

# p–n-ПЕРЕХОД

Авторы: Э. М. Эпштейн

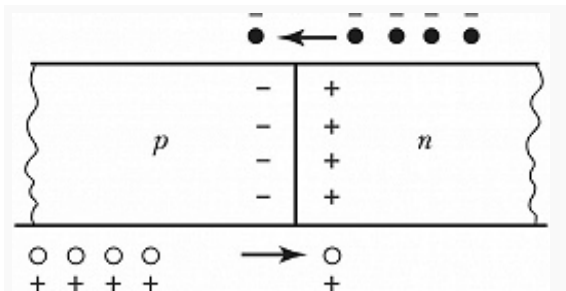


Рис. 1. Схема p–n-перехода:  
чёрные кружки – электроны;  
светлые кружки – дырки.

p-n-ПЕРЕХОД (электронно-дырочный переход), область полупроводника, в которой имеет место пространственное изменение типа электрич. проводимости (от электронной n к дырочной p). Поскольку в p-области p-n-П. концентрация дырок гораздо выше, чем в n-области, дырки из p-области стремятся диффундировать в n-область, а электроны – в p-область. После ухода дырок из p-области в ней остаются

отрицательно заряженные акцепторные атомы, а после ухода электронов в n-области остаются положительно заряженные донорные атомы. Т. к. акцепторные и донорные атомы неподвижны, то в области p-n-П. образуется двойной слой пространственного заряда – отрицательные заряды в p-области и положительные заряды в n-области (рис. 1). Возникающее при этом контактное электрич. поле противодействует диффузии свободных носителей заряда через p-n-П. В условиях теплового равновесия при отсутствии внешнего электрич. напряжения полный ток через p-n-П. равен нулю, т. к. в p-n-П. существует динамич. равновесие, при котором небольшой ток, создаваемый неосновными носителями (электронами в p-области и дырками в n-области), течёт к p–n-П. и проходит через него под действием контактного поля; равный по величине ток, создаваемый диффузией осн. носителей (электронов в n-области и дырок в p-области), протекает через p-n-П. в обратном направлении. При этом осн. носителям заряда приходится преодолевать контактное поле (потенциальный барьер). Разность потенциалов, возникающая между p- и n-областями из-за наличия контактного поля ([контактная разность потенциалов](#), или высота потенциального барьера), обычно составляет десятые доли вольта.

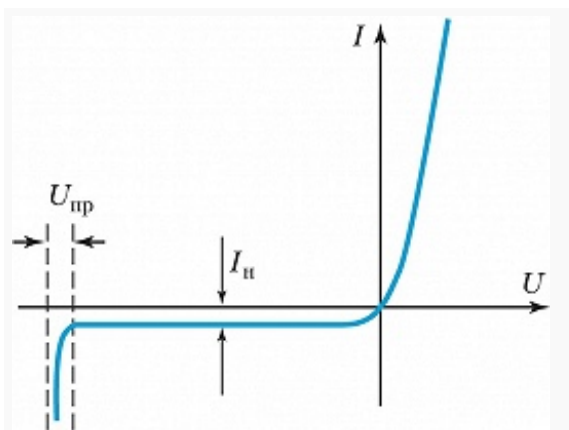


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика р-п-перехода:  $U$  – приложенное напряжение;  $I$  – ток через переход;  $I_n$  – ток насыщения;  $U_{пр}$  – напряжение пробоя.

Внешнее электрич. поле изменяет высоту потенциального барьера и нарушает равновесие потоков носителей заряда через него. При приложении положительного потенциала к р-области внешнее поле направлено против контактного, и потенциальный барьер понижается (прямое смещение). В этом случае с ростом приложенного напряжения экспоненциально возрастает число осн. носителей заряда, способных преодолеть потенциальный барьер. После прохождения р–п-П. эти носители становятся неосновными и их концентрация по

обе стороны р-п-П. увеличивается (инжекция неосновных носителей). Одновременно в р- и п-областях через контакты входят равные количества осн. носителей, вызывающих компенсацию зарядов инжектированных носителей. В результате возрастает скорость рекомбинации и появляется отличный от нуля ток через р-п-П., экспоненциально возрастающий с увеличением приложенного напряжения.

Приложение положительного потенциала к п-области (обратное смещение) приводит к повышению потенциального барьера. При этом диффузия осн. носителей через р-п-П. становится пренебрежимо малой. В то же время потоки неосновных носителей не изменяются (для них барьер не существует). Потоки неосновных носителей заряда определяются скоростью тепловой генерации электронно-дырочных пар, которые диффундируют к барьеру и разделяются его полем. В результате этого через р-п-П. течёт ток насыщения  $I_n$ , который обычно мал и почти не зависит от приложенного напряжения. Зависимость тока  $I$  через р-п-П. от приложенного напряжения  $U$  (вольт-амперная характеристика) обладает резко выраженной нелинейностью (рис. 2). При изменении знака  $U$  ток через р-п-П. может меняться в  $10^5$ - $10^6$  раз, благодаря чему р-п-П. является вентильным устройством, пригодным для выпрямления переменных токов (см. [Полупроводниковый диод](#)). Зависимость сопротивления р-п-П. от  $U$  позволяет использовать его в качестве регулируемого сопротивления ([варистора](#)).

При подаче на р-п-П. достаточно высокого обратного напряжения  $U=U_{пр}$  возникает электрич. пробой, при котором через переход течёт большой обратный ток (рис. 2). Различают: лавинный пробой, когда на длине свободного пробега в области объёмного заряда носитель приобретает энергию, достаточную для ионизации атомов кристаллич. решётки; туннельный (зинеровский) пробой, возникающий при туннелировании носителей сквозь барьер (см. [Туннельный эффект](#)); тепловой пробой, связанный с недостаточностью теплоотвода от р-п-П., работающего в режиме больших токов.

От приложенного напряжения зависит не только проводимость, но и электрич. ёмкость р-п-П. Действительно, повышение потенциального барьера при обратном смещении означает увеличение разности потенциалов между п- и р-областями полупроводника и, следовательно, увеличение их объёмных зарядов. Поскольку объёмные заряды неподвижны и связаны с кристаллич. решёткой ионами доноров и акцепторов, то увеличение объёмного заряда может быть обусловлено только расширением его области и, следовательно, уменьшением ёмкости р-п-П. При прямом смещении к ёмкости слоя объёмного заряда (зарядной ёмкости) добавляется т. н. диффузионная ёмкость, обусловленная увеличением концентрации носителей (изменением заряда) при увеличении напряжения на р-п-П. Зависимость ёмкости от приложенного напряжения позволяет использовать р-п-П. в качестве варактора или [варикапа](#).

Мн. применения р-п-П. основаны на зависимости контактной разности потенциалов и тока насыщения от концентрации неосновных носителей заряда, которая существенно изменяется при разл. внешних воздействиях (тепловых, механич., оптических и др.). На этом основано действие разл. датчиков (напр., датчиков темп-ры, давления, ионизирующих излучений). р-п-П. используют также для преобразования световой энергии в электрическую (см. [Солнечная батарея](#)). р-п-П. являются основой разл. полупроводниковых диодов, а также входят в качестве составных элементов в более сложные полупроводниковые приборы – транзисторы, тиристоры и др. Инжекция и последующая рекомбинация неосновных носителей в р-п-П. используются в [светоизлучающих диодах](#) и [инжекционных лазерах](#).

p-n-П. может быть создан: 1) в объёме одного и того же полупроводникового материала, легированного в одной части донорной примесью (p-область), а в другой – акцепторной (n-область); 2) на границе двух разл. полупроводников с разными типами проводимости (см. [Гетеропереход](#)); 3) вблизи контакта полупроводника с металлом, если ширина запрещённой зоны полупроводника меньше разности работ выхода полупроводника и металла; 4) приложением к поверхности полупроводника с электронной (дырочной) проводимостью достаточно большого отрицательного (положительного) потенциала, под действием которого у поверхности образуется область с дырочной (электронной) проводимостью (инверсный слой).

Если p-n-П. получают вплавлением примесей в монокристаллич. полупроводник (напр., акцепторной примеси в кристалл с проводимостью n-типа), то переход от n- к p-области происходит скачком (резкий p-n-П.). Если используется диффузия примесей, то образуется плавный p-n-П. Плавные p-n-П. можно получать и при выращивании монокристалла из расплава, в котором постепенно изменяют содержание и характер примесей. Создавать p-n-П. заданного профиля позволяет метод ионного внедрения примесных атомов.

## Литература

Лит. см. при ст. [Полупроводники](#).