

Физические основы построения ЭВМ

Цели курса: изучение
физических основ
построения ЭВМ,
рассмотрение организации
интегральных схем, а также
изучение основ работы в
программе Electronics
Workbench.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бройдо В.Л. Архитектура
ЭВМ и систем: Учебник
для вузов 2-е издание
[Текст] / Бройдо В.Л.,
Ильина О.П. – СПб.:
Питер, 2009.

1. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. Издание 5-е. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.: ил.

Лекция 2.

**Основы теории
электропроводимости
твёрдого тела**

Вопросы:

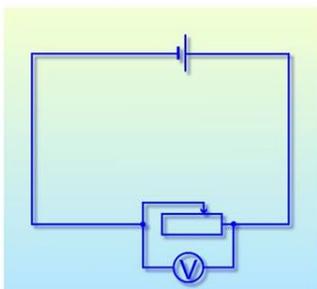
1. Элементы энергетической модели атома
2. Электропроводимость полупроводников.
3. Понятие n-p-перехода

1.Элементы энергетической модели атома

Носители информации –
количественные показатели
напряжения, тока и заряда. В реальных
электронных цепях наблюдается их
изменение во времени.

Напряжение – физическая величина, характеризующая работу электрического поля по перемещению единичного заряда между 2-мя точками.

- Обозначается – **U**
- Измеряется в Вольтах, **V**
- Прибор для измерения-



Вольтметр

$$U = A / q$$



6

Сила тока

- величина, показывающая какой электрический заряд проходит через поперечное сечение проводника в 1 секунду

$$I = q/t$$

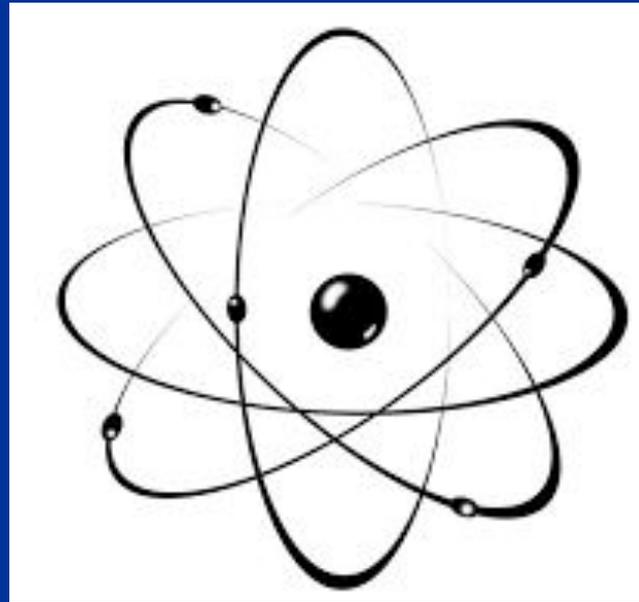
I - сила тока

q - электрический заряд

t - время

Единицы измерения $[I] = A$

В процессе передачи и преобразования электрической энергии **большую роль играют электроны.**



Электроны — это мельчайшие элементарные частицы материи, обладающие электрической энергией.



$$D = 5 \cdot 10^{-13} \text{ см,}$$

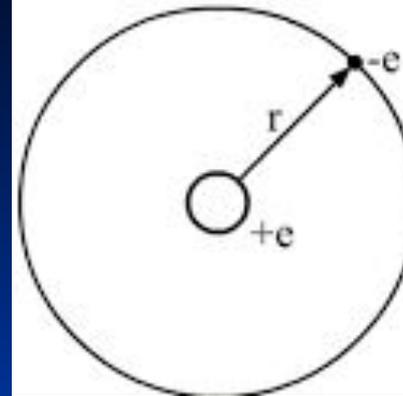
$$m = 9 \cdot 10^{-28} \text{ грамм,}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

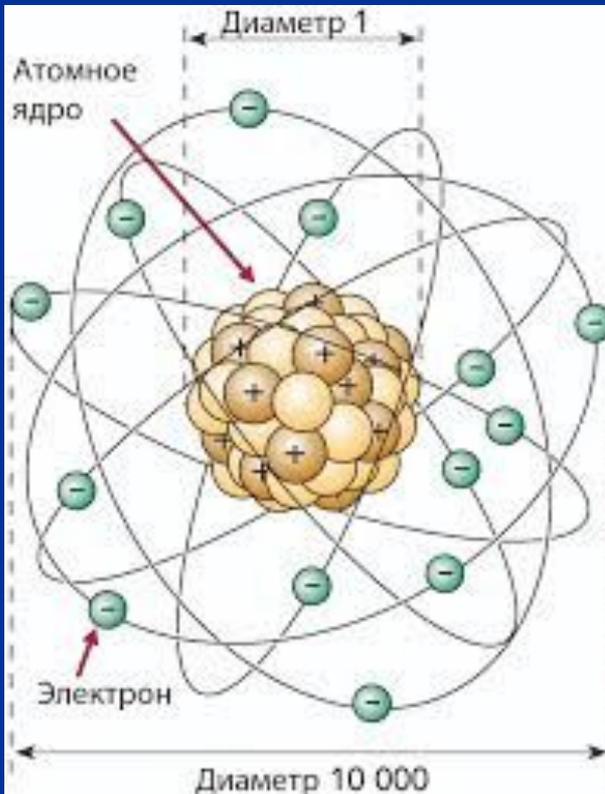
Атомное ядро – тело малых размеров, в котором сконцентрированы почти вся масса и весь положительный заряд атома.

Диаметр ядра порядка $10^{-12} - 10^{-13}$ см.

Атом водорода



В атоме водорода вокруг ядра обращается всего один электрон. Ядро было названо **протоном**. $m_p = 1836,1 m_e$. Размер атома – это радиус орбиты его электрона.



Каждый электрон имеет **наименьший** встречающийся в природе **электрический заряд** — **элементарный электрический заряд**.

ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В зависимости от концентрации свободных зарядов вещества делятся на следующие виды:

| ПРОВОДНИКИ | ДИЭЛЕКТРИКИ | ПОЛУПРОВОДНИКИ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">- это вещества, которые хорошо проводят электрический ток- высокая концентрация свободных зарядов | <ul style="list-style-type: none">- это вещества, которые не проводят электрический ток- свободные заряды практически отсутствуют | <ul style="list-style-type: none">- занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками |

Согласно принципам квантовой механики электроны изолированного атома обладают вполне определенными значениями энергии, составляющими конечную совокупность дискретных уровней энергии атома, т.е. они находятся на определенных энергетических уровнях.

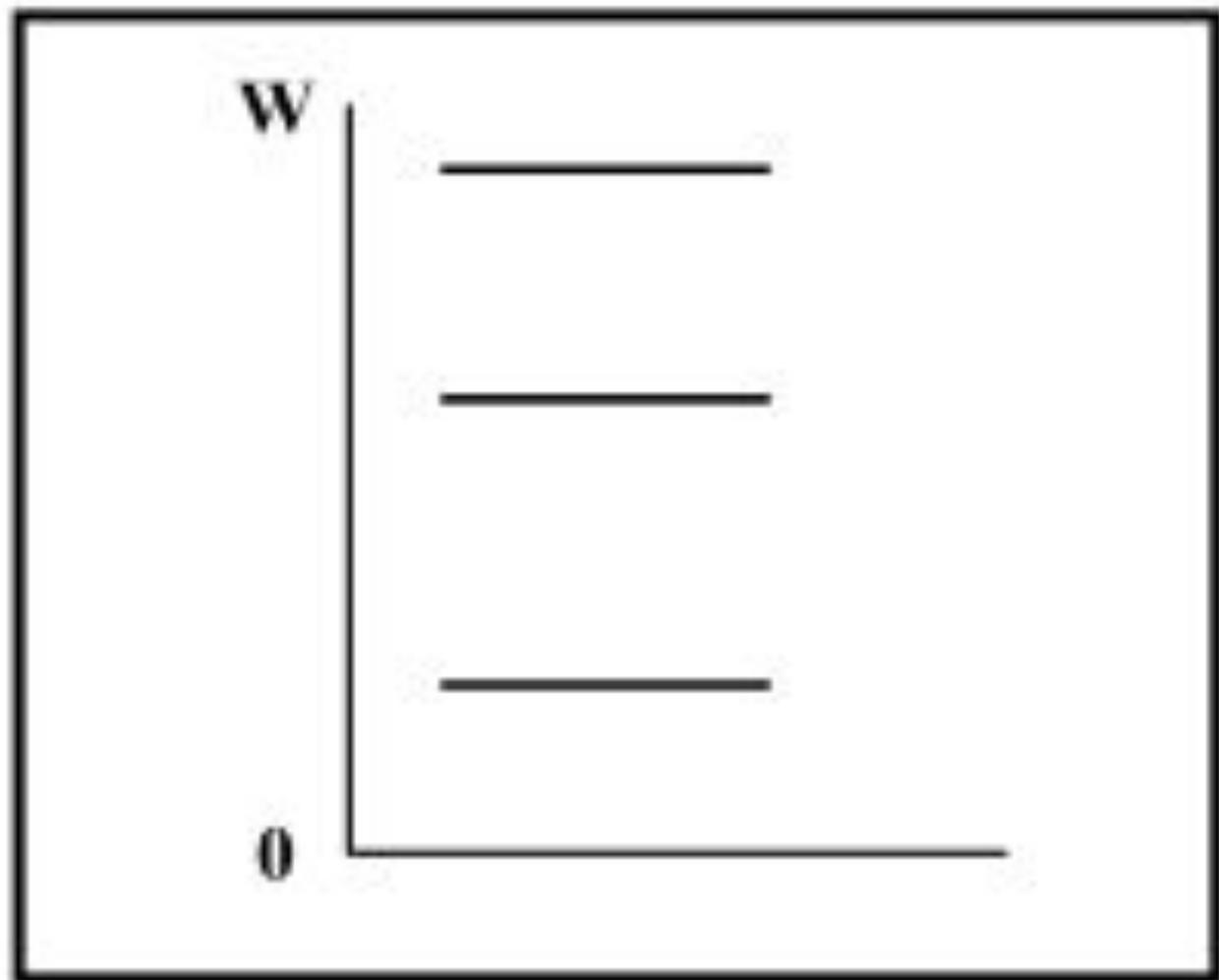
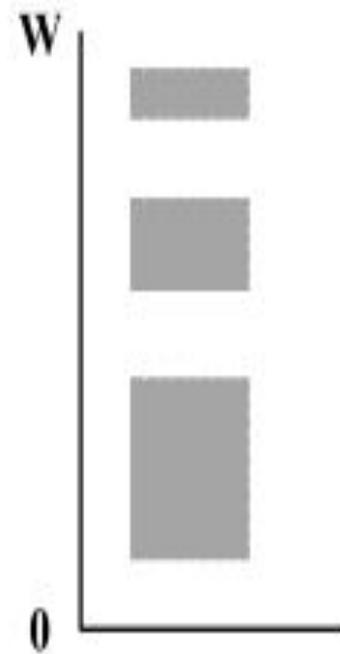
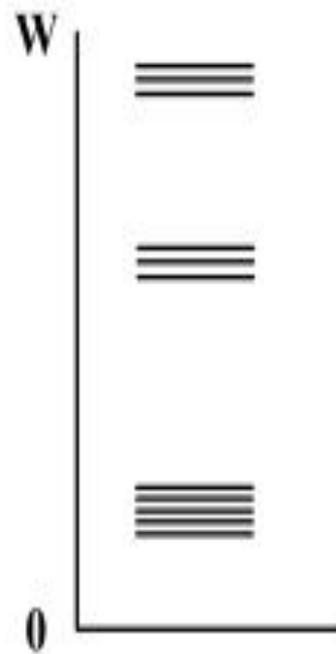
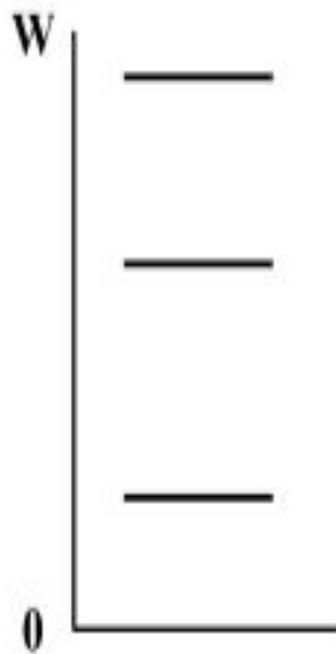


Рисунок 1 - Уровни энергии электронов
изолированного атома

Для теоретического обоснования экспериментальных данных можно применить достаточно простую модель энергетических зон:

Валентная зона, это первая энергетическая зона, в которой сгруппированы уровни энергий электронов, связанных с атомами твердого тела.



Уровни изолированного атома

Совокупность уровней

Разрешенные энергетические
зоны чередуются с
запрещенными зонами

Рисунок 2 – Схема образования разрешенных и запрещенных энергетических зон атомов твердого тела

Далее идет *запрещенная зона*.

Запрещенная зона объединяет уровни энергий, которые не могут принимать электроны атомов данного вещества.

Зона проводимости отделяется от валентной зоны запрещенной.

Электроны, перешедшие в эту зону, фактически оторваны от атомов кристалла; их считают свободными электронами.

При $T=0^\circ\text{K}$ (рисунок 3) валентная зона всегда полностью заполнена, тогда как зона проводимости либо заполнена в нижней части, либо полностью пуста. Первый случай характерен металлам, а второй — диэлектрикам и полупроводникам.

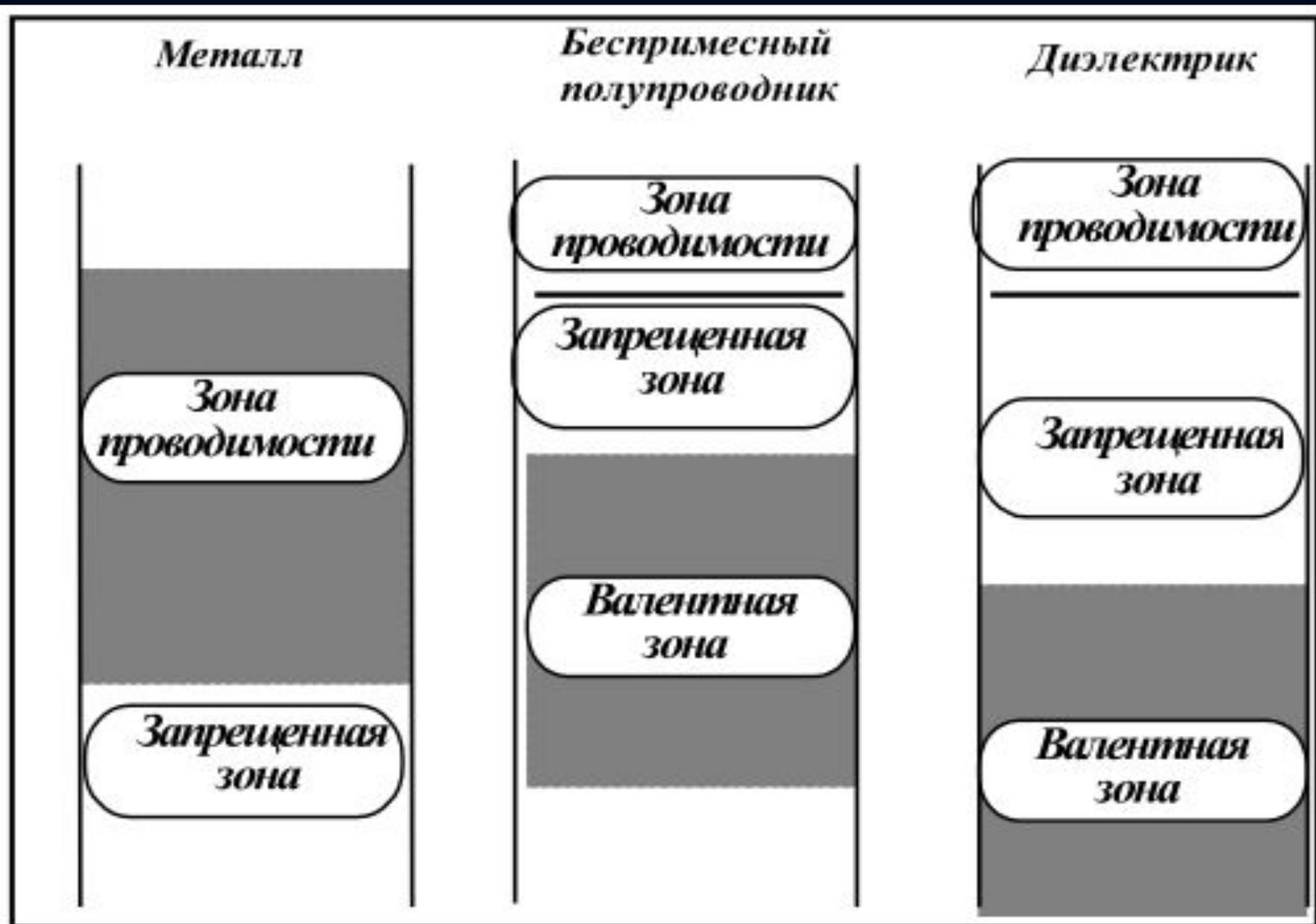


Рисунок 3 – Зонные диаграммы при $T = 0 \text{ K}$

2.

ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Электропроводность
полупроводников резко
увеличивается с повышением
температуры.

Удельное
сопротивление полупроводника
убывает с ростом температуры
примерно так, как показано на
рис.1.

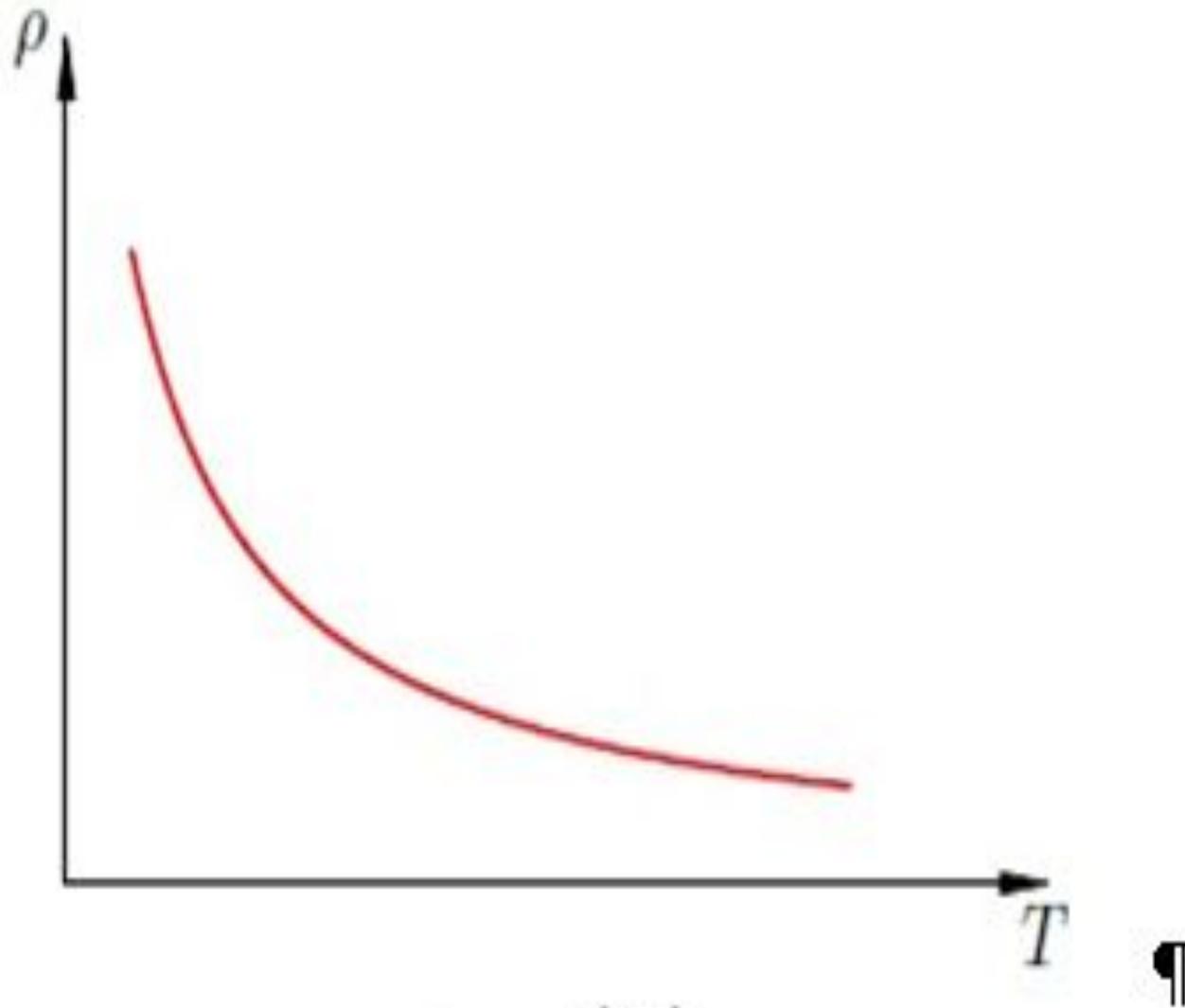


Рис. 1. Зависимость $\rho = \rho(T)$ для полупроводника

Согласно принципам квантовой механики электроны изолированного атома обладают вполне определенными значениями энергии, т.е. они находятся на определенных энергетических уровнях (рисунок 1).

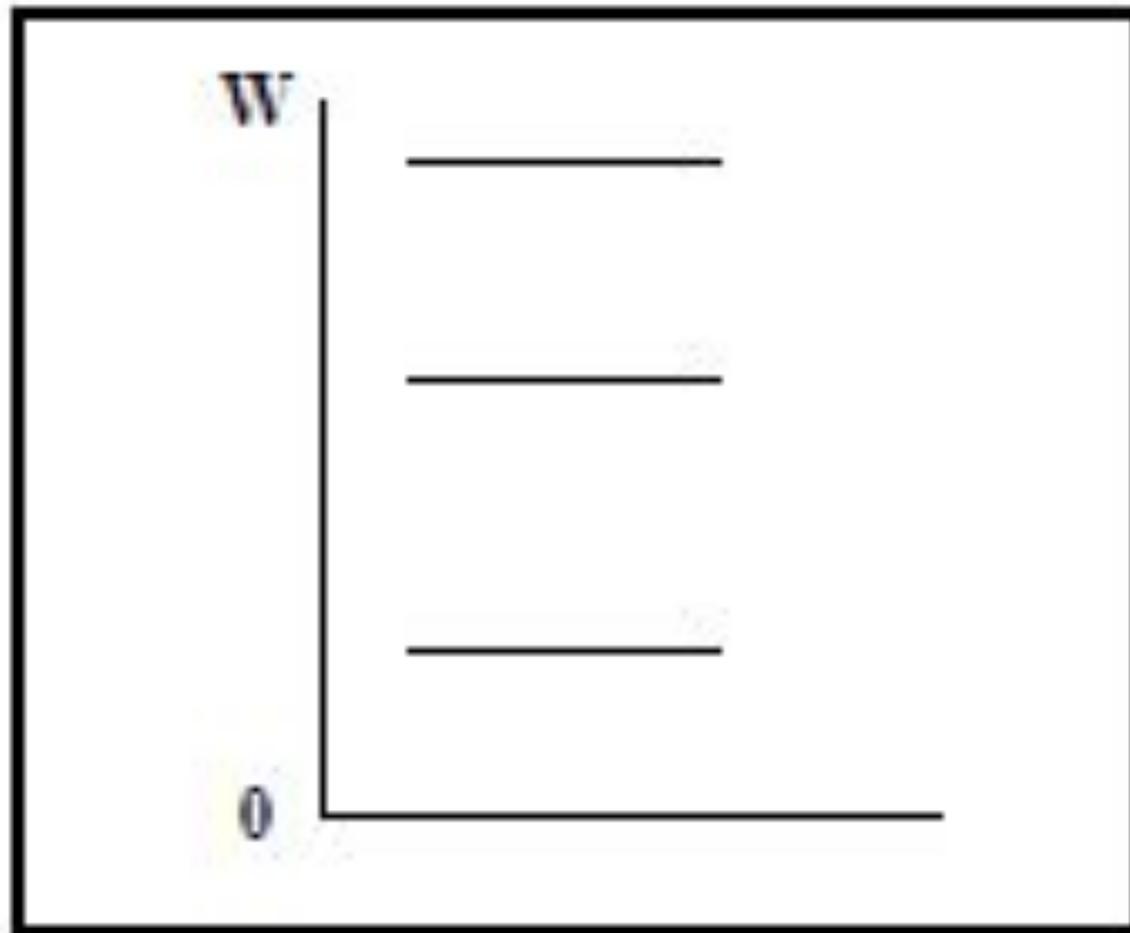


Рисунок 1 - Уровни энергии электронов
изолированного атома

Ковалентная связь

Электроны, находящиеся на внешнем электронном уровне и называемые *валентными*, слабее связаны с атомом, чем остальные электроны, которые расположены ближе к ядру.

В процессе образования ковалентной связи два атома вносят «в общее дело» по одному своему валентному электрону. Эти два электрона обобществляются, то есть теперь принадлежат уже обоим атомам, и потому называются *общей электронной парой* (рис. 2).

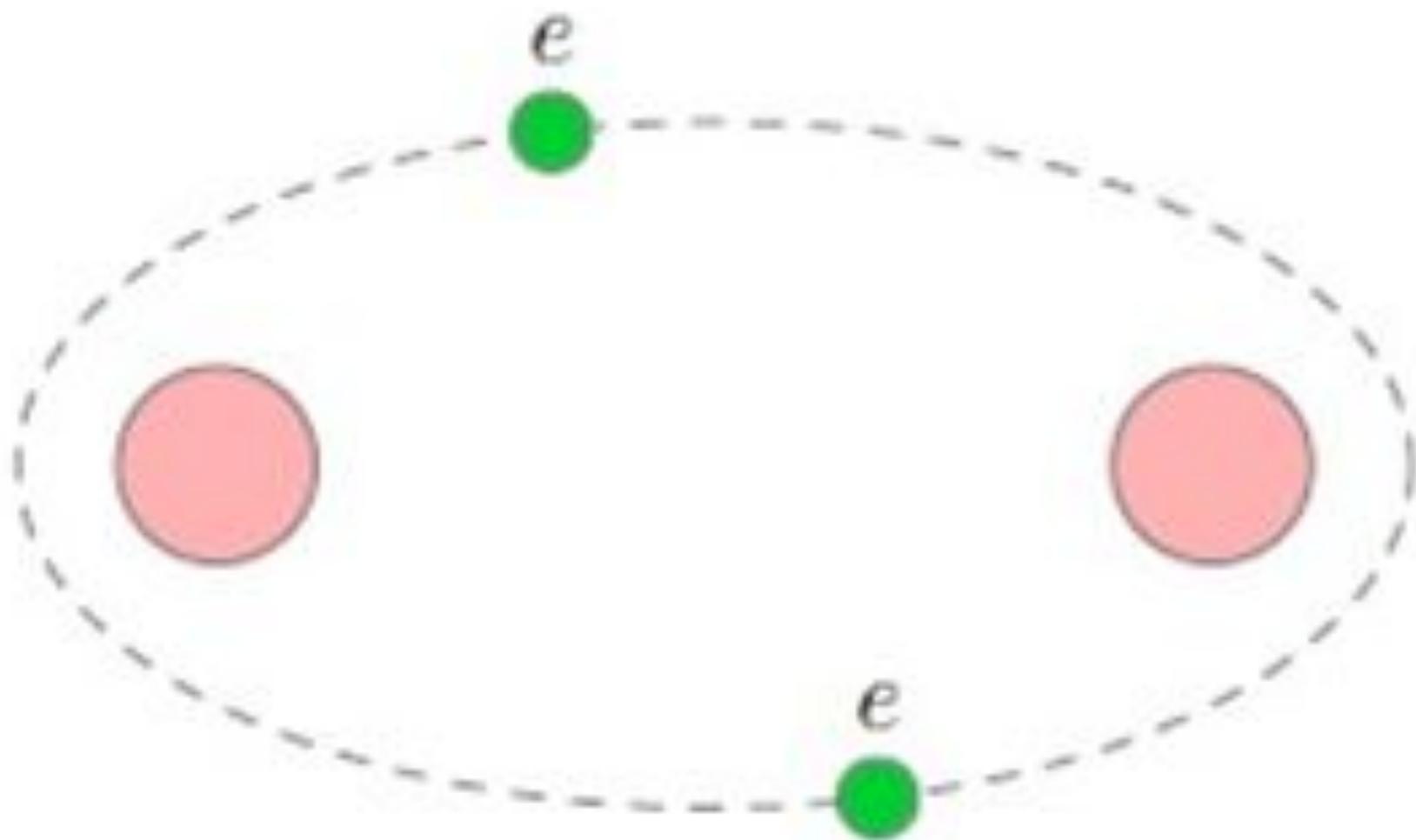


Рис. 2. Ковалентная связь

Кристаллическая структура кремния

Пространственная структура кремния представлена на рис. 3. Шариками изображены атомы кремния, а трубки, их соединяющие, — это каналы ковалентной связи между атомами.

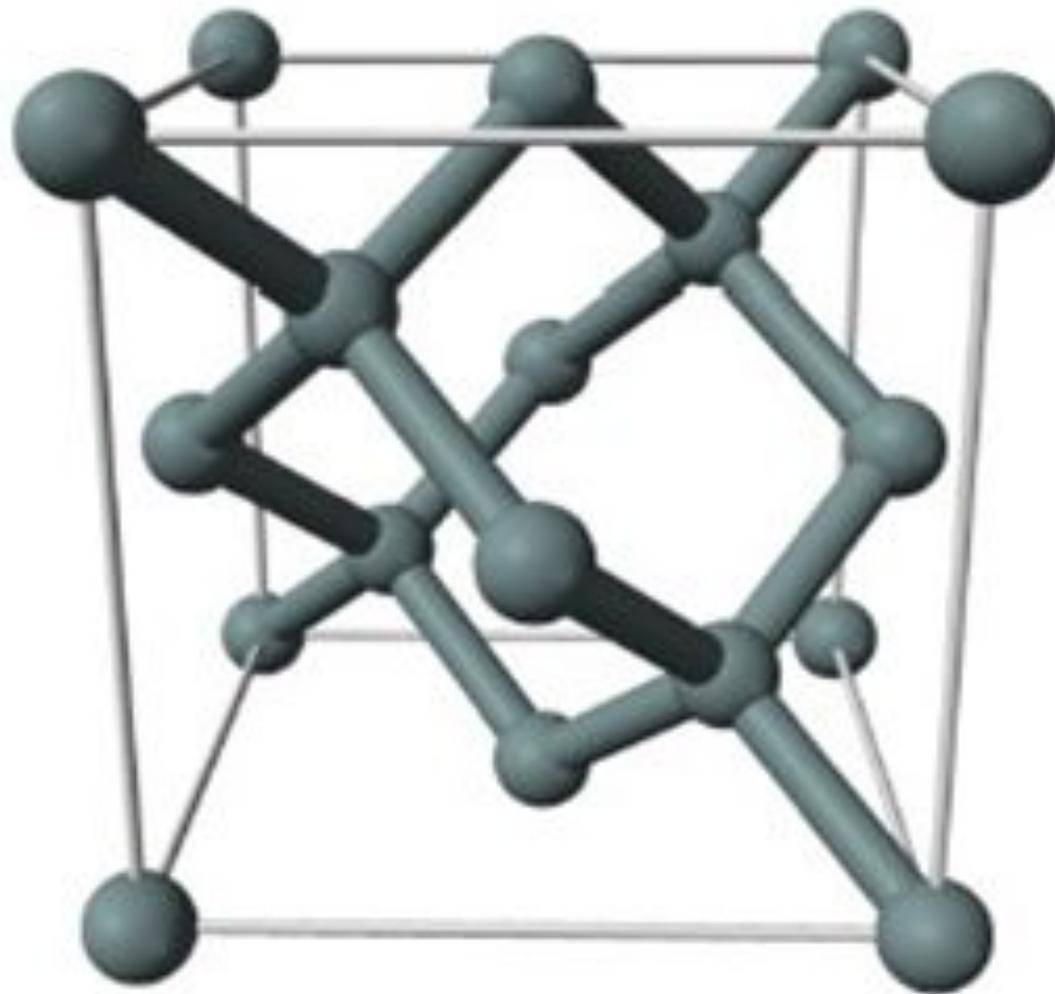


Рис. 3. Кристаллическая структура кремния

Более подробно мы видим это на плоской схеме кристаллической решётки кремния (рис. 4).

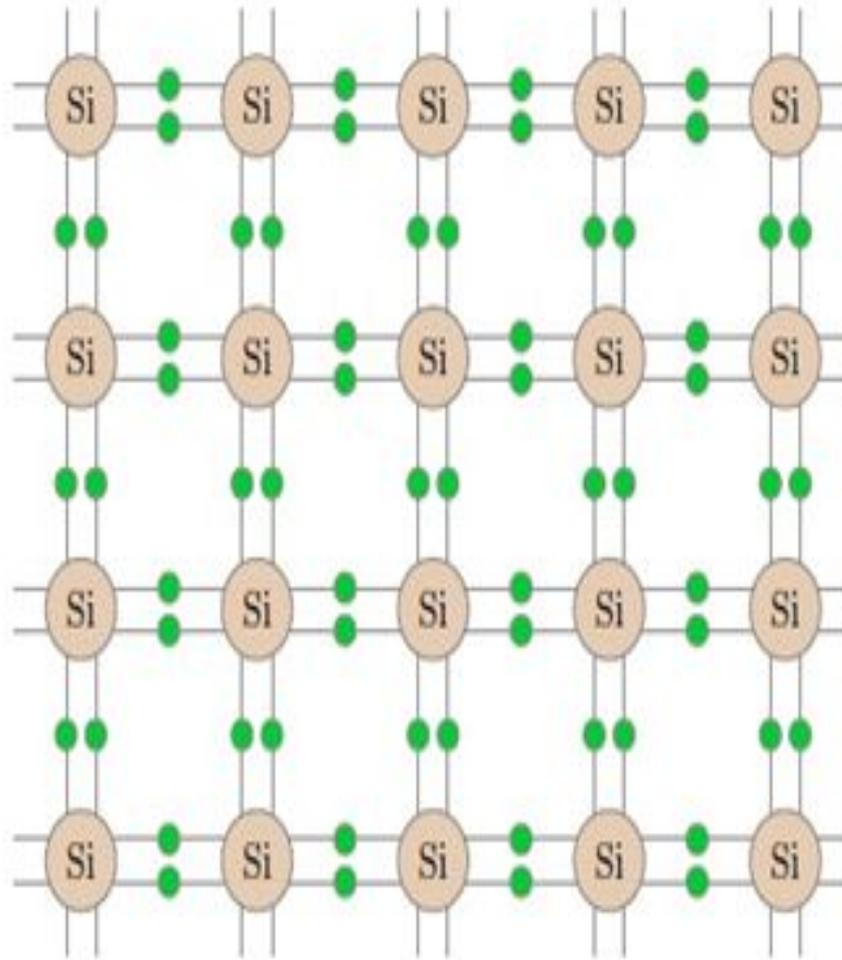
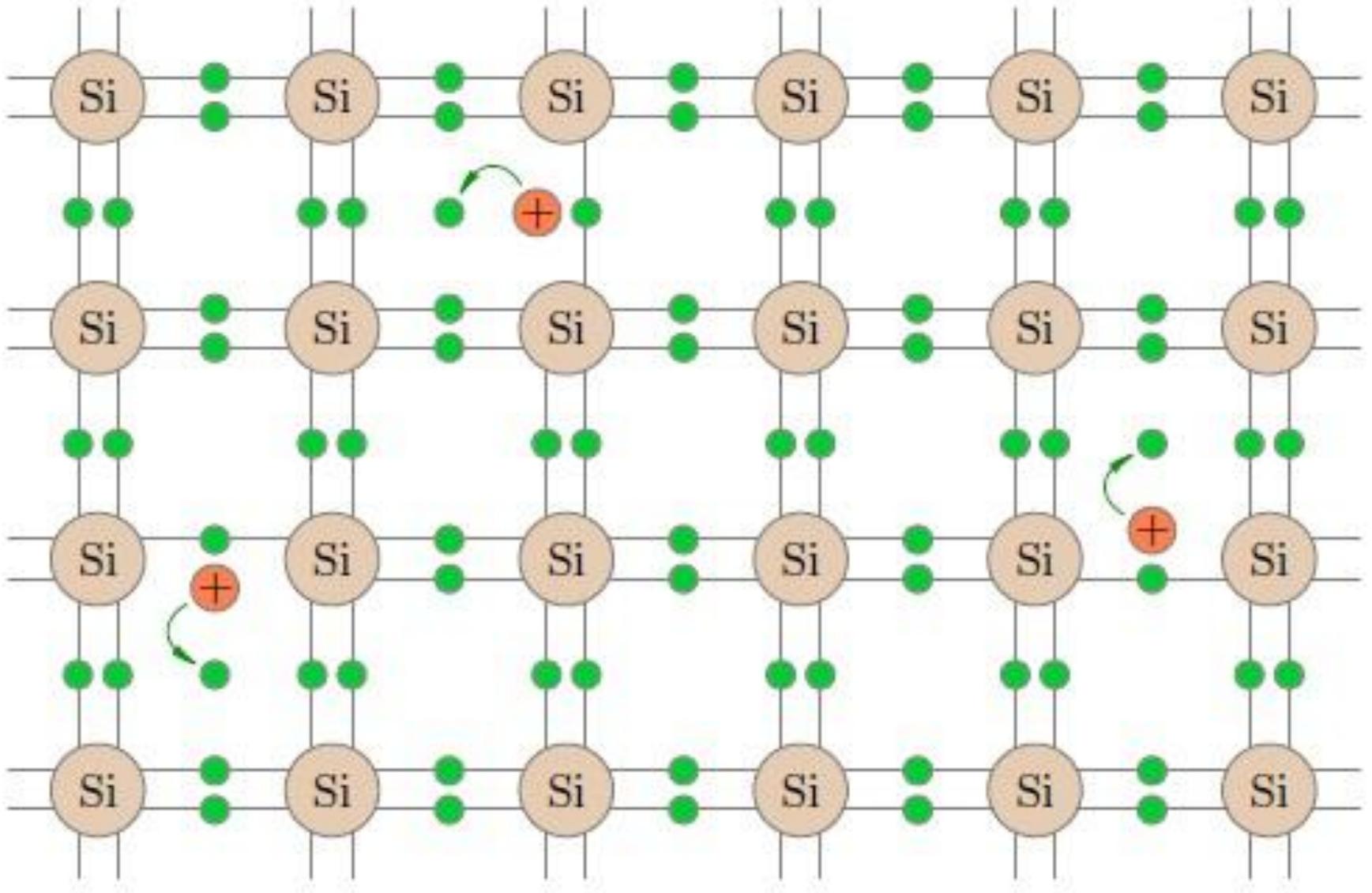


Рис. 4. Кристаллическая решётка кремния

Ковалентные связи изображены парами линий, соединяющих атомы. На этих линиях находятся общие электронные пары. Каждый валентный электрон, расположенный на такой линии, большую часть времени проводит в пространстве между двумя соседними атомами.

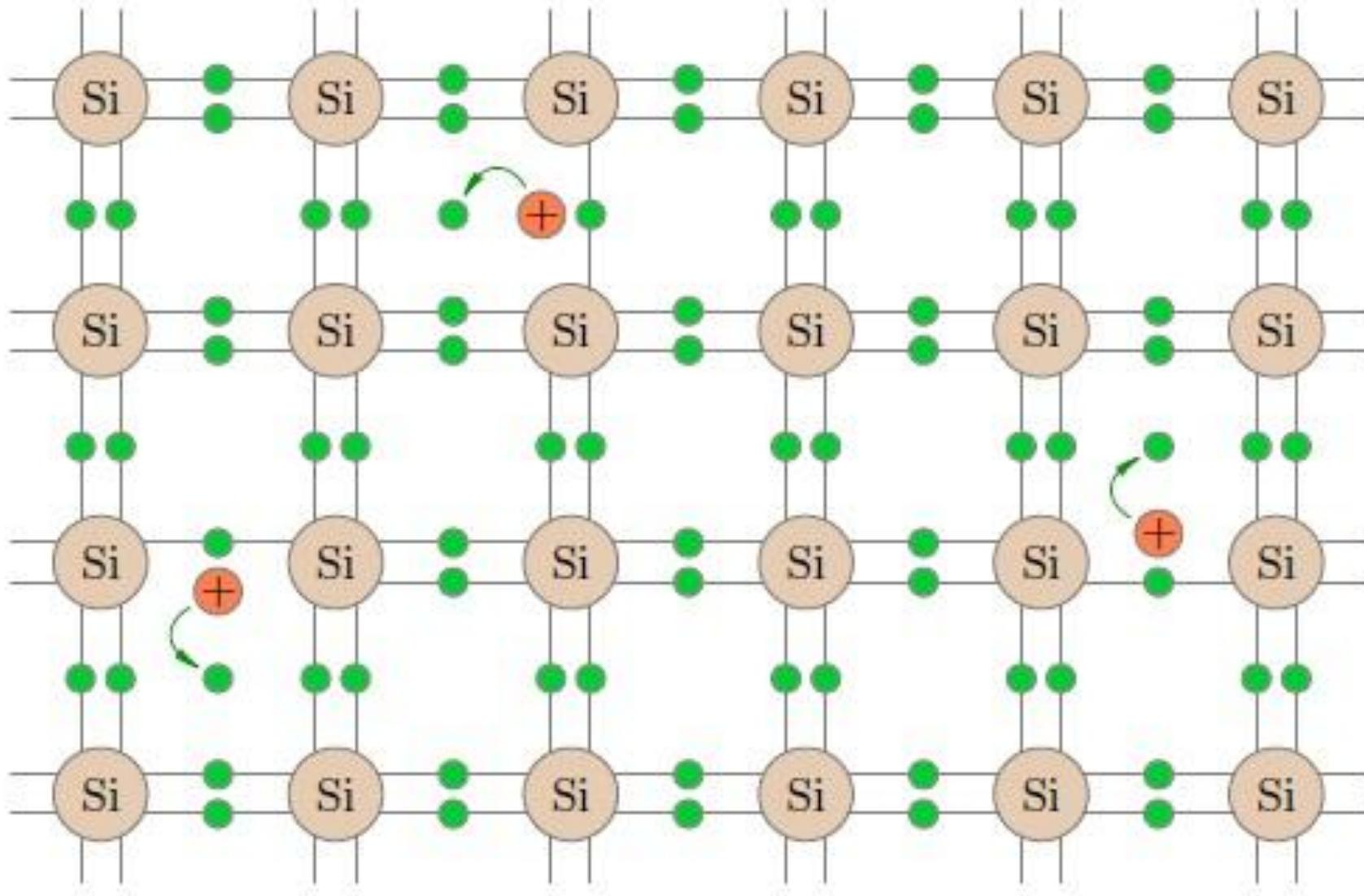
Собственная проводимость

При повышении температуры тепловые колебания атомов кремния становятся интенсивнее, и энергия валентных электронов возрастает. У некоторых электронов энергия достигает значений, достаточных для разрыва ковалентных связей.



Такие электроны покидают свои атомы и становятся *свободными* (или *электронами проводимости*) — точно так же, как в металле. Во внешнем электрическом поле свободные электроны начинают упорядоченное движение, образуя электрический ток.

Разрыв ковалентных связей и появление свободных электронов показан на рис. 5. На месте разорванной ковалентной связи образуется *дырка* — вакантное место для электрона. Дырка имеет *положительный* заряд. Дырки не остаются на месте — они могут блуждать по кристаллу.



На рис. 6 изображён полупроводник, помещённый в электрическое поле \vec{E} . В левой части рисунка — начальное положение дырки.

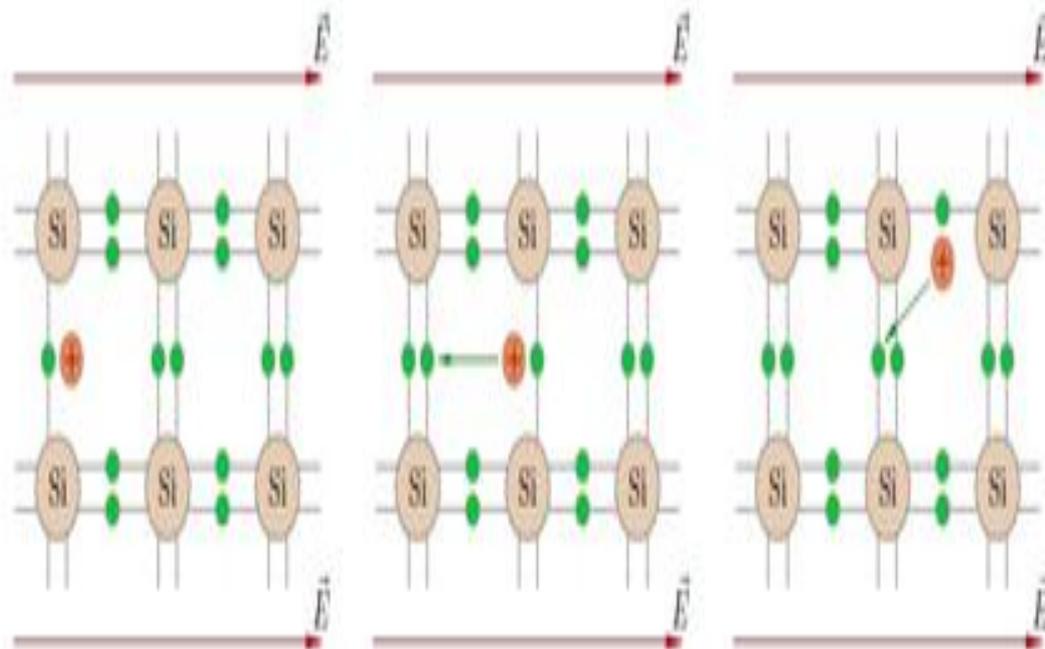


Рис. 6. Движение дырки в электрическом поле

Возникновение тока за счёт движения свободных электронов называется *электронной проводимостью*. Процесс упорядоченного перемещения дырок называется *дырочной проводимостью*.

Обе проводимости — электронная и дырочная — вместе называются *собственной проводимостью* полупроводника.

Примесная проводимость

Помимо собственной
проводимости у полупроводника
возникает доминирующая
примесная проводимость.

Именно благодаря этому факту
полупроводниковые приборы
нашли столь широкое
применение в науке и технике.

Предположим, например, что в расплав кремния добавлено немного пятивалентного мышьяка (As). После кристаллизации расплава оказывается, что атомы мышьяка занимают места в некоторых узлах сформировавшейся кристаллической решётки кремния.

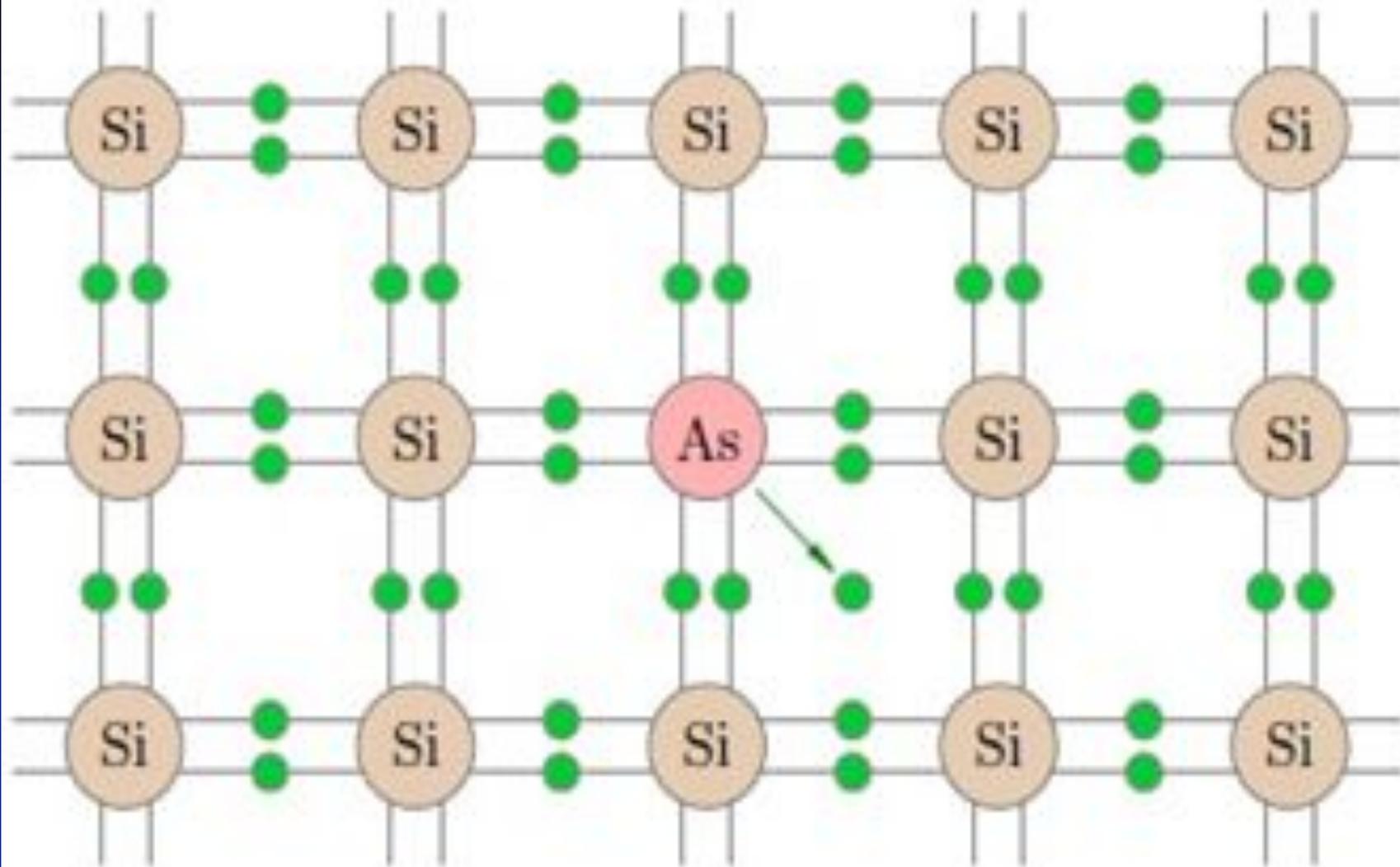


Рис. 7. Полупроводник n-типа

На внешнем электронном уровне атома мышьяка имеется пять электронов. Четыре из них образуют ковалентные связи с ближайшими соседями — атомами кремния (рис. 7). А пятый электрон становится свободным!

Внедрение атомов пентавалентного мышьяка в кристаллическую решётку кремния создаёт электронную проводимость, но не приводит к симметричному появлению дырочной проводимости.

Главная роль в создании тока теперь принадлежит свободным электронам, которые в данном случае называются основными носителями заряда.

Примеси, атомы которых отдают свободные электроны без появления равного количества подвижных дырок, называются *донорными*. Например, пятивалентный мышьяк — донорная примесь. Поэтому полупроводники с донорными примесями называются *электронными полупроводниками*, или *полупроводниками n-типа* (от латинского слова *negativus* - отрицательный).

Можно, наоборот, создать полупроводник с преобладанием дырочной проводимости. Так получится, если в кристалл кремния внедрить трёхвалентную примесь — например, индий (In). Результат такого внедрения показан на рис. 8.

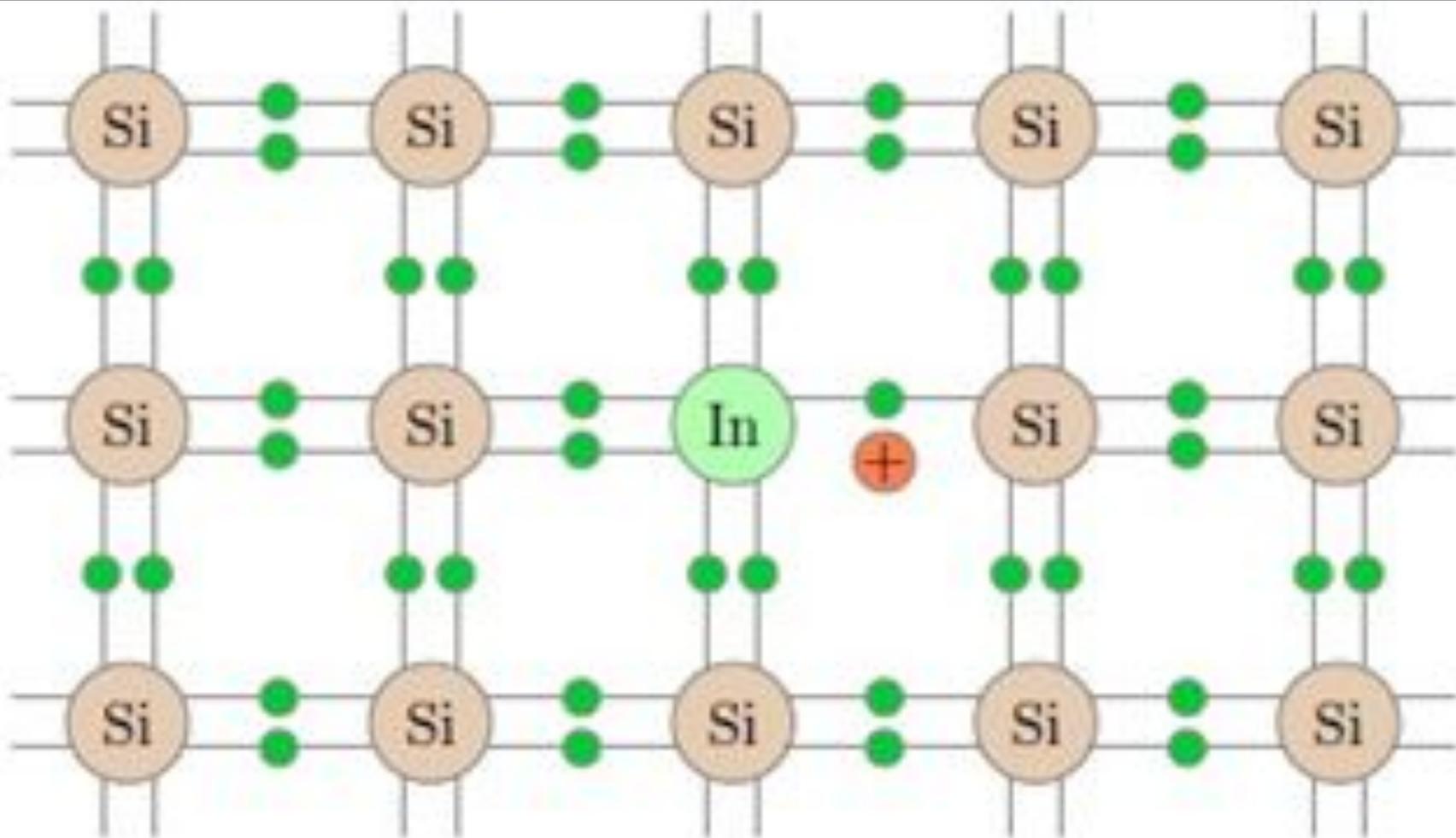


Рис. 8. Полупроводник р-типа

На внешнем электронном уровне атома индия расположены 3 электрона, которые формируют ковалентные связи с тремя окружающими атомами кремния. Для 4-го соседнего атома кремния у атома индия уже не хватает электрона, и в этом месте возникает дырка.

Каждый примесный атом индия порождает дырку, но не приводит к симметричному появлению свободного электрона. Такие примеси называются *акцепторными*. Трёхвалентный индий — пример акцепторной примеси.

Полупроводник с
акцепторной примесью —
это дырочный полупроводник, или
полупроводник p-типа (от
первой буквы латинского
слова *positivus*
(положительный)).

3. ПОНЯТИЕ P-N-ПЕРЕХОДА

Место контакта двух полупроводников с различными типами проводимости (электронной и дырочной) называется *электронно-дырочным переходом*, или *p–n-переходом*. В области p–n-перехода возникает интересное и очень важное явление — односторонняя проводимость.

На рис. 9 изображён контакт областей р- и n-типа. Цветные кружочки — это дырки и свободные электроны, которые являются основными (или неосновными) носителями заряда в соответствующих областях.

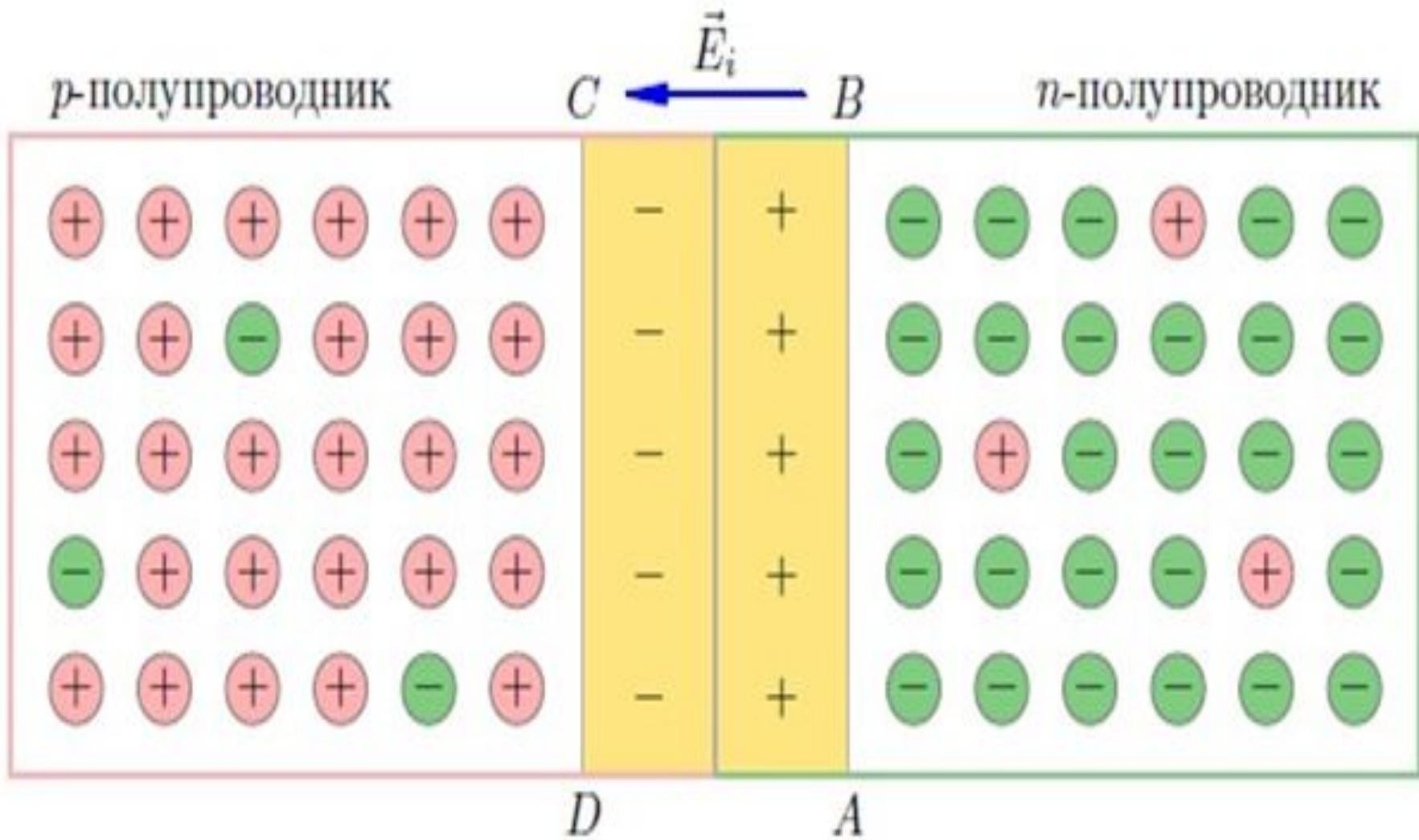


Рис. 9. Запирающий слой р–n-перехода

В результате движения зарядов в электронном п/п около границы контакта остаётся нескомпенсированный заряд положительных ионов донорной примеси, а в дырочном п/п возникает нескомпенсированный отрицательный заряд ионов акцепторной примеси.

Эти нескомпенсированные объёмные заряды образуют так называемый *запирающий слой* ABCD, внутреннее электрическое поле которого препятствует дальнейшей диффузии свободных электронов и дырок через границу контакта.

Подключим теперь к нашему полупроводниковому элементу источник тока, подав «плюс» источника на n -полупроводник, а «минус» — на p -полупроводник (рис. 10).

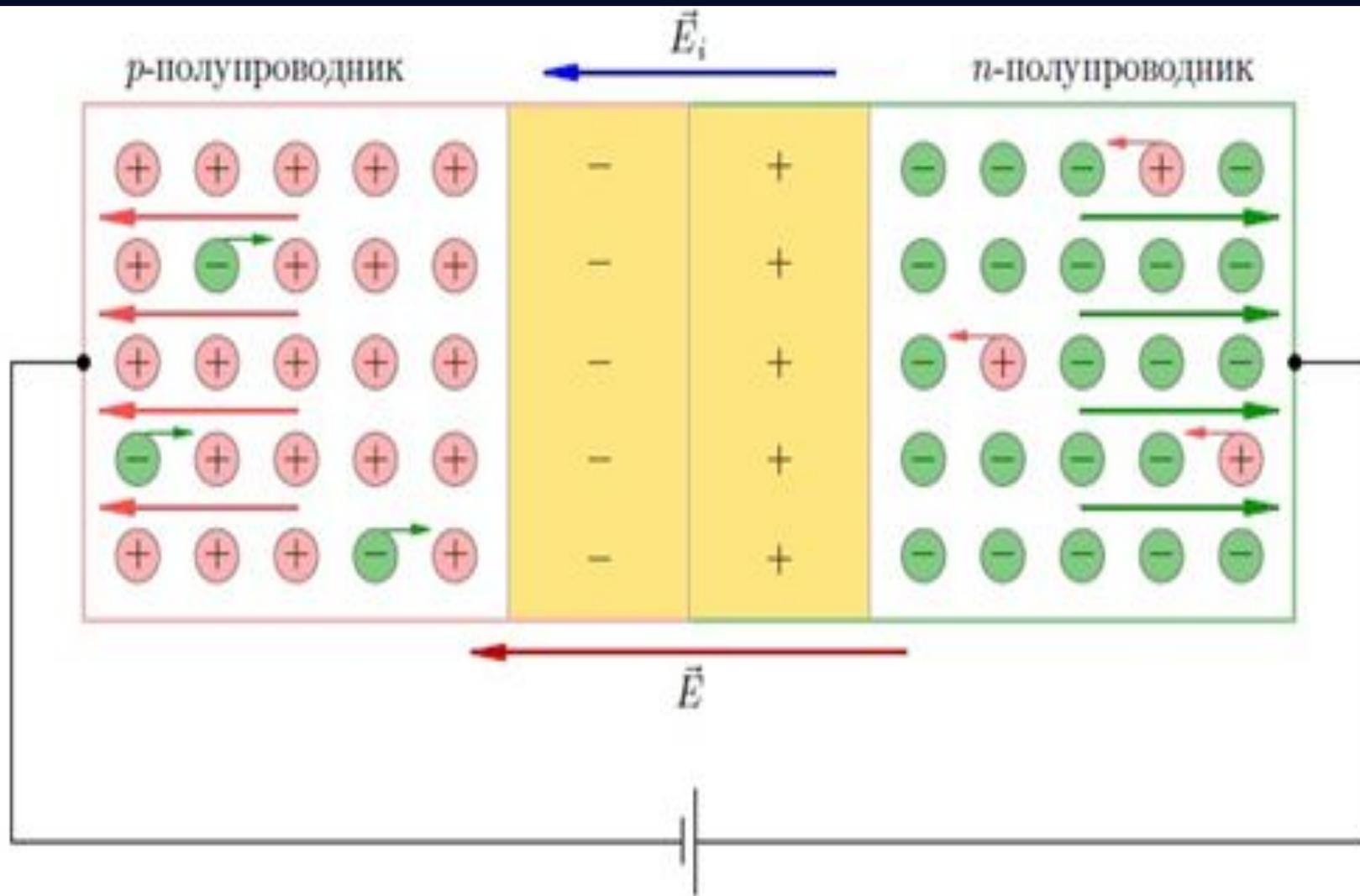


Рис. 10. Включение в обратном направлении: тока нет

Рассмотренная схема называется включением *p-n-перехода в обратном направлении*. Электрического тока основных носителей нет. В данном случае *p-n-переход* оказывается закрытым.

Теперь поменяем полярность
подключения и подадим
«плюс» на p-полупроводник, а
«минус» — на n-
полупроводник (рис. 11). Эта
схема называется *включением в
прямом направлении.*

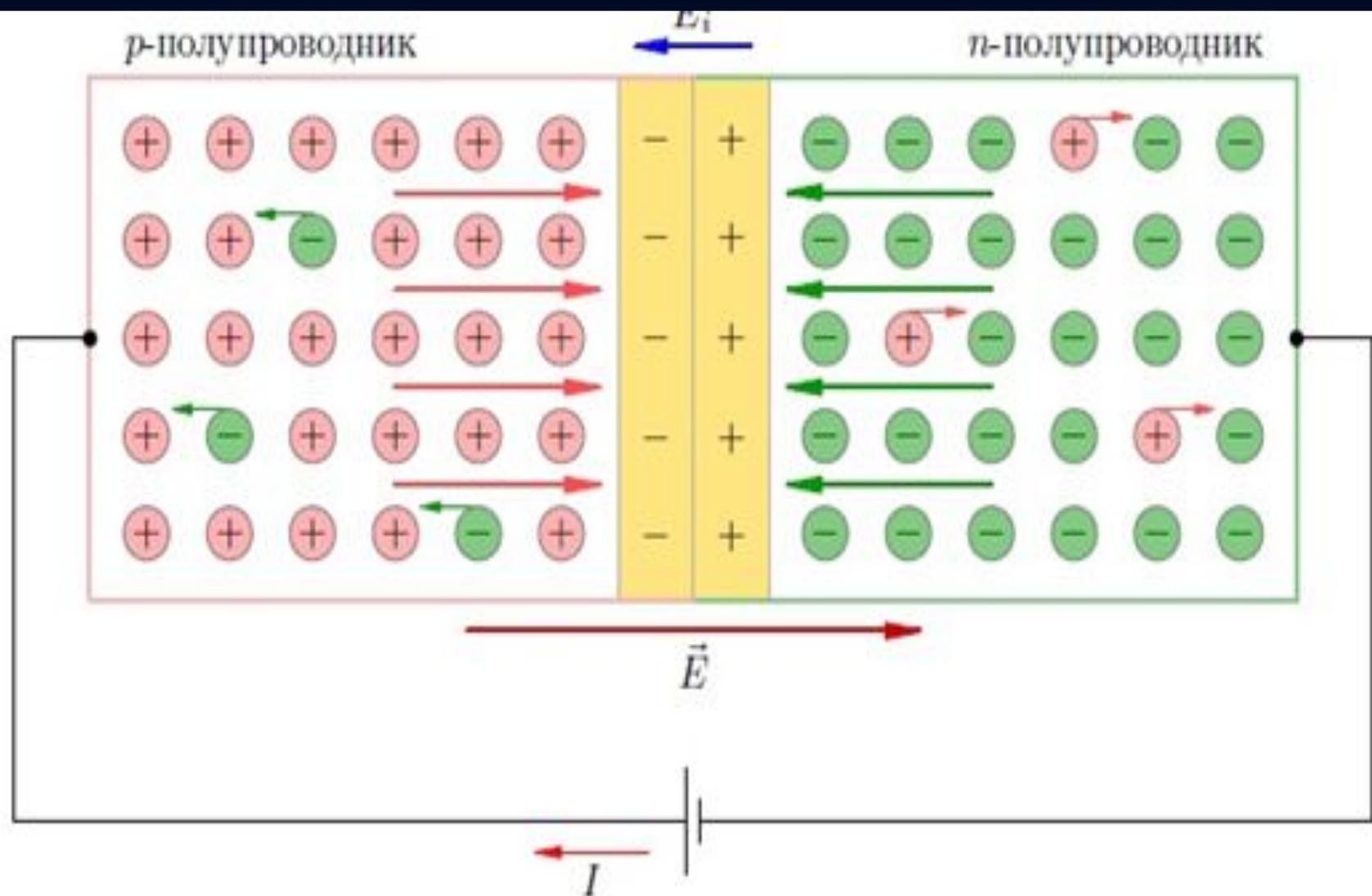


Рис. 11. Включение в прямом направлении: ток идёт





Вентильное свойство р-n-перехода

р-n-переход, обладает свойством изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от направления протекающего через него тока.

Это свойство называется
вентильным, а прибор,
обладающий таким
свойством, называется
электрическим вентиляем.

Введение носителей заряда
через р-n-переход при
понижении высоты
потенциального барьера в
область полупроводника, где
эти носители являются
неосновными, называют
инжекцией носителей заряда.

При протекании прямого тока из дырочной области p в электронную область n инжектируются дырки, а из электронной области в дырочную – электроны.

Инжектирующий слой с относительно малым удельным сопротивлением называют *эмиттером*, а слой, в который происходит инжекция неосновных для него носителей заряда называется *базой*.

Процесс переброса неосновных носителей заряда называется *экстракцией*. Этот ток имеет дрейфовую природу и называется *обратным током р-п-перехода*.

ВЫВОДЫ:

1. p-n-переход образуется на границе p- и n-областей, созданных в монокристалле полупроводника.

2. В результате диффузии в p-n-переходе возникает электрическое поле - потенциальный барьер, препятствующий выравниванию концентраций основных носителей заряда в соседних областях.

3. При отсутствии внешнего напряжения $U_{ВН}$ в р-п-переходе устанавливается динамическое равновесие: диффузионный ток становится равным по величине дрейфовому току, образованному неосновными носителями заряда, в результате чего ток через р-п-переход становится равным нулю.

4. При прямом смещении р-n-перехода потенциальный барьер понижается и через переход протекает относительно большой диффузионный ток.

5. При обратном смещении р-n-перехода потенциальный барьер повышается, диффузионный ток уменьшается до нуля и через переход протекает малый по величине дрейфовый ток.

6. Ширина р-n-перехода

зависит:

- от концентраций примеси в p - и n -областях,
- от знака и величины приложенного внешнего напряжения $U_{вн}$.

При увеличении концентрации примесей ширина *p-n-перехода* уменьшается и наоборот. С увеличением прямого напряжения ширина *p-n-перехода* уменьшается. При увеличении обратного напряжения ширина *p-n-перехода* увеличивается.

p-n-переход **обладает**
односторонней
проводимостью. Данное
свойство широко
используется для
выпрямления переменных
токов.

Вольтамперная характеристика р-п-перехода

*Вольтамперная
характеристика р-n-
перехода* - ЭТО

ЗАВИСИМОСТЬ ТОКА ЧЕРЕЗ
р-n-переход ОТ ВЕЛИЧИНЫ
ПРИЛОЖЕННОГО К НЕМУ
НАПРЯЖЕНИЯ.

E_e рассчитывают исходя из предположения, что электрическое поле вне обедненного слоя отсутствует, т.е. все напряжение приложено к р-n-переходу. Общий ток через р-n-переход определяется суммой 4-х слагаемых:

$$I_{p-n} = I_{n \text{ диф}} + I_{p \text{ диф}} - I_{n \text{ др}} - I_{p \text{ др}},$$

где $I_{n \text{ др}} = qn_{p_0} v_{n \text{ др}}$ – электронный ток дрейфа; $I_{p \text{ др}} = qp_{n_0} v_{p \text{ др}}$ – дырочный ток дрейфа;

$I_{n \text{ диф}} = qn_p v_{n \text{ диф}} = qv_{n \text{ диф}} n_{p_0} e^{\frac{qU_{\text{ВН}}}{kT}}$ – электронный ток диффузии; $I_{p \text{ диф}} = qp_n v_{p \text{ диф}} =$

$= qv_{p \text{ диф}} p_{n_0} e^{\frac{qU_{\text{ВН}}}{kT}}$ – дырочный ток диффузии; $n_p = n_{p_0} e^{\frac{qU_{\text{ВН}}}{kT}}$ – концентрация электронов, инжекти-

рованных в p -область; $p_n = p_{n_0} e^{\frac{qU_{\text{ВН}}}{kT}}$ – концентрация дырок, инжектированных в n -область.

Вид этой зависимости
представлен на рис. 1.19.
Первый квадрант
соответствует участку прямой
ветви вольтамперной
характеристики, а третий
квадрант - обратной ветви.

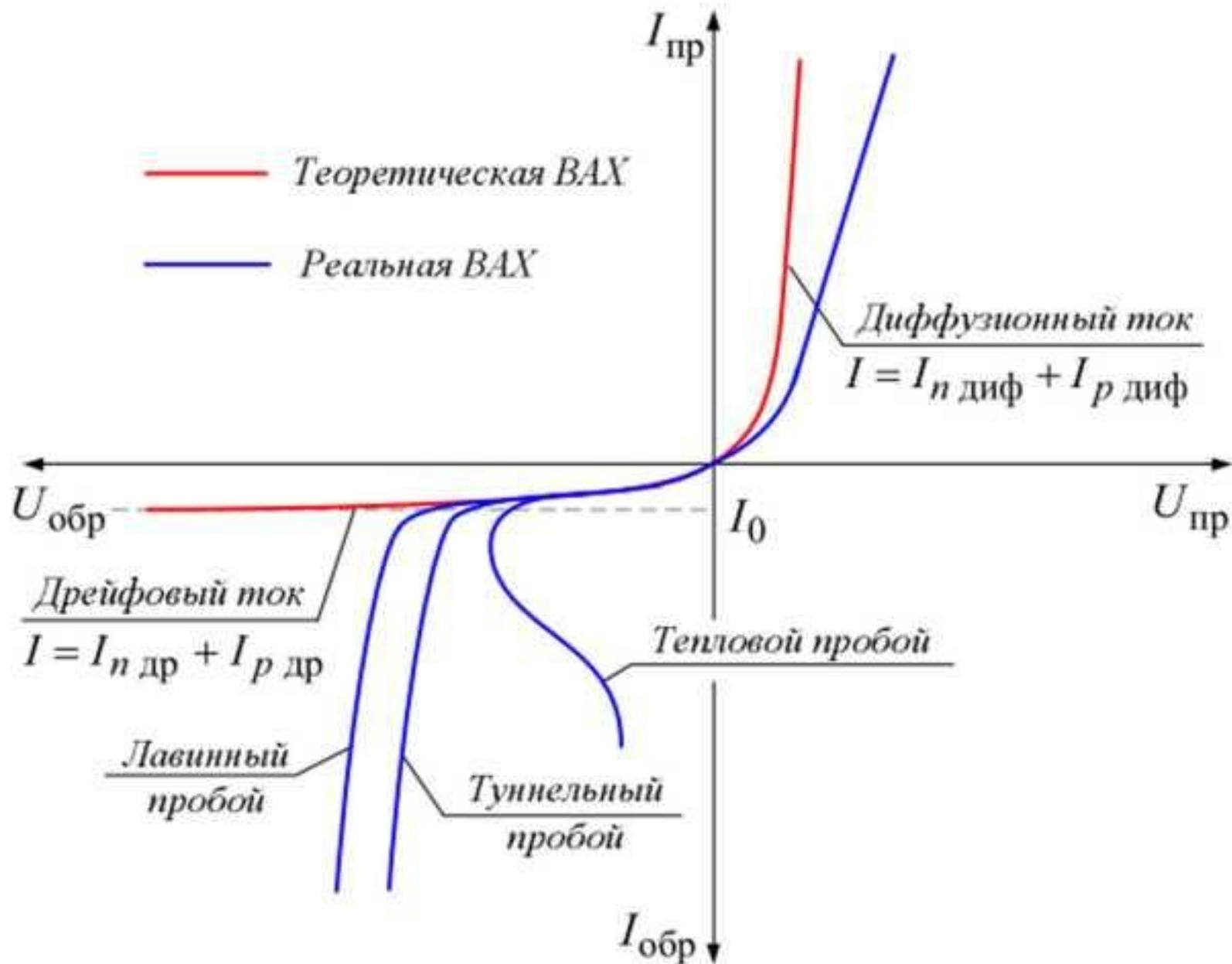


Рис. 1.19. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

При увеличении прямого напряжения ток p - n -перехода в прямом направлении вначале возрастает относительно медленно, а затем начинается участок быстрого нарастания прямого тока, что приводит к дополнительному нагреванию полупроводниковой структуры.

Если количество выделяемого при этом тепла будет превышать количество тепла, отводимого от полупроводникового кристалла либо естественным путем, либо с помощью специальных устройств охлаждения, то могут произойти в полупроводниковой структуре необратимые изменения вплоть до разрушения кристаллической решетки.

Поэтому прямой ток р-п-перехода необходимо ограничивать на безопасном уровне, исключая перегрев полупроводниковой структуры. Для этого необходимо использовать ограничительное сопротивление последовательно подключенное с р-п-переходом.

При увеличении обратного напряжения, приложенного к р-n-переходу, обратный ток изменяется незначительно, так как дрейфовая составляющая тока, являющаяся преобладающей при обратном включении, зависит в основном от температуры кристалла.

Увеличение обратного напряжения приводит лишь к увеличению скорости дрейфа неосновных носителей без изменения их количества. Такое положение будет сохраняться до величины обратного напряжения, при котором начинается интенсивный рост обратного тока - так называемый *пробой p-n-перехода*.