

p-n-переход

p-n-переход (*p* — *positive* — положительный, дырочный, *n* — *negative* — отрицательный, электронный), или **электронно-дырочный переход** — область соприкосновения двух полупроводников *p*- и *n*-типа, в которой происходит переход от одного типа проводимости к другому. Электрические процессы в *p-n*-переходах являются основой работы полупроводниковых диодов, транзисторов и других электронных полупроводниковых приборов с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

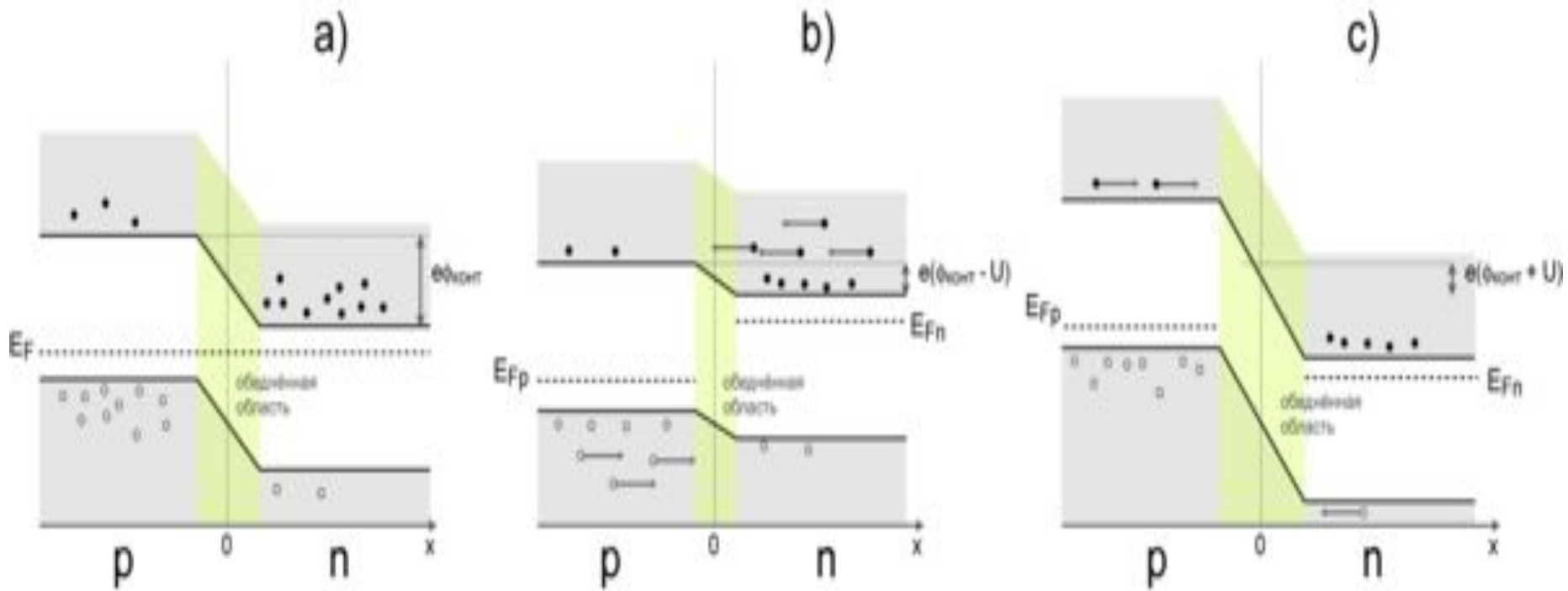


Рис.6. Энергетическая диаграмма *p-n*-перехода. а) Состояние равновесия; б) При приложенном прямом напряжении; в) При приложенном обратном напряжении

Области пространственного заряда

В полупроводнике р-типа концентрация [дырок](#) намного превышает концентрацию [электронов](#). В полупроводнике n-типа концентрация электронов намного превышает концентрацию дырок. Если между двумя такими полупроводниками установить контакт, то возникнет **диффузионный ток** — носители заряда, хаотично двигаясь, перетекают из той области, где их больше, в ту область, где их меньше. При такой диффузии электроны и дырки переносят с собой заряд. Как следствие, области вблизи границы р-n перехода приобретают [пространственный заряд](#). Область в полупроводнике р-типа, которая примыкает к границе раздела, получает дополнительный отрицательный заряд, приносимый электронами, а пограничная область в полупроводнике n-типа получает положительный заряд, приносимый дырками (точнее, уносимый электронами отрицательный заряд). Таким образом, на границе раздела образуются два слоя пространственного заряда противоположного знака.

Слои пространственного заряда порождают в переходе [электрическое поле](#), это поле вызывает **дрейфовый ток** в направлении, противоположном **диффузионному току**. В конце концов, между диффузионным и дрейфовым токами устанавливается [динамическое равновесие](#) и изменение объемных зарядов прекращается.

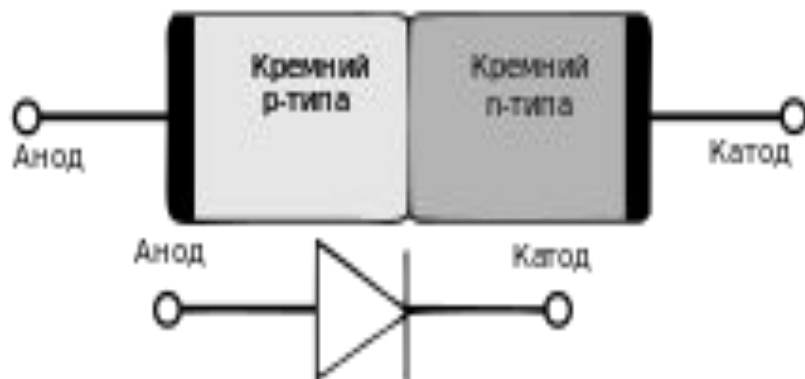


Рис. 7. Схема полупроводникового кремниевого диода. Ниже приведено его символическое изображение на электрических принципиальных схемах: анод - электрически положительный полюс, катод - электрически отрицательный полюс.

Если к слоям полупроводника приложить внешнее напряжение так, чтобы созданное им электрическое поле было направленным противоположно направлению электрического поля между областями пространственного заряда, то динамическое равновесие нарушается, и диффузионный ток преобладает над дрейфовым током, быстро нарастая с повышением напряжения. Такое подключение напряжения к р-n-переходу называется **прямым смещением**.

Если же внешнее напряжение приложено так, чтобы созданное им поле было одного направления с полем между областями пространства то это приведет лишь к увеличению толщины слоёв пространственного заряда, и ток через р-n-переход очень мал и определяется тепловой или фотонной генерацией пар электрон-дырка. Такое подключение напряжения к р-n-переходу называется **обратным смещением**.

Фотодиод. Принцип работы:

- При воздействии квантов излучения в базе (n-области) происходит генерация свободных носителей, которые устремляются к границе *p-n*-перехода. Ширина базы делается такой, чтобы дырки не успевали рекомбинировать до перехода в *p*-область. *Ток фотодиода определяется током неосновных носителей—дрейфовым током.* Быстродействие фотодиода определяется скоростью разделения носителей полем *p-n*-перехода и ёмкостью *p-n*-перехода C_{p-n}
- Фотодиод может работать в двух *режимах*:
- фотогальванический — без внешнего напряжения
- фотодиодный — с внешним обратным напряжением

Особенности:

- простота технологии изготовления и структуры
- сочетание высокой фоточувствительности и быстродействия
- малое сопротивление базы
- малая инерционность

- **Простейший фотодиод** представляет собой полупроводниковый диод, в котором обеспечивается возможность воздействия оптического излучения на р–n-переход. В равновесном состоянии, когда поток излучения полностью отсутствует, концентрация носителей, распределение потенциала и энергетическая зонная диаграмма фотодиода полностью соответствуют обычной р-n-структуре. При воздействии излучения в направлении, перпендикулярном плоскости р-n-перехода, в результате поглощения фотонов с энергией, большей, чем ширина запрещенной зоны, в n-области возникают электронно-дырочные пары. Эти электроны и дырки называют **фотоносителями**. При диффузии фотоносителей в глубь n-области основная доля электронов и дырок не успевает рекомбинировать и доходит до границы р–n-перехода. Здесь фотоносители разделяются электрическим полем р–n-перехода, причем дырки переходят в р-область, а электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы р–n-перехода и n-области. Таким образом, ток через р–n-переход обусловлен дрейфом неосновных носителей – дырок. Дрейфовый ток фотоносителей называется **фототоком**.

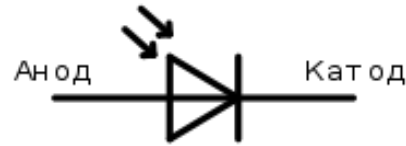
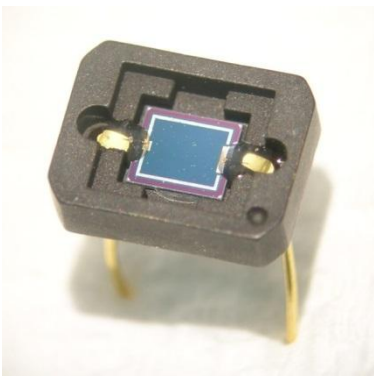


Рис. 8.
Фотодиод

- **Фотоносители – дырки** заряжают p-область положительно относительно n-области, а **фотоносители – электроны** – n-область отрицательно по отношению к p-области. Возникающая разность потенциалов называется фотоЭДС $E_{\text{ф}}$. Генерируемый ток в фотодиоде – обратный, он направлен от катода к аноду, причем его величина тем больше, чем больше освещенность.
- Фотодиоды могут работать в одном из двух режимов – без внешнего источника электрической энергии (режим фотогенератора) либо с внешним источником электрической энергии (режим фотопреобразователя).
- Фотодиоды, работающие в режиме фотогенератора, часто применяют в качестве источников питания, преобразующих энергию солнечного излучения в электрическую. Они называются **солнечными элементами** и входят в состав солнечных батарей, используемых на космических кораблях.
- КПД кремниевых солнечных элементов составляет около 20 %, а у пленочных солнечных элементов он может иметь значительно большее значение. Важными техническими параметрами солнечных батарей являются отношения их выходной мощности к массе и площади, занимаемой солнечной батареей. Эти параметры достигают значений 200 Вт/кг и 1 кВт/м², соответственно.

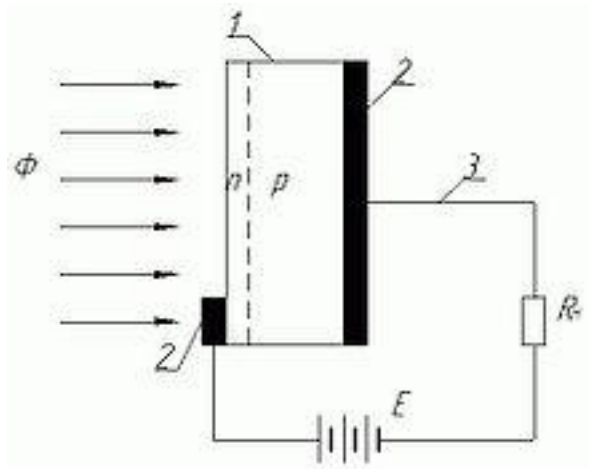


Рис.12. Структурная схема фотодиода.
 1 — кристалл полупроводника;
 2 — контакты;
 3 — выводы;
 Φ — поток электромагнитного излучения;
 E — источник постоянного тока; R_H — нагрузка.

***p-i-n* фотодиоды**

Фотодиод, работа которого основана на фотовольтаическом эффекте (разделение электронов и дырок в *p*-и *n*-области, за счёт чего образуется заряд и ЭДС), называется *солнечным элементом*.

Кроме *p-n* фотодиодов, существуют и *p-i-n* фотодиоды, в которых между слоями *p*- и *n*- находится слой нелегированного полупроводника *i*.
p-n и *p-i-n* фотодиоды только преобразуют свет в электрический ток, но не усиливают его, в отличие от лавинных фотодиодов и фототранзисторов.

Параметры и характеристики фотодиодов

Параметры:

чувствительность

отражает изменение электрического состояния на выходе фотодиода при подаче на вход единичного оптического сигнала. Количественно чувствительность измеряется отношением изменения электрической характеристики, снимаемой на выходе фотоприёмника, к световому потоку или потоку излучения, его вызвавшему.

— токовая чувствительность по световому потоку

— вольт-амперная чувствительность по энергетическому потоку

шумы

помимо полезного сигнала на выходе фотодиода появляется хаотический сигнал со случайной амплитудой и спектром — шум фотодиода. Он не позволяет регистрировать сколь угодно малые полезные сигналы.

Шум фотодиода складывается из шумов

полупроводникового материала и фотонного шума.

Характеристики:

- вольт-амперная характеристика (ВАХ) – зависимость выходного напряжения от входного тока.
- спектральные характеристики - зависимость фототока от длины волны падающего света на фотодиод. Она определяется со стороны больших длин волн шириной запрещенной зоны, при малых длинах волн большим показателем поглощения и увеличения влияния поверхностной рекомбинации носителей заряда с уменьшением длины волны квантов света. То есть коротковолновая граница чувствительности зависит от толщины базы и от скорости поверхностной рекомбинации. Положение максимума в спектральной характеристике фотодиода сильно зависит от степени роста коэффициента поглощения.
- световые характеристики - зависимость фототока от освещённости, соответствует прямой пропорциональности фототока от освещённости. Это обусловлено тем, что толщина базы фотодиода значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда. То есть практически все неосновные носители заряда, возникшие в базе, принимают участие в образовании фототока.
- постоянная времени - это время, в течение которого фототок фотодиода изменяется после освещения или после затемнения фотодиода в e раз (63 %) по отношению к установившемуся значению.
- Темновое сопротивление
- Сопротивление фотодиода в отсутствие освещения.
- Инерционность

Классификация

р-і-n фотодиод

В р-і-n структуре средняя і-область заключена между двумя областями противоположной проводимости. При достаточно большом напряжении оно пронизывает і-область, и свободные носители, появившееся за счет фотонов при облучении, ускоряются электрическим полем р-n переходов. Это дает выигрыш в быстродействии и чувствительности. Повышение быстродействия в р-і-n фотодиоде обусловлено тем, что процесс диффузии заменяется дрейфом электрических зарядов в сильном электрическом поле.

Фотодиод Шоттки (фотодиод с [барьером Шоттки](#))

Структура металл-полупроводник. При образовании структуры часть электронов перейдет из металла в полупроводник р-типа.

Лавинный фотодиод

В структуре используется [лавинный пробой](#). Он возникает тогда, когда энергия фотоносителей превышает энергию образования электронно-дырочных пар. Очень чувствительны. Для оценки существует коэффициент лавинного умножения

Фотодиод с гетероструктурой

Гетеропереходом называют слой, возникающий на границе двух полупроводников с разной шириной запрещённой зоны. Один слой р+ играет роль «приёмного окна». Заряды генерируются в центральной области. За счет подбора полупроводников с различной шириной запрещённой зоны можно перекрыть весь диапазон длин волн. *Недостаток* — сложность изготовления.