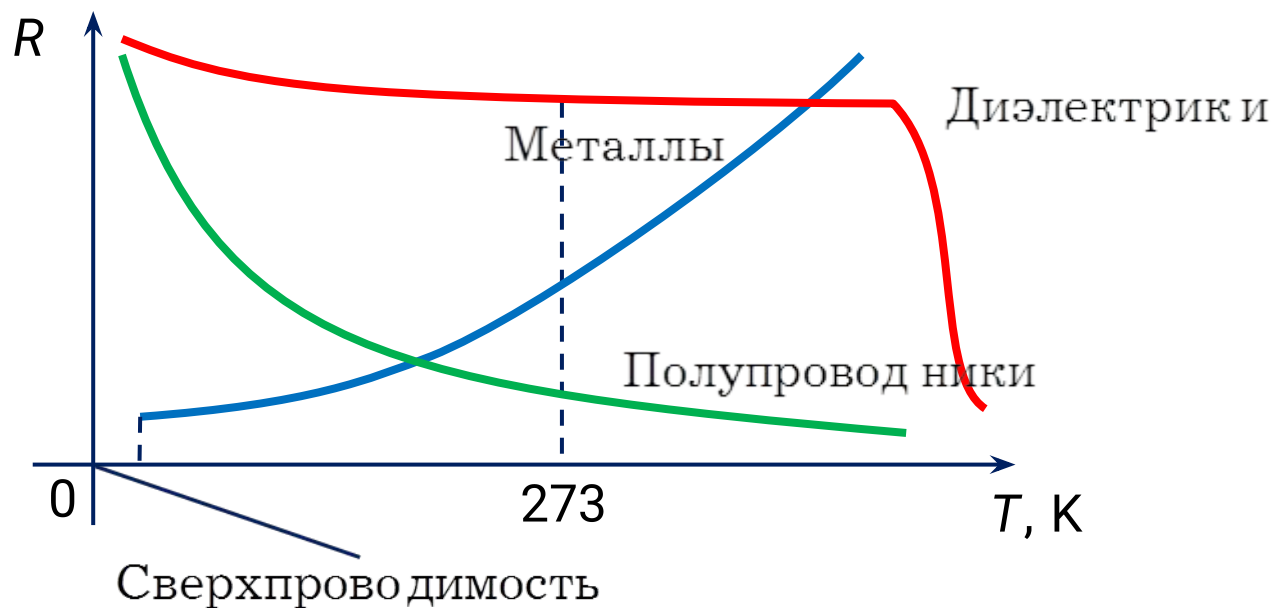




# Токи в полупроводниках

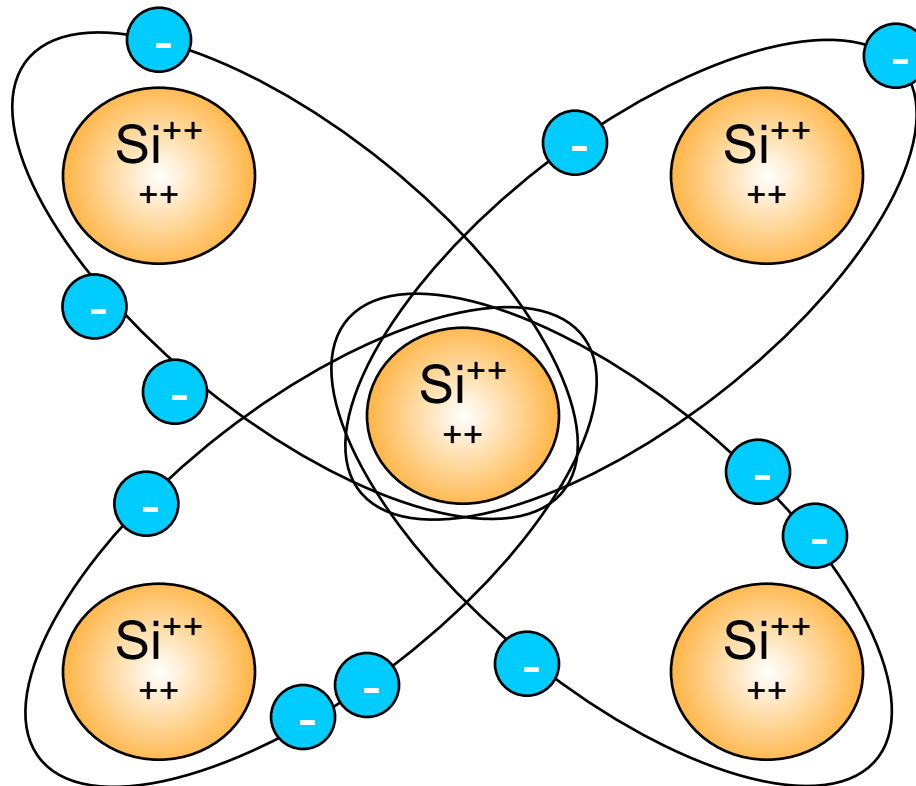
- По способности проводить электрический ток полупроводники занимают промежуточное положение между диэлектриками и проводниками
- Однако главное отличие полупроводников от металлов и диэлектриков — в характере электрической проводимости при различных температурах



- Полупроводники при низких температурах являются диэлектриками, а при высоких — проводниками
- Другое сильное отличие полупроводников от металлов — введение примесей (атомов других веществ) даже в малых количествах резко меняет их электрические свойства
- Наиболее широко используемыми полупроводниками являются **кремний** и **германий**



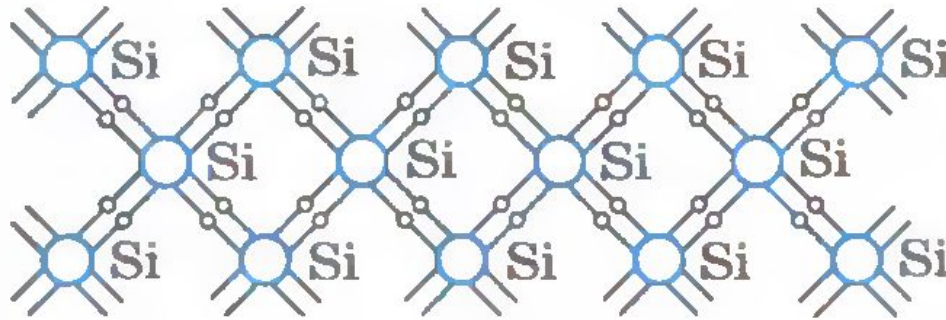
- ▣ Особенная проводимость полупроводников обусловлена их внутренним атомарным строением
- ▣ Например, кремний — 4-валентный химический элемент
- ▣ Это значит, что каждый атом имеет во внешнем электронном слое по 4 электрона



- ▣ С помощью 4-х валентных электронов атом образует 4 парноэлектронные (**ковалентные**) связи с соседними атомами
- ▣ По сути валентные электроны являются «общественными»



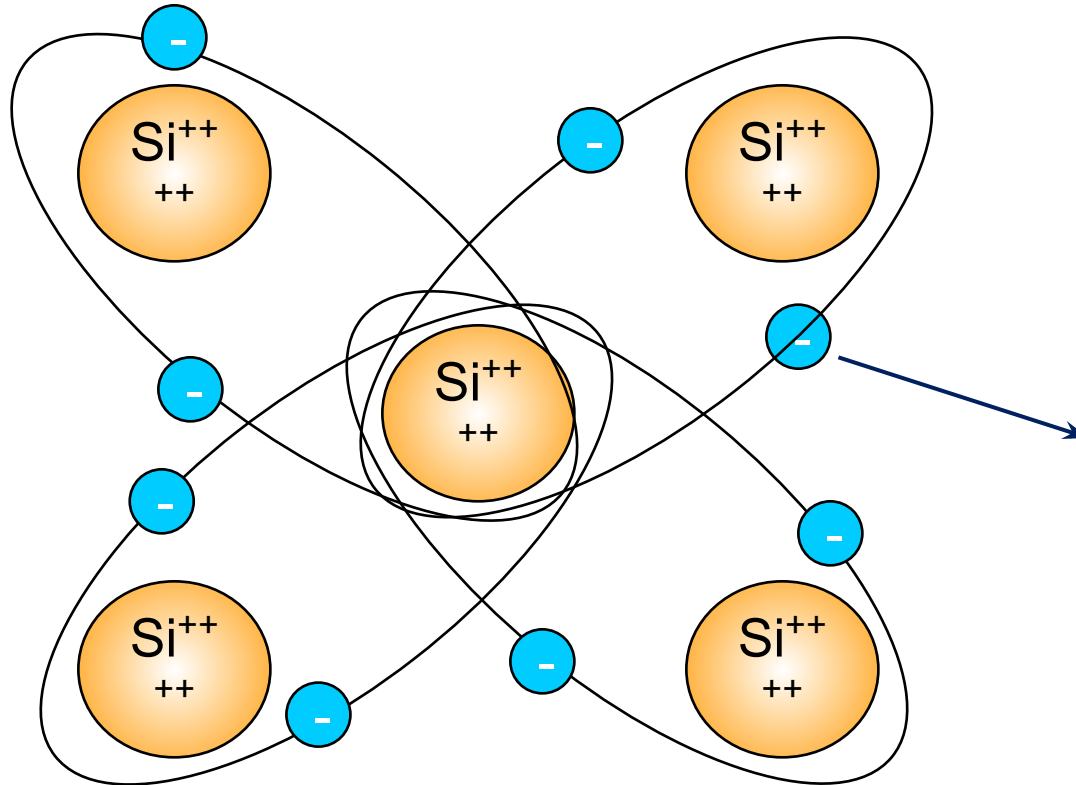
- Ковалентные связи между атомами выстраивают их в кристаллическую структуру

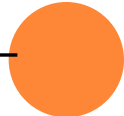


- Такая правильная структура сохраняется при достаточно низких температурах, близких к абсолютному нулю (пока энергия тепловых колебаний атомов маленькая)
- Хотя валентные электроны могут «путешествовать» по всему объему кристалла, но в данный момент времени они всегда «привязаны» к определенному атому
- Суммарное движение валентных электронов не может привести к переносу заряда через поперечное сечение полупроводника
- Так как свободных зарядов в кристалле полупроводника при низких температурах нет, то он — диэлектрик
- Однако все меняется при достаточном повышении температуры

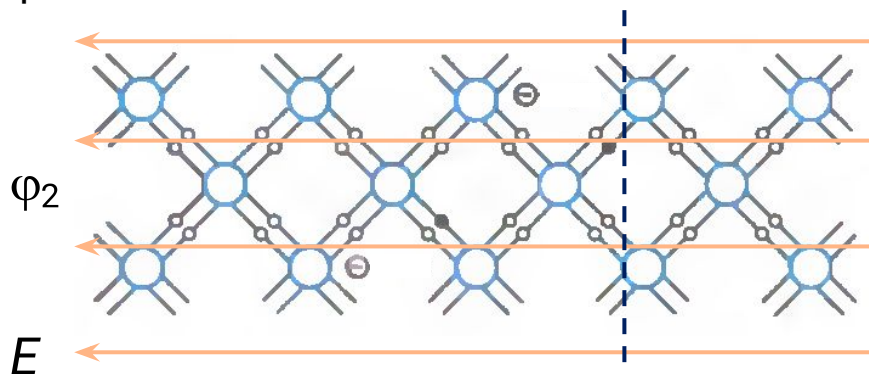


- Повышение температуры кристалла полупроводника приводит к увеличению энергии валентных электронов до такой степени, что некоторые из них могут оторваться от «своих» (в данный момент) атомов и оказаться в межузловом пространстве кристаллической решетки



- Таким образом, при повышении температуры появляются **свободные электроны** (в настоящем смысле этого слова)
- Чем больше температура, тем больше оказывается свободных электронов —  полупроводник постепенно становится проводником

- При наложении внешнего электрического поля (при подключении к источнику тока) свободные электроны теперь могут образовывать электрический ток



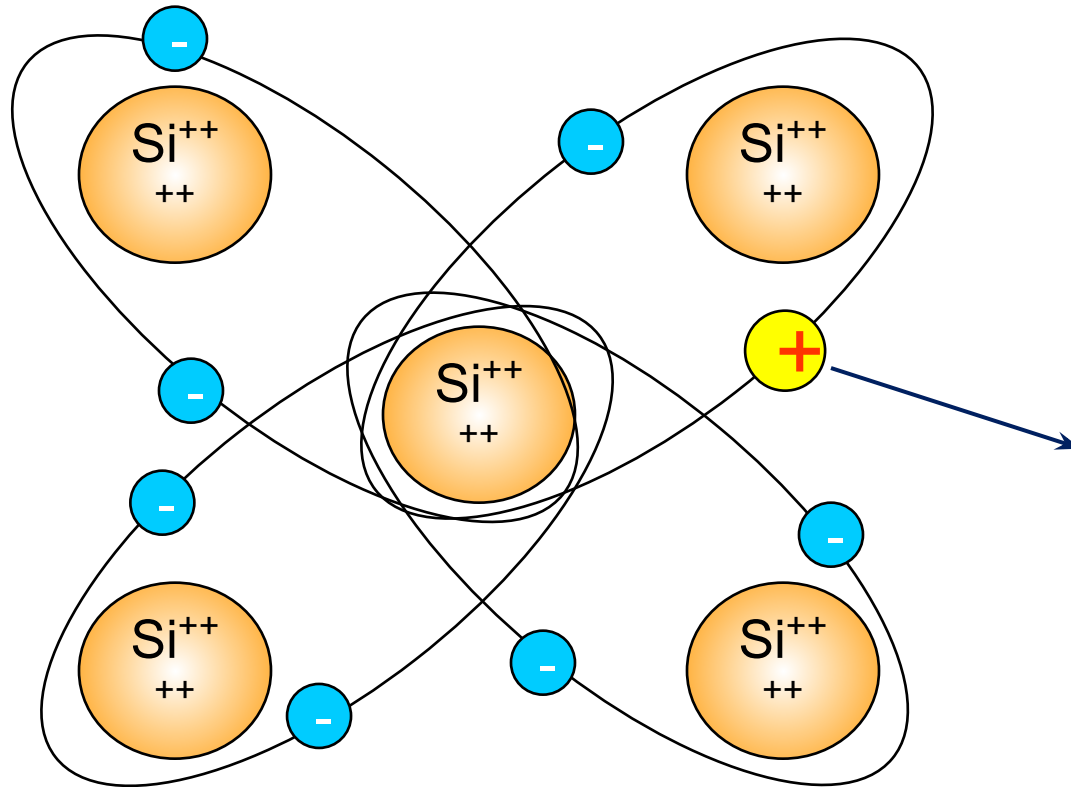
$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}$$

- Чем выше температура, тем больше свободных электронов, тем больше сила тока при неизменном напряжении на концах полупроводника
- Для нас это эквивалентно следующему: **сопротивление полупроводника при повышении температуры уменьшается**
- «Освободить» электроны можно не только энергией теплового движения (нагреванием), но и энергией падающего на полупроводник света — это явление называется **внутренним фотоэффектом** полупроводников
- На использовании внутреннего фотоэффекта работают световые источники тока — **фотоэлементы**
- Проводимость полупроводников, обусловленная движением освобожденных электронов, называется **электронной проводимостью полупроводников**



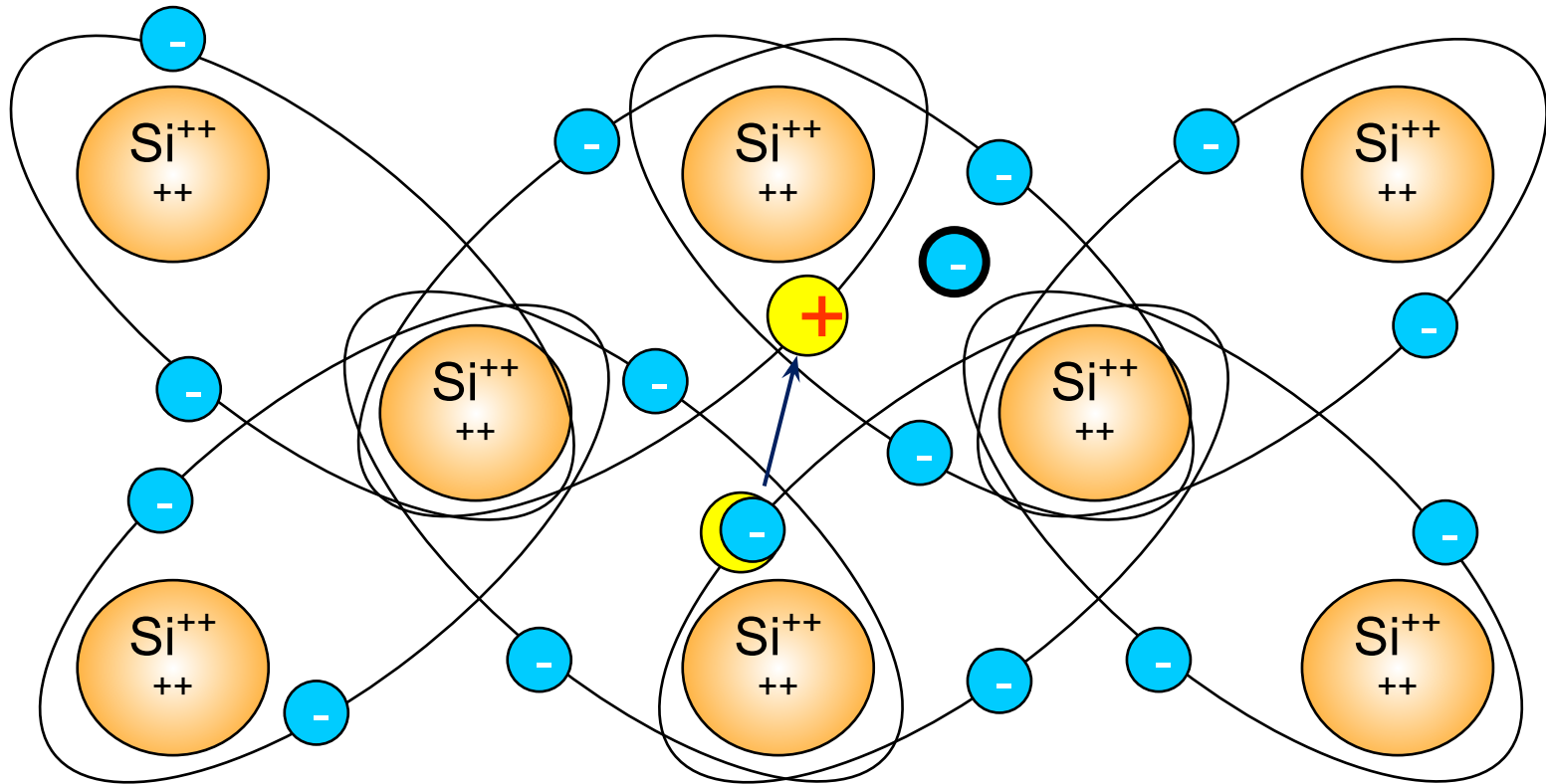
- Но и полупроводников есть и другой (параллельный электронному) механизм проводимости
- В целом полупроводник всегда остается электрически нейтральным, т.е. сколько в данной области полупроводника положительных зарядов, столько же и отрицательных
- Поэтому в том месте, откуда вырвался отрицательный электрон, образуется область с избытком положительных зарядов



- Это пустое место с положительным зарядом называется **вакансией** или **дыркой** (от англ. *hole* — дыра, пустое место)



- Дырка может быть занята любым соседним валентным электроном

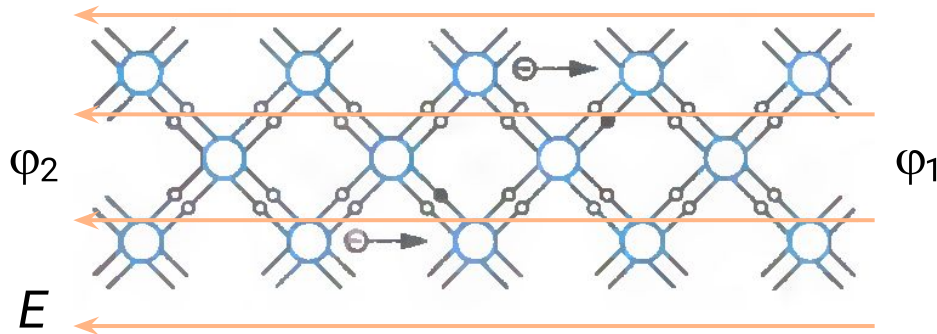


- Но на месте валентного электрона, перескочившего в дырку, образуется новая дырка, которую опять может занять любой из соседних валентных электронов
- Для нас это эквивалентно блужданию дырки по объему полупроводника, т. е. **дырка — это свободная положительная заряженная частица**
- Таким образом, в паре со свободным электроном автоматически возникает свободная положительная дырка, которая тоже может перемещаться по всему объему полупроводника





- При приложении внешнего электрического поля дырки начнут перемещаться по направлению поля (хотя на самом деле это валентные электроны перескакивают от одной дырки к другой против направления поля)



- Число дырок в химически чистом полупроводнике равно числу освободившихся электронов
- Значит, чем выше температура, тем больше и дырок
- Проводимость полупроводников, обусловленная движением дырок (на самом деле — движением валентных электронов), называется **дырочной проводимостью полупроводника**
- Скорость упорядоченного перемещения дырок всегда меньше скорости упорядоченного движения свободных электронов
- Таким образом, электрическая **проводимость полупроводников — это сумма электронной и дырочной проводимостей, сильно зависящая от температуры** (и этим они резко отличаются от металлов, в которых только электронная проводимость, слабо зависящая от температуры)



□ Сумма электронной и дырочной проводимостей химически чистых (без примесей) полупроводников называется **собственной проводимостью полупроводников** (как бы проводимость обеспечивается только собственными средствами и возможностями — ничего чужого)

□ Сами чистые химически чистые полупроводники называются **собственными полупроводниками**

□ Концентрация свободных электронов и дырок в обычных условиях у собственных полупроводников достаточно низкая для технического применения

□ Например, для чистого кремния:

$$T = 300 \text{ К} \quad - \quad n \sim 10^{17} \text{ м}^{-3} \quad (\text{у металлов} - n \sim 10^{28} \text{ м}^{-3})$$

$$T = 700 \text{ К} \quad - \quad n \sim 10^{24} \text{ м}^{-3}$$

□ Поэтому химически чистые полупроводники практически не нашли технического применения

□ Для технического применения полупроводники искусственно обогащают свободными зарядами с помощью введения примесей

□ Введение примесей надо понимать в химическом смысле, т.е. атомы примесей должны каким-то образом встроиться в кристаллическую решетку и образовать связи с атомами полупроводника

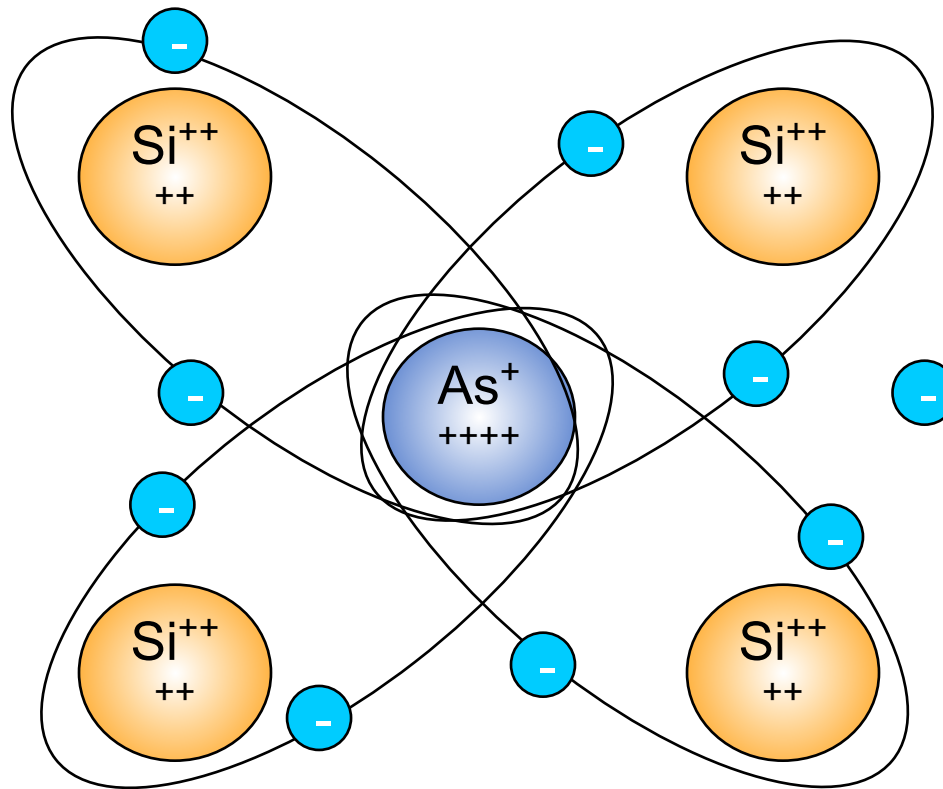
□ Проводимость полупроводников, обусловленная введением примесей (дополнительно к собственной проводимости), называется **примесной проводимостью полупроводников**, а сами полупроводники — **примесными полупроводниками**



- Химически существуют две возможности для обогащения свободных зарядов в полупроводниках:
  - увеличить количество свободных электронов
  - увеличить количество дырок



- Для увеличения числа свободных электронов в полупроводнике в него вводится примесь, у которого атомы имеют валентных электронов больше, чем атомы полупроводника, например, пятивалентный мышьяк



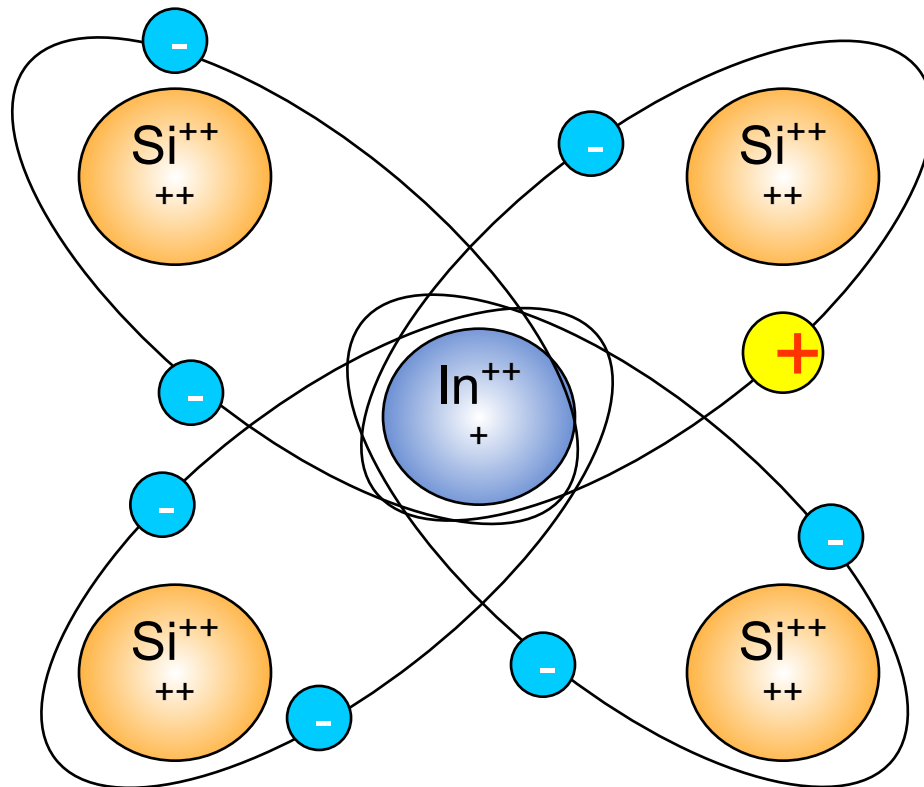
- Оставшийся лишним после образования ковалентных связей валентный электрон примеси становится свободным
- Примесь в этом случае называется **донорной** (или просто **донором**)



- За счет введения донорной примеси число свободных электронов при обычных температурах будет намного больше, чем дырок (т.е. с точки зрения электронной проводимости он становится аналогом металла)
- Примесный полупроводник с преобладанием электронной проводимости называется **полупроводником  $n$ -типа** (от англ. *negative* — отрицательный)
- Дырочная проводимость в полупроводнике  $n$ -типа тоже есть, но она не играет заметной роли в силу ее малости по сравнению с электронной проводимостью
- Поэтому электронную проводимость в полупроводнике  $n$ -типа называют **основной проводимостью**, а дырочную — **неосновной**
- Соответственно электроны называются **основными носителями заряда**, а дырки — **неосновными носителями заряда**



- Для увеличения числа дырок в полупроводнике в него вводится примесь, у которого атомы имеют валентных электронов меньше, чем атомы полупроводника, например, трехвалентный индий



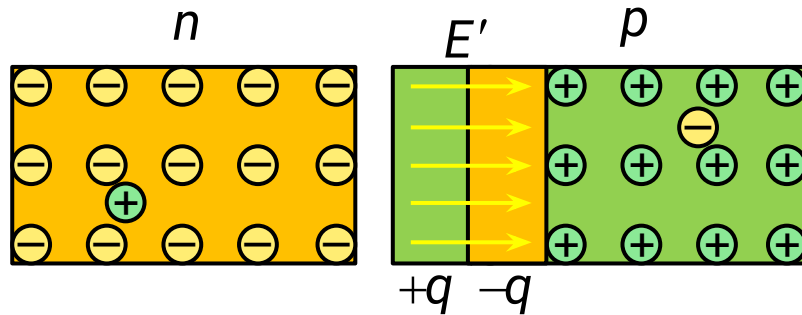
- Для образования всех ковалентных связей у атома примеси не хватает одного валентного электрона, поэтому в ковалентной связи образуется дырка
- Примесь в этом случае называется **акцепторной** (или просто **акцептором**)



- За счет введения акцепторной примеси число дырок при обычных температурах будет намного больше, чем свободных электронов
- Примесный полупроводник с преобладанием дырочной проводимости называется **полупроводником  $p$ -типа** (от англ. *positive* — положительный)
- Электронная проводимость в полупроводнике  $p$ -типа тоже есть, но она не играет заметной роли в силу ее малости по сравнению с дырочной проводимостью
- Поэтому дырочная проводимость в полупроводнике  $p$ -типа является **основной проводимостью**, а электронная — **неосновной**
- Примесные полупроводники  $n$ - и  $p$ -типа нашли широкое применение в технике



- Наиболее частое применение полупроводников  $n$ - и  $p$ -типа — это их совместное использование
- Для этого их приводят в контакт друг с другом (в химическом, а не в механическом смысле)

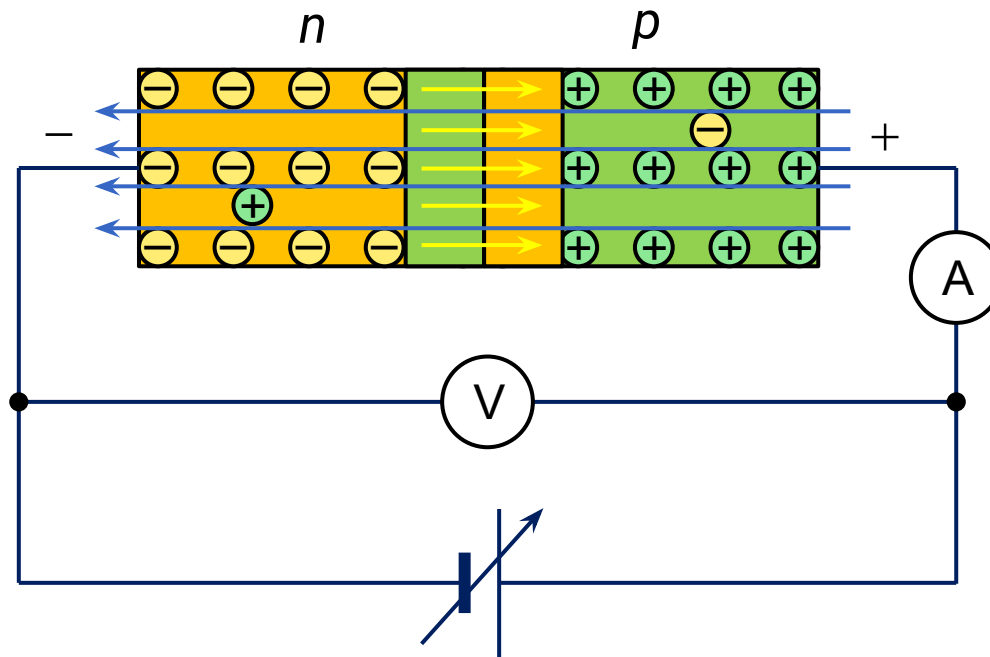


- За счет диффузии свободные электроны из полупроводника  $n$ -типа начнут проникать в полупроводник  $p$ -типа, а дырки из полупроводника  $p$ -типа — в полупроводник  $n$ -типа
- В результате в приграничных слоях контакта свободные электроны и дырки компенсируют друг друга
- При этом в приграничном слое  $n$ -полупроводника возникнет недостаток электронов, а в приграничном слое  $p$ -полупроводника — недостаток дырок
- Значит, в этих слоях появятся заряды противоположного знака
- Электрическое поле этих зарядов противодействует дальнейшему переходу основных зарядов — появится **запирающий слой** (или  **$p$ - $n$ -переход**)
- Электрическое поле в  $p$ - $n$ -переходе называется **запирающим полем**





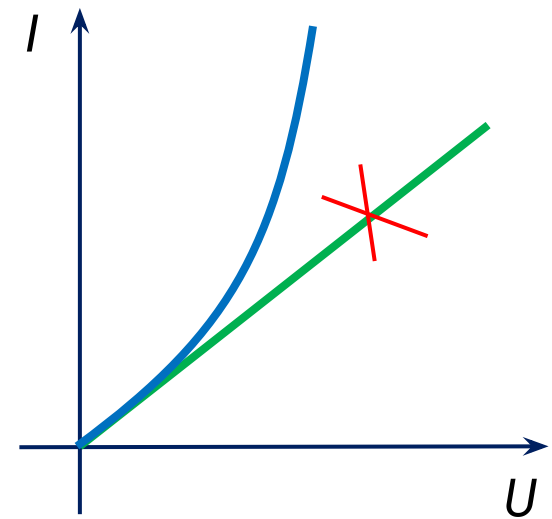
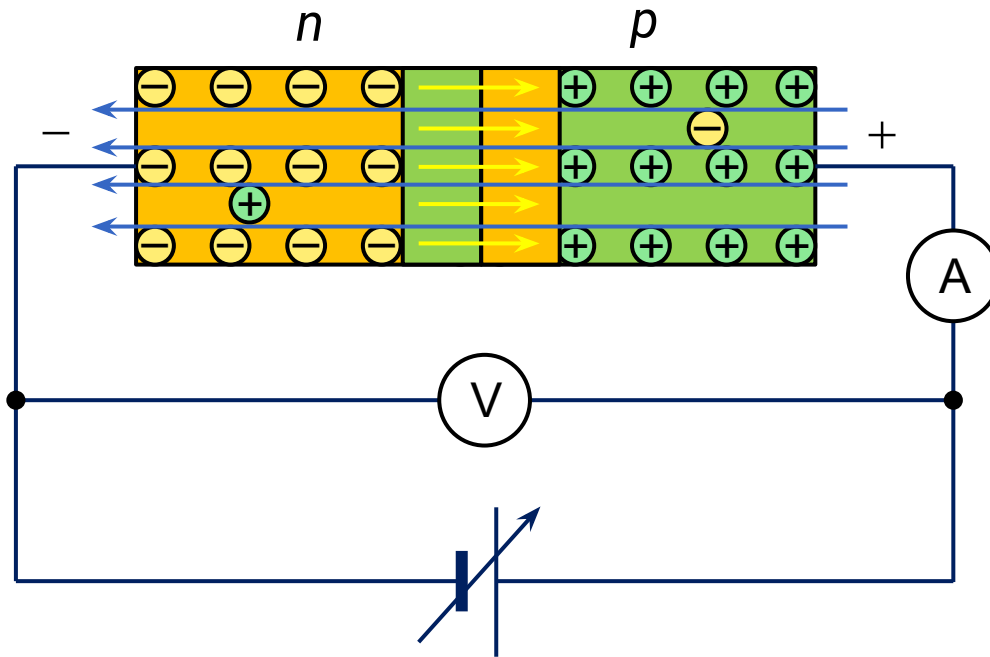
- Включим  $p$ - $n$ -переход в электрическую цепь так, чтобы  $p$ -область была подсоединена к положительному полюсу источника тока, а  $n$ -область — к отрицательному (**прямое включение  $p$ - $n$ -перехода**)



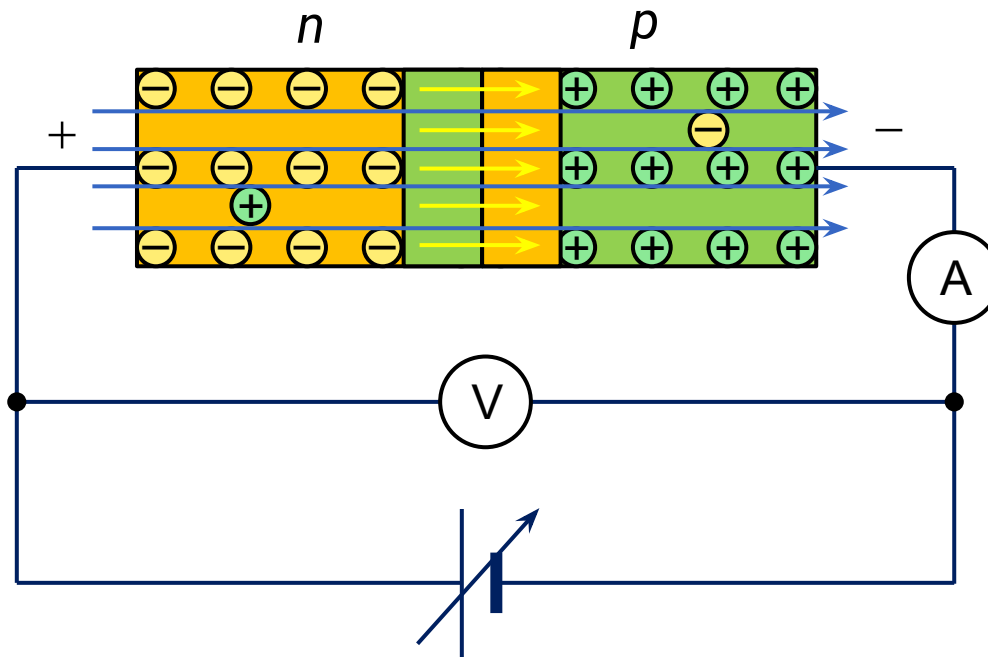
- Внешнее электрическое поле (созданного источником тока) будет частично компенсировать запирающее поле и его противодействие переходу основных носителей полупроводников ослабится
- К тому же внешнее поле будет «подгонять» основные носители зарядов полупроводников к переходу через запирающий слой
- Все это приведет к **большой силе тока** через запирающий слой
- Для нас это будет восприниматься как **маленькое сопротивление  $p$ - $n$ -перехода при прямом его включении**



- Если постепенно повышать напряжение на  $p$ - $n$ -переходе, то из-за двойного эффекта (ослабление запирающего поля и принуждение основных носителей к переходу через  $p$ - $n$ -переход) зависимость силы тока от напряжения не будет подчиняться закону Ома для участка цепи



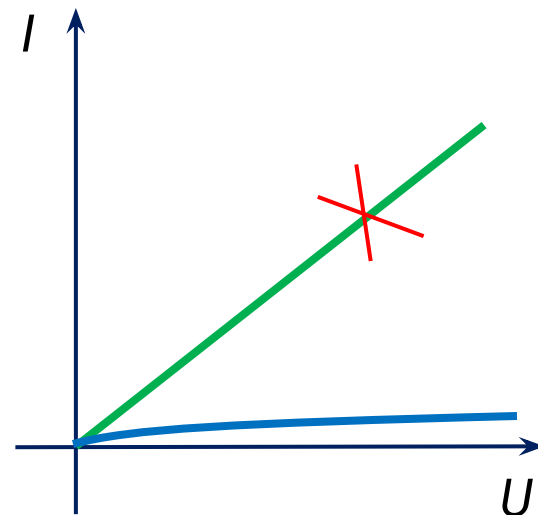
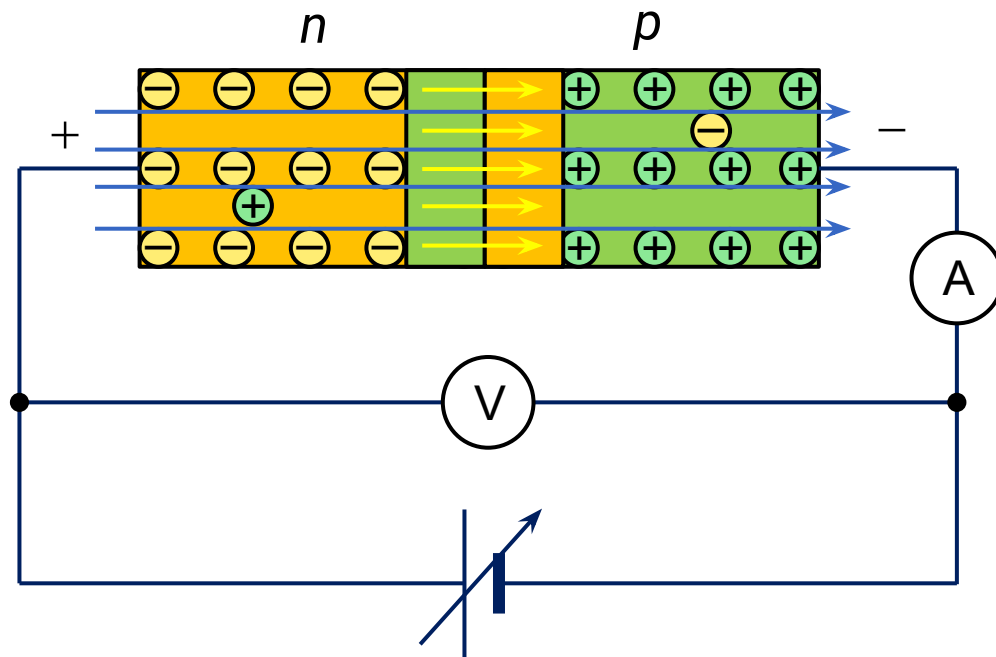
- Включим  $p$ - $n$ -переход в электрическую цепь так, чтобы  $p$ -область была подсоединена к отрицательному полюсу источника тока, а  $n$ -область — к положительному (**обратное включение  $p$ - $n$ -перехода**)



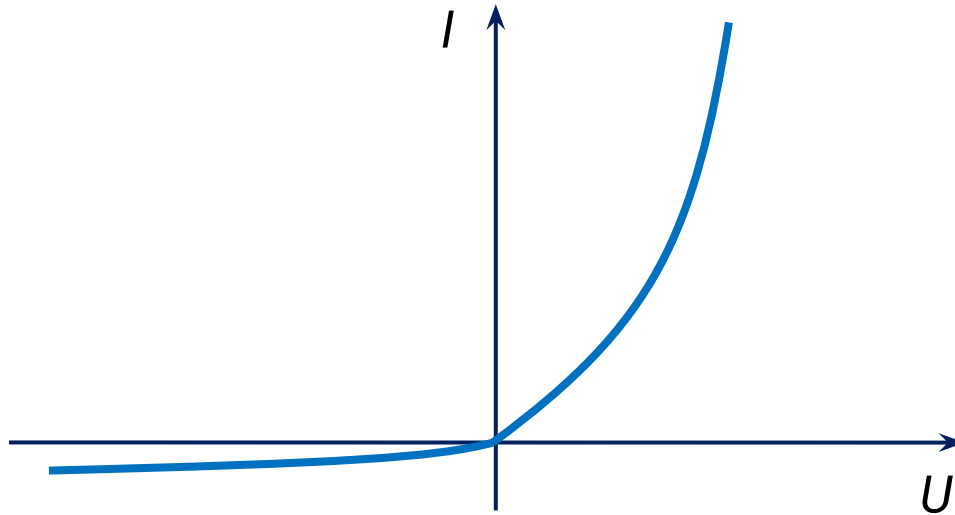
- Внешнее электрическое поле (созданного источником тока) будет еще больше усиливать запирающее поле перехода и его противодействие переходу основных носителей полупроводников усилится
- Внешнее поле будет «подгонять» к переходу через запирающий слой неосновные заряды полупроводников, которых очень мало
- Все этой приведет к **очень малой силе тока** через запирающий слой
- Для нас это будет восприниматься как **очень большое сопротивление  $p$ - $n$ -перехода при обратном его включении**



- Если постепенно повышать напряжение на  $p$ - $n$ -переходе, то из-за того, что неосновных зарядов очень мало и уже при маленьком напряжении все они участвуют в переходе через запирающий слой, зависимость силы тока от напряжения тоже не будет подчиняться закону Ома для участка цепи



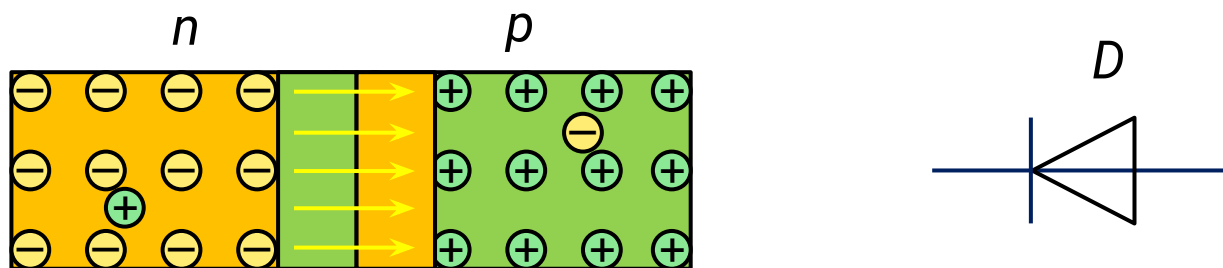
- Если совместить обе зависимости силы тока от напряжения на одном графике, считая напряжение обратного включения  $p$ - $n$ -перехода отрицательным, то получится **вольтамперная характеристика (ВАХ)  $p$ - $n$ -перехода**



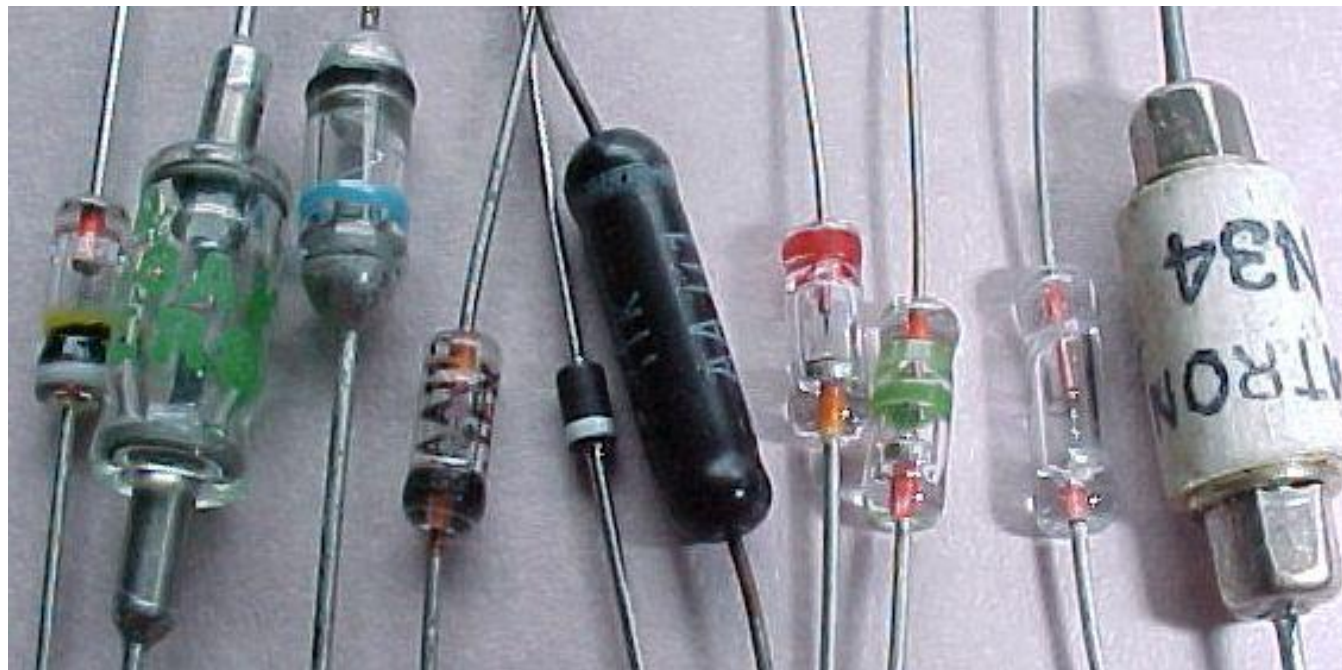
- Обратный ток во много раз меньше прямого тока, поэтому говорят, что  $p$ - $n$ -переход обладает **односторонней проводимостью**



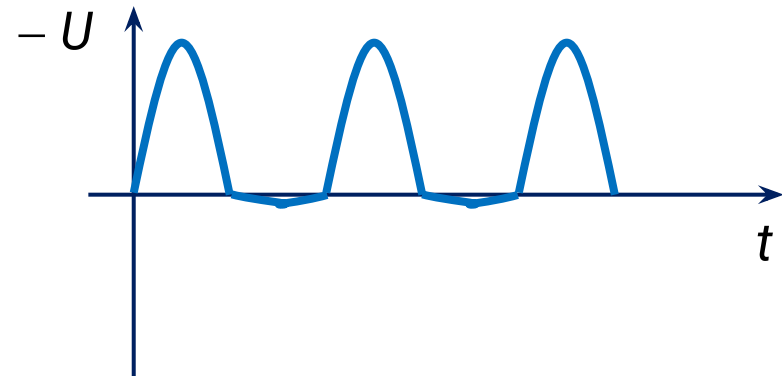
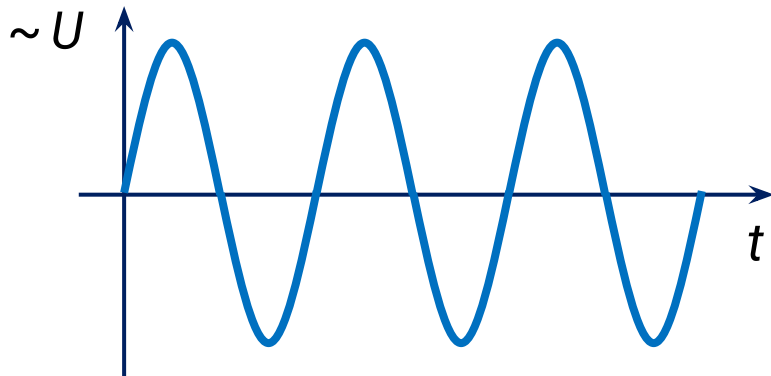
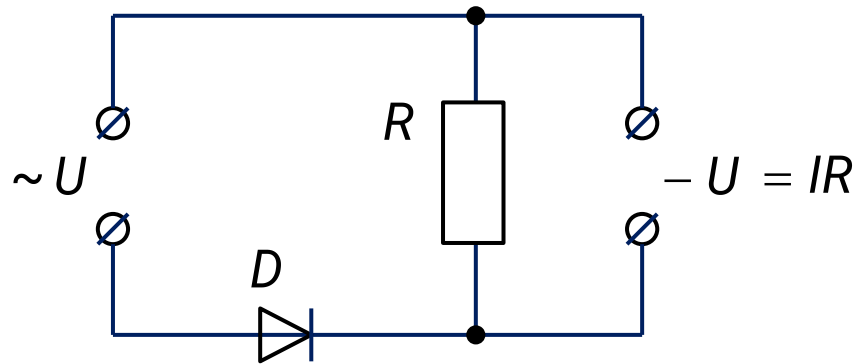
- Полупроводниковый прибор с  $p$ - $n$ -переходом называется **полупроводниковым диодом**



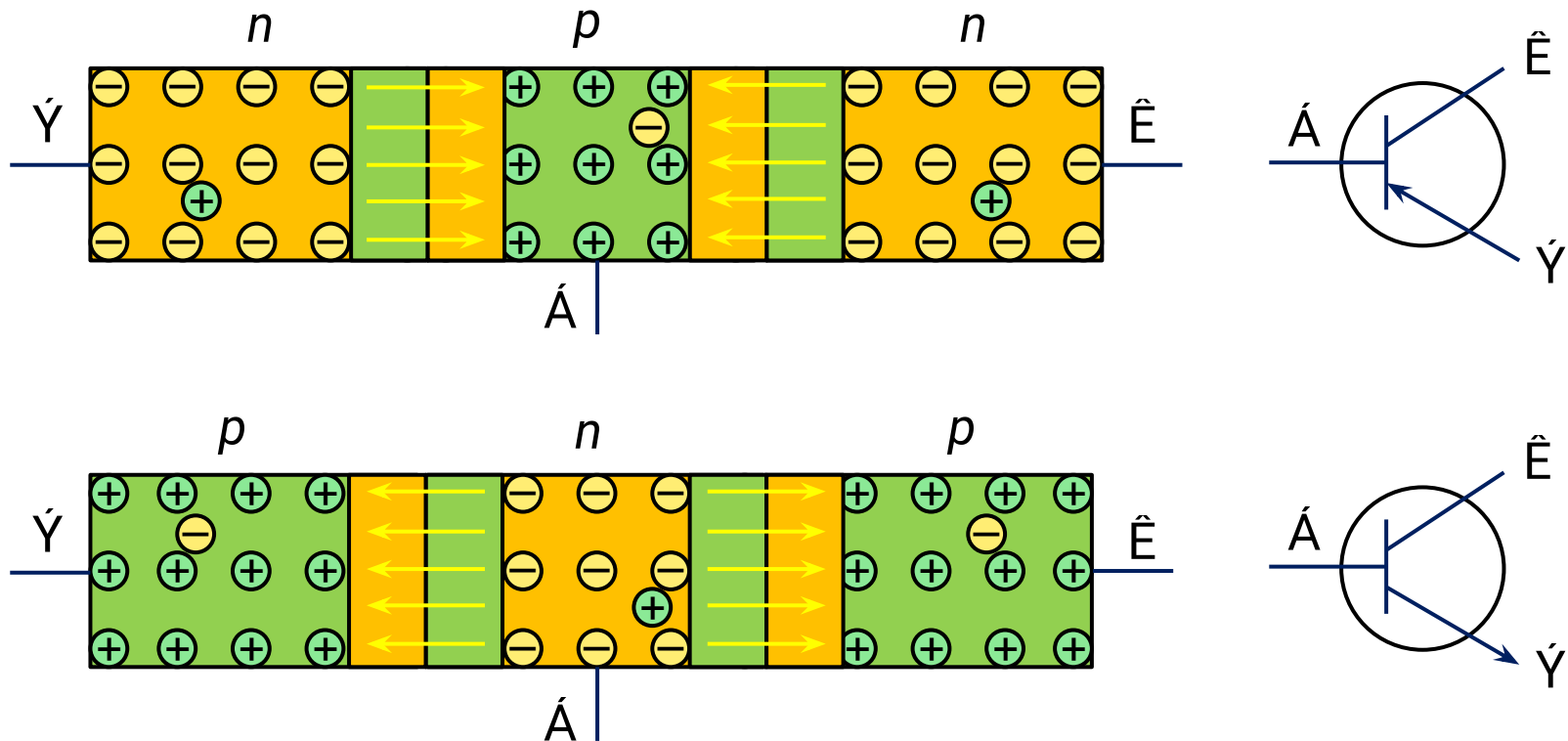
- Острие треугольника условного обозначения диода показывает направление прямого включения диода (вернее,  $p$ - $n$ -перехода в диоде)



- Полупроводниковые диоды используются для многих целей, самая распространенная из них — это получение из переменного тока постоянного (**выпрямление тока**)



- Еще больше чем диоды, на практике используются полупроводниковые приборы, состоящие из двух  $p$ - $n$ -переходов — **полупроводниковые триоды** или **транзисторы**



- Транзисторы используются **для усиления электрических сигналов**, например, в радио- и телесвязи, звуковых усилителях и т.д.
- В цифровой (компьютерной) технике из транзисторов делают **логические ключи** —элементы, которые выполняют логические операции над цифровыми сигналами (в цифровой технике отсутствие тока в цепи означает 0, наличие тока в цепи — 1)

