

Материалы можно разделить на три вида:

- Проводники

В них тип связи металлическая, а зона проводимости и валентная зона пересекаются, что позволяет с легкостью выбивать электроны

- Полупроводники

В них тип связи ковалентная и ионная, но размер запрещенной зоны достаточно мал, чтобы перенести электрон из валентной зоны в зону проводимости без изменения структуры решетки

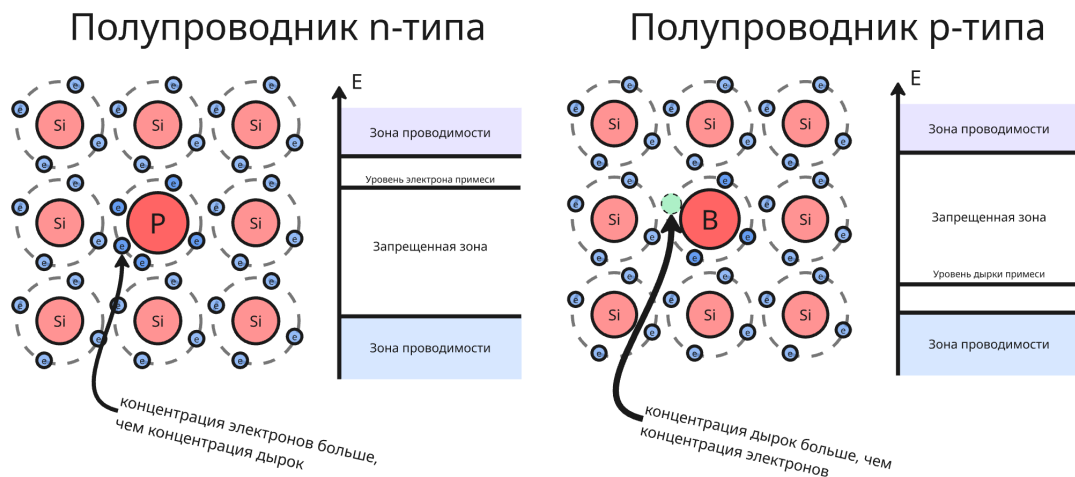
- Диэлектрики

В них тип связи ковалентная и ионная, но размер запрещенной зоны настолько большой, что при передачи огромной энергии электронам структура диэлектрика ломается из-за высоких температур

Полупроводники обладают важным свойством: с ростом температуры вероятность перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости возрастает. Это связано с тем, что тепловая энергия  $k_B T$  становится сопоставимой с шириной запрещённой зоны, и часть электронов получает возможность преодолеть энергетический зазор. В отличие от металлов, сопротивление полупроводников при нагреве уменьшается

Чтобы полупроводники могли проводить в комнатной температуре, в полупроводники, в основном состоящие из кремния, добавляют примеси – такой процесс называется легированием (или doping). Атомы примеси могут содержать больше электронов или места для электронов по сравнению с атомами полупроводников

Например, можно добавить в кристалл германия атом сурьмы, которые имеют больше валентных электронов (такие примеси называются донорными, а полупроводники – n-типа), а примесь индия даст больше дырок или незаполненные энергетические состояния, которые могут быть заняты электронами (такие называются акцепторными, а полупроводники p-типа) Названия полупроводников n-типа и p-типа происходят от слов negative и positive, несмотря на то, что заряд таких полупроводников нейтрален. В общем случае запрещенная зона у таких полупроводников уменьшается

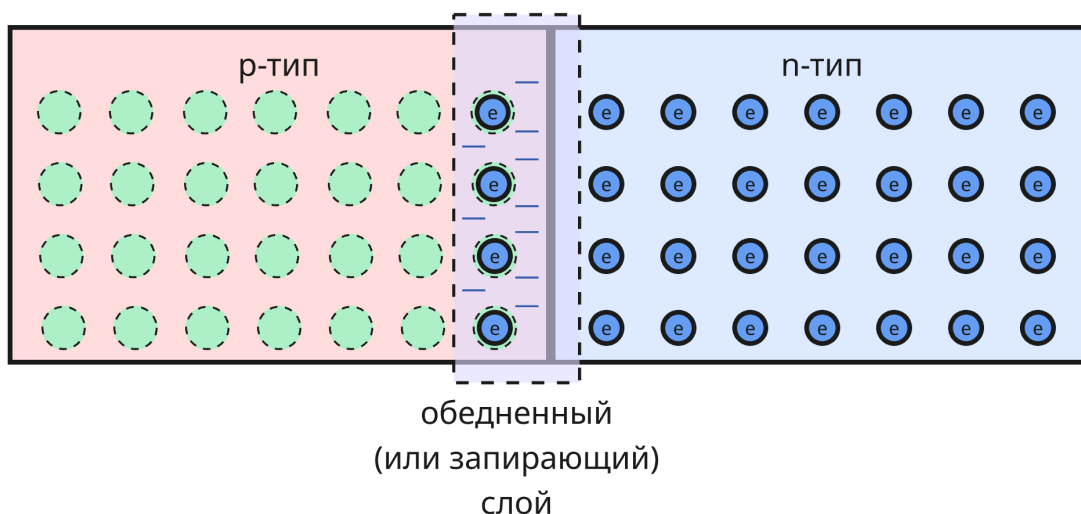


Однако можно добавлять примеси, которые увеличивают запрещенную зону. Благодаря этому можно сделать ее определенной ширины, чтобы переход электрона через запрещенную зону вызывал квант света определенной длины – так получается цветной светодиод

Или же наоборот, при направлении света на полупроводник происходит внутренний фотоэффект, электронов свободных становится больше, из-за чего сопротивление уменьшается – получился фоторезистор. Фоторезисторы производят из сульфида кадмия, сульфида цинка и селенида кадмия

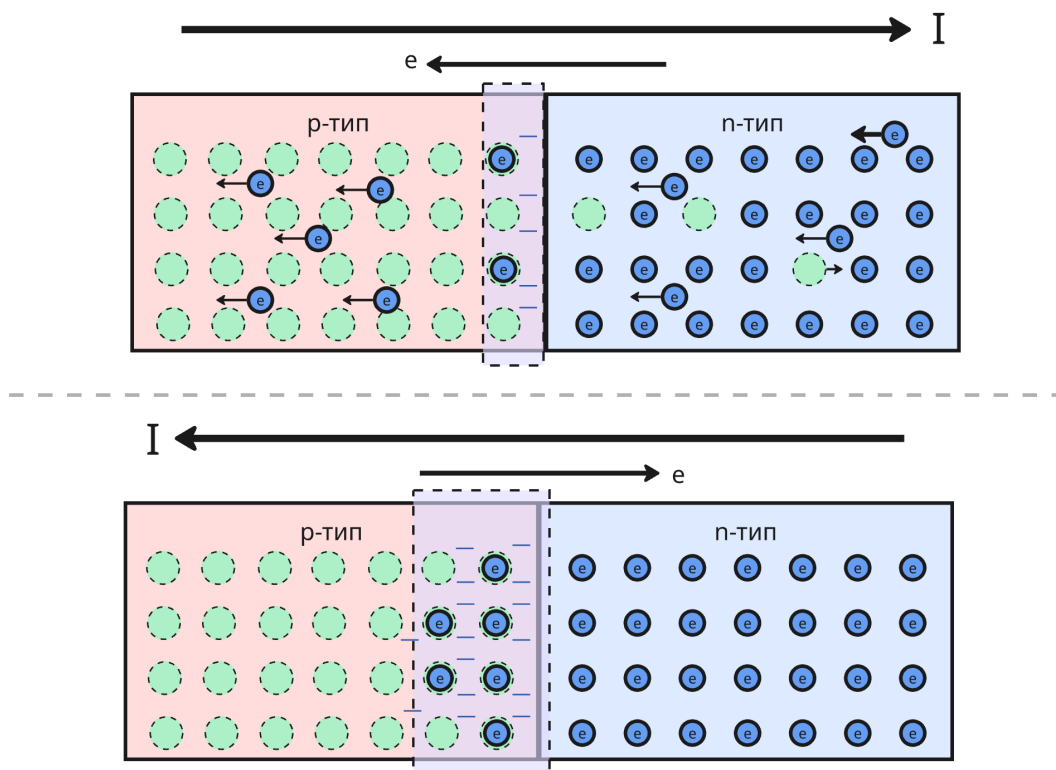
Объединяя полупроводники р-типа и n-типа, мы получаем р-n переход. В нем вблизи границы возникает обеднённый (или запирающий) слой, в котором отсутствуют свободные носители заряда и формируется внутреннее электрическое поле. Это поле препятствует дальнейшему перемещению электронов и дырок.

## р-n переход



Если к р-области подключить положительный полюс, а к n-области отрицательный (прямое включение), внешнее поле уменьшает потенциальный барьер. Обеднённый слой сужается, и электроны из n-области могут переходить через границу в р-область, где рекомбинируют с дырками. Аналогично дырки переходят в n-область. В этом режиме через р-n переход течёт большой ток

Если же подключить наоборот – положительный полюс к n-области, а отрицательный к р-области (обратное включение), внешнее поле увеличивает потенциальный барьер. Обеднённый слой расширяется, и основные носители не могут пройти через переход, а ток практически отсутствует



В результате р-n переход пропускает ток преимущественно в одном направлении, что лежит в основе работы полупроводникового диода. При достаточно большом обратном напряжении возможен пробой, и ток начинает протекать и в обратном направлении

р-n переходы используются не только в диодах, но и в солнечных батареях, где энергия света преобразуется в электрическую энергию за счёт разделения фотогенерированных электронов и дырок внутренним полем перехода

Главным образом на основе р-n переходов создаются и транзисторы. В биполярных транзисторах (Bipolar Junction Transistor, BJT) ток управляется за счёт инжекции носителей через два р-n перехода.

В полевых транзисторах (Field-Effect Transistor, FET) управление осуществляется электрическим полем, изменяющим концентрацию носителей в проводящем канале

Если длина затвора в полевом транзисторе становится очень малой (порядка нескольких нанометров), начинает существенно проявляться туннельный эффект. Электроны могут проходить через потенциальный барьер затвора с ненулевой вероятностью, даже если классически это запрещено. Это приводит к утечкам тока и нарушению нормальной работы транзистора, и именно по этой причине современная индустрия производства транзисторов пришла в ограничение по уменьшению размера транзистора

Современные транзисторы изготавливаются с применением сложных технологических процессов: выращивание монокристалла кремния, получение тонких пластин, нанесение защитных слоёв, использование фоторезиста, фотолитография, травление, легирование, формирование контактов, разрезание пластин на отдельные чипы и их упаковка

На современном этапе уменьшение размеров транзисторов перестало приводить к их удешевлению. Напротив, дальнейшая миниатюризация требует всё более сложных и дорогих технологий, что приводит к росту стоимости одного транзистора