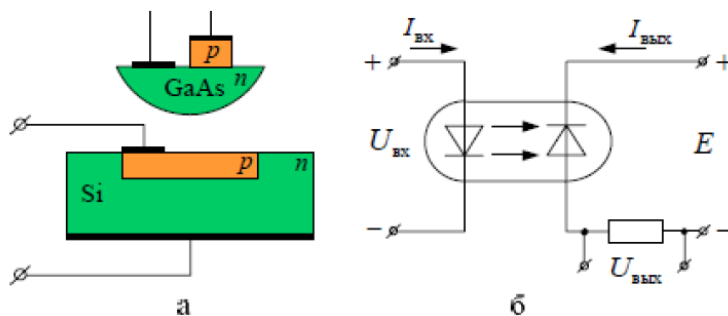


Рисунок 6.36 – Структура фотодиодного оптрона (а) и его схема включения (б)

Входной усиливаемый сигнал $U_{\text{вх}}$ поступает на светодиод и вызывает его свечение, которое по световому каналу поступает на фотодиод. Фотодиод открывается и в его цепи протекает ток под действием внешнего источника E . Эффективную оптическую связь между элементами оптрона осуществляют с помощью средств волоконной оптики – световодов, выполненных в виде жгута из тонких прозрачных нитей, по которым сигнал передаётся за счёт полного внутреннего отражения с минимальными потерями и с высокой разрешающей способностью. Вместо фотодиода в составе оптрона может быть фототранзистор, фототиристор, фоторезистор.

На рисунке 6.37 представлены условные графические обозначения таких приборов.

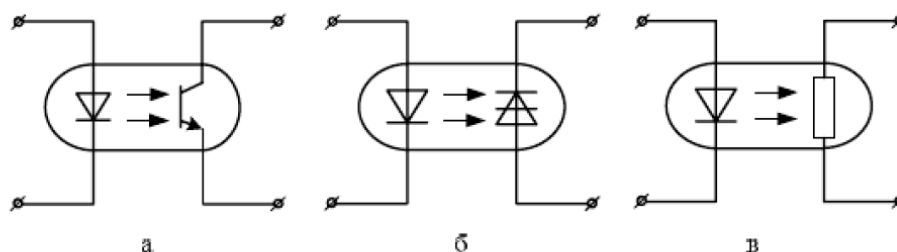


Рисунок 6.37 – Оптроны: транзисторный (а), тиристорный (б) и фоторезисторный (в)

Диодный оптрон используется в качестве ключа и может коммутировать ток с частотой $10^6 \dots 10^7$ Гц и имеет сопротивление между входной и выходной цепями – $10^{13} \dots 10^{15}$ Ом.

Транзисторные оптроны благодаря большей чувствительности фотоприемника экономичнее диодных. Однако быстродействие их меньше, максимальная частота коммутации обычно не превышает 10^5 Гц. Так же как и диодные, транзисторные оптроны имеют малое сопротивление в открытом состоянии и большое в закрытом и обеспечивают полную гальваническую развязку входных и выходных цепей.

Использование в качестве фотоприемника фототиристора позволяет увеличить импульс выходного тока до 5 А и более. При этом время включения составляет менее 10^{-5} с, а входной ток включения не превышает 10 мА. Такие оптроны позволяют управлять сильноточными устройствами различного назначения.

Выводы:

- 1 Работа оптоэлектронных приборов основана на принципе внутреннего фотоэффекта – генерации пары носителей заряда «электрон – дырка» под действием светового излучения.
- 2 Фотодиоды обладают линейной световой характеристикой.
- 3 Фототранзисторы имеют большую интегральную чувствительность, чем фотодиоды, благодаря усилению фототока.
- 4 Оптроны – оптоэлектронные приборы, в которых обеспечивается электрическая изоляция входных и выходных цепей.
- 5 Фотоумножители позволяют резко увеличить фототок за счёт применения вторичной электронной эмиссии.

Контрольные вопросы

1. Что такое внешний и внутренний фотоэффект?
2. Какими параметрами характеризуется фоторезистор?
3. Какие физические факторы влияют на световую характеристику фоторезистора при больших световых потоках?
4. Каковы отличия в свойствах фотодиода и фоторезистора?
5. Как в фотоэлементе происходит непосредственное преобразование световой энергии в электрическую?
6. Каковы отличия в принципе действия и свойствах фотодиода и биполярного фототранзистора?
7. Почему тиристор может управлять относительно большими мощностями, чем допустимая мощность рассеяния самого фототиристора?
8. Что такое оптопара?