

**ЭЛЕКТРОНИКА И
МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ
ТЕХНИКА**

Учебники

З.А.Мизерная

Б.И.Горошков

В.А. Фролов

«Электронная техника»

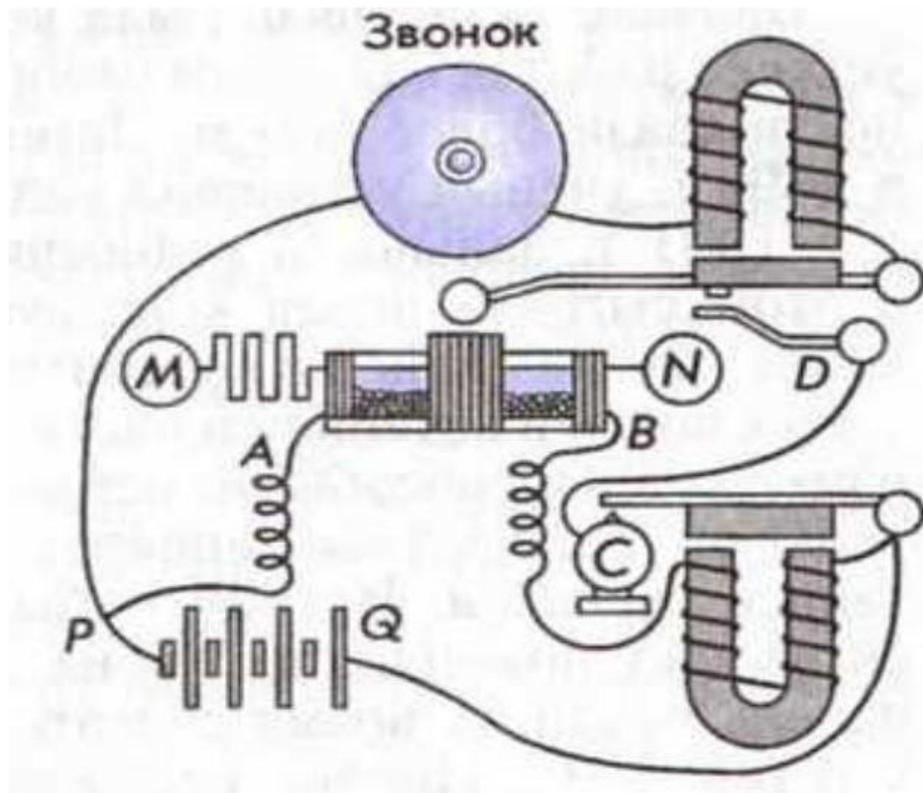
Электрoника — наука о взаимодействии
электронов с электромагнитными
полями и методах создания электронных
приборов и устройств для преобразования
электромагнитной энергии для приёма,
передачи, обработки и
хранения информации

История развития:

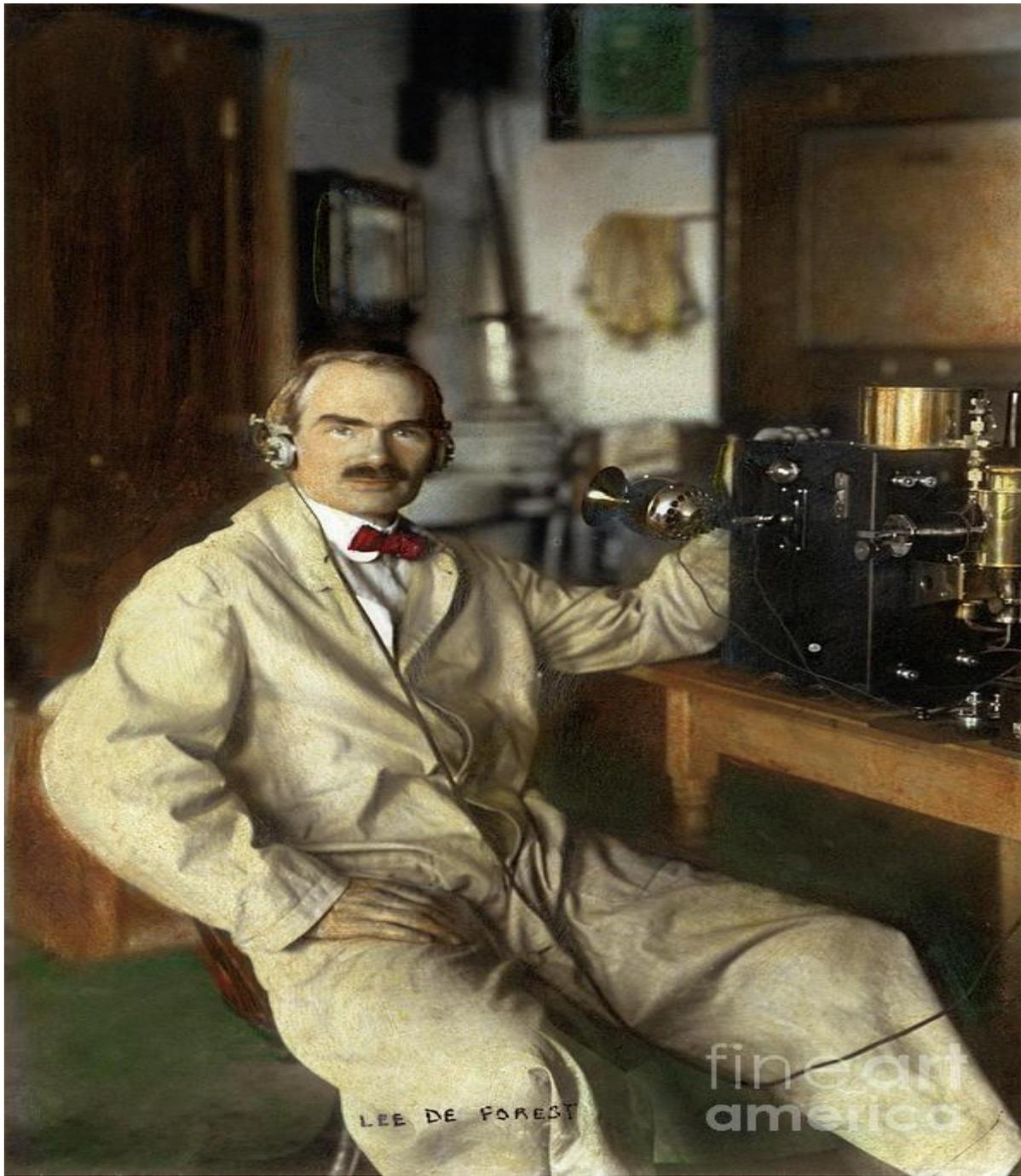
- изобретения А. С. Поповым радио (7 мая 1895 года), и начало использования радиоприёмников
- изобретение Ли де Форестом лампового триода, первого усилительного элемента,
- использование Лосевым полупроводникового элемента для усиления и генерации электрических сигналов,
- развитие твёрдотельной электроники,
- использование проводниковых и полупроводниковых элементов (работы Иоффе, Шотки),
- изобретение в 1947 году транзистора (Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн),
- создание интегральной микросхемы и последующее развитие микроэлектроники, основной области современной электроники.

Изобретение радио А.С. Поповым.

Схема приёмника А.С. Попова.



Александр Степанович Попов
(1859-1906 г.)





Краткая история

- 1923 г. использование Лосевым полупроводникового элемента для усиления и генерации электрических сигналов «Световое реле»;



Олег Владимирович Лосев



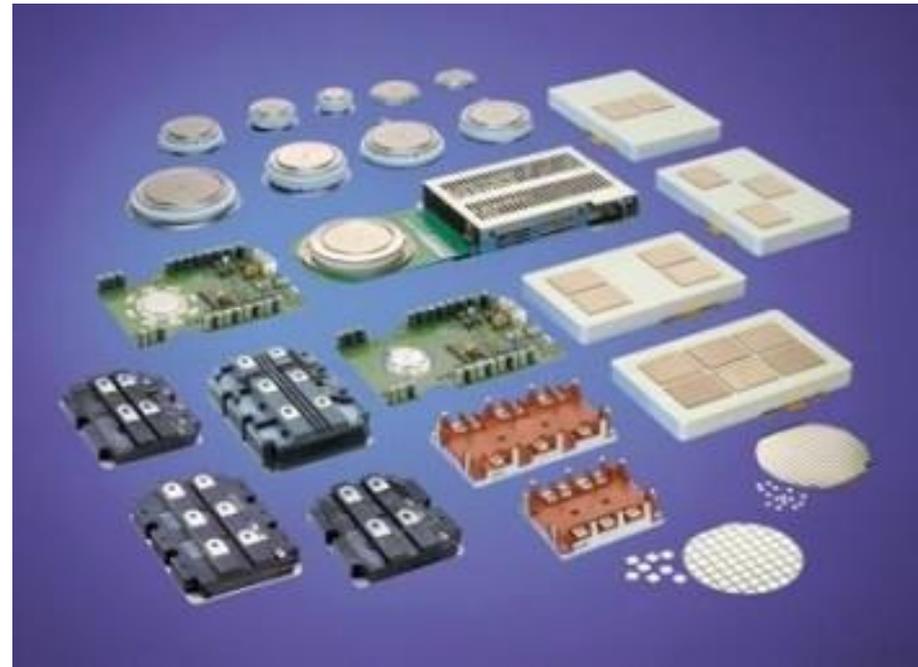
Лосев в 1923 г. на карборундовом детекторе обнаружил холодное безинерционное свечение, т.е. способность полупроводников генерировать электромагнитные излучения в световом диапазоне волн.

В 1927-1928 годах Олег Владимирович сделал следующее открытие: емкостный фотоэффект в полупроводниках, т.е. способность кристаллов преобразовывать световую энергию в электрическую (принцип действия солнечных батарей).

А. Ф. Иоффе часто называют «отцом физики полупроводников», а его книжку «Основы термоэлектричества» — маленькую брошюру, в которой нет и двухсот страниц, «библией термоэлектричества». Однако в 1936 г. во времена сталинского террора на специальной сессии Академии наук Ленинградский Физтех и его руководитель подверглись резкой критике. Но Абрам Федорович проявил твердость, принципиальность и продолжил научные работы. В 1942 г. он был удостоен первой Государственной премии СССР первой степени за работу «Полупроводники в физике и технике».



Полупроводники



Прежде всего поясним само понятие – полупроводник.

По способности проводить электрические заряды вещества условно делятся на проводники и непроводники электричества.

Тела и вещества, в которых можно создавать электрический ток, называют проводниками.

Металлы, уголь, кислоты, растворы солей, щелочи, живые организмы и многие другие тела и вещества

Тела и вещества, в которых нельзя создавать электрический ток, называют непроводниками тока.

Воздух, стекло, парафин, слюда, лаки, фарфор, резина, пластмассы, различные смолы, маслянистые жидкости, сухое дерево, сухая ткань, бумага и другие вещества.

Проводники

**Непроводники
(диэлектрики)**

Полупроводники по электропроводности занимают промежуточное место между проводниками и непроводниками.

		группы															
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII								
1	(H)							H 1	He 2								
2	Li 3	Be 4	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10									
3	Na 11	Mg 12	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18									
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28							
5	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36									
6	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46							
7	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54									
8	Cs 55	Ba 56	La* 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78							
9	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86									
10	Fr 87	Ra 88	Ac** 89	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	110							

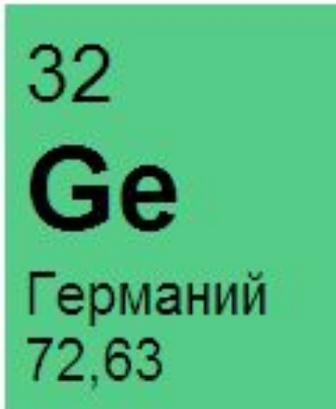
Полупроводники

Бор В, углерод С, кремний Si
 фосфор Р, сера S, германий Ge,
 мышьяк As, селен Se, олово Sn,
 сурьма Sb, теллур Те и йод I.

Полупроводники - это ряд элементов таблицы Менделеева, большинство минералов, различные окислы, сульфиды, теллуриды и другие химические соединения.

VII
 F
 Cl
 Br
 I
 Al

Атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, вращающихся вокруг ядра по стабильным орбитам.



Электронная оболочка атома германия состоит из 32 электронов, четыре из которых вращаются по его внешней орбите.

Ядро атома

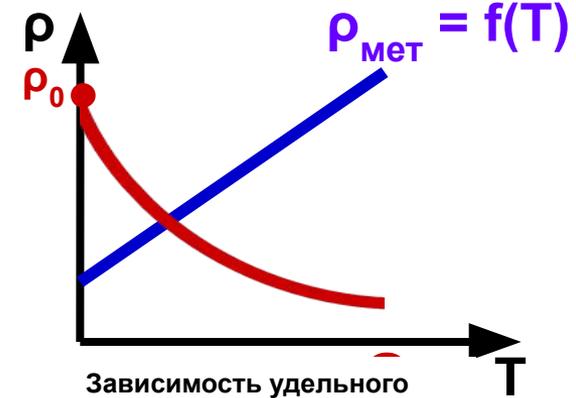
Электронная
оболочка атома

Сколько электронов у атома германия?

Четыре внешних электрона, называемые валентными, существенным образом определяют атома германия. Атом германия стремится приобрести устойчивую структуру, присущую атомам инертных газов и отличающуюся тем, что на внешней их орбите находится всегда строго определенное число электронов (например, 2, 8, 18 и т. д.). Таким образом, для приобретения подобной структуры атому германия потребовалось бы принять на внешнюю орбиту еще четыре электрона.

**Собственная
(электронно-дырочная)
электрическая проводимость.**

Собственная электрическая проводимость



Зависимость удельного сопротивления ρ металла от абсолютной температуры T

Валентные электроны в кристалле германия связаны с атомами гораздо сильнее, чем в металлах; поэтому концентрация электронов проводимости при комнатной температуре в полупроводниках на много порядков меньше, чем у металлов. Вблизи абсолютного нуля температуры в кристалле германия все электроны заняты в образовании связей. Такой кристалл электрического тока не проводит.

При увеличении температуры полупроводника в единицу времени образуется большее количество электронно-дырочных пар.

Электронно-дырочный механизм проводимости проявляется только у чистых (т. е. без примесей) полупроводников и поэтому называется **собственной электрической проводимостью**.

**Собственная
(электронно-дырочная)
электрическая
проводимость.**

**Проводимость полупроводников
при наличии примесей называется
примесной проводимостью.**

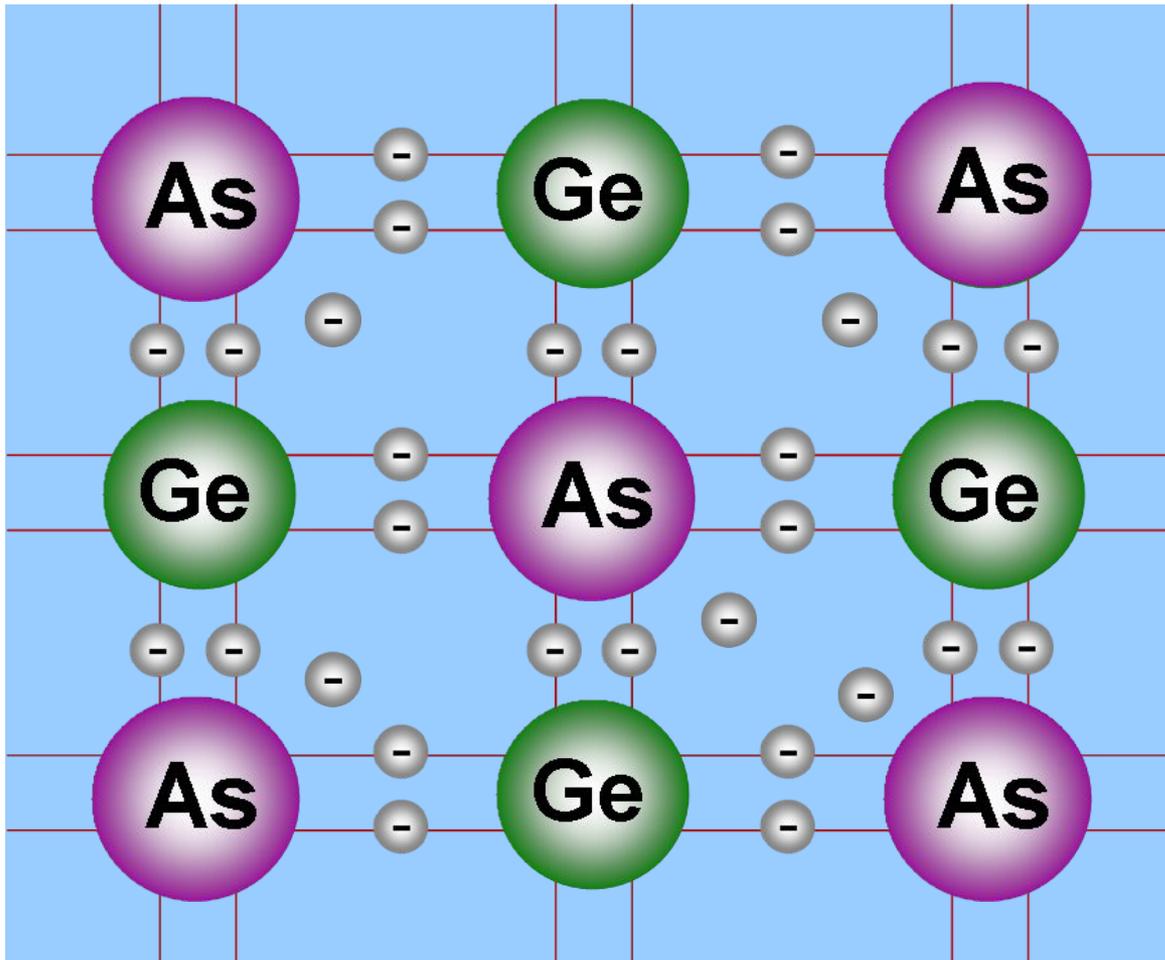
**Примесная (электронно-
дырочная) электрическая
проводимость.**

**Примесными центрами могут быть:
атомы или ионы химических
элементов, внедренные в решетку
полупроводника;
избыточные атомы или ионы,
внедренные в междоузлия решетки;
различного рода другие дефекты и
искажения в кристаллической
решетке: пустые узлы, трещины,
сдвиги, возникающие при
деформациях кристаллов, и др.**

**Примесная
(электронная)
электрическая
проводимость.**

**Примесная
(дырочная)
электрическая
проводимость.**

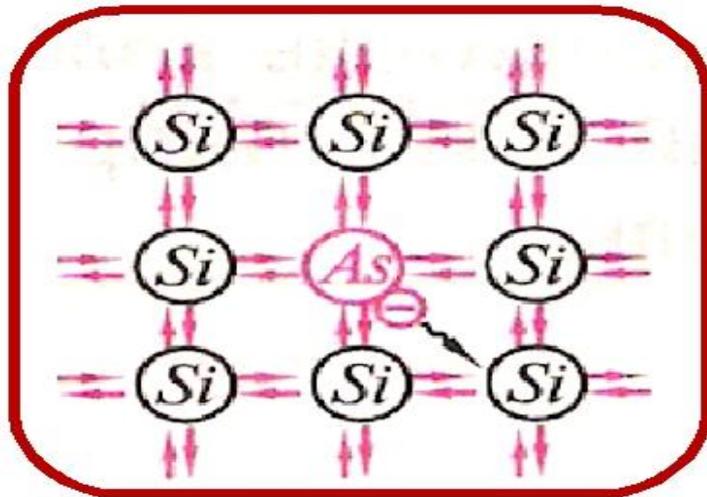
**Изменяя концентрацию примесей, можно
значительно увеличивать число носителей
зарядов того или иного знака и создавать
полупроводники с преимущественной
концентрацией либо отрицательно, либо
положительно заряженных носителей.**



Электронная проводимость возникает, когда в кристалл германия с четырехвалентными атомами введены пентавалентные атомы (например, атомы мышьяка, As).

Электронная проводимость (Донорная примесь)

а) донорная примесь (отдающая)



валентность приме-
си больше, чем у ос-
новного вещества:
кремний (Si) — 4-ва-
лентный
мышьяк (As) — 5-ва-
лентный

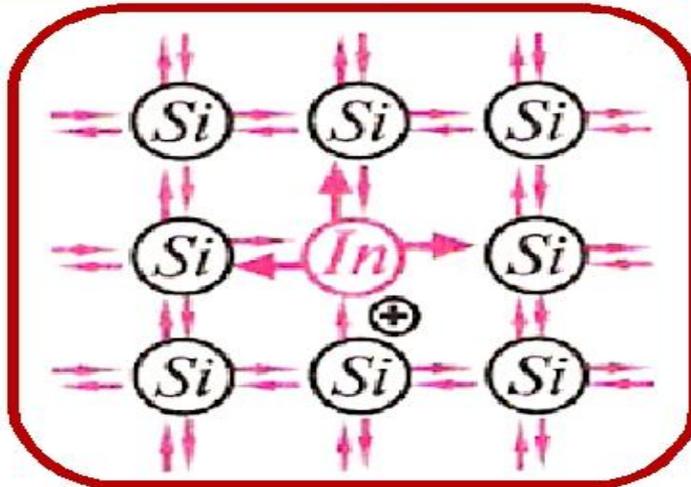
Один электрон в связи лишний

- - основные носители заряда: электроны
 - - неосновные носители заряда: дырки
- полупроводники *n-типа* (**электронная проводимость**)



Дырочная проводимость (Акцепторная примесь)

б) акцепторная примесь (принимаящая)

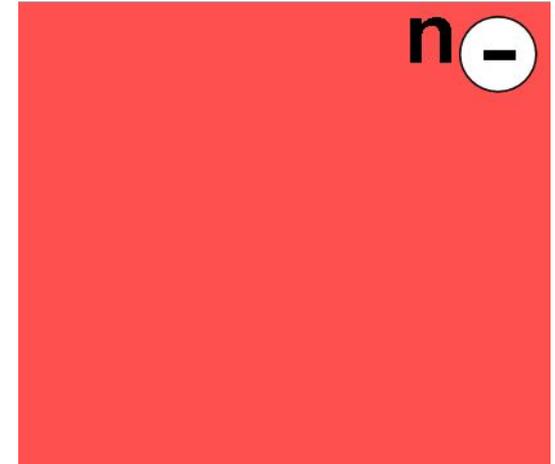


валентность приме-
си меньше, чем у ос-
новного вещества:
кремний (Si) — 4-ва-
лентный
индий (In) — 3-ва-
лентный

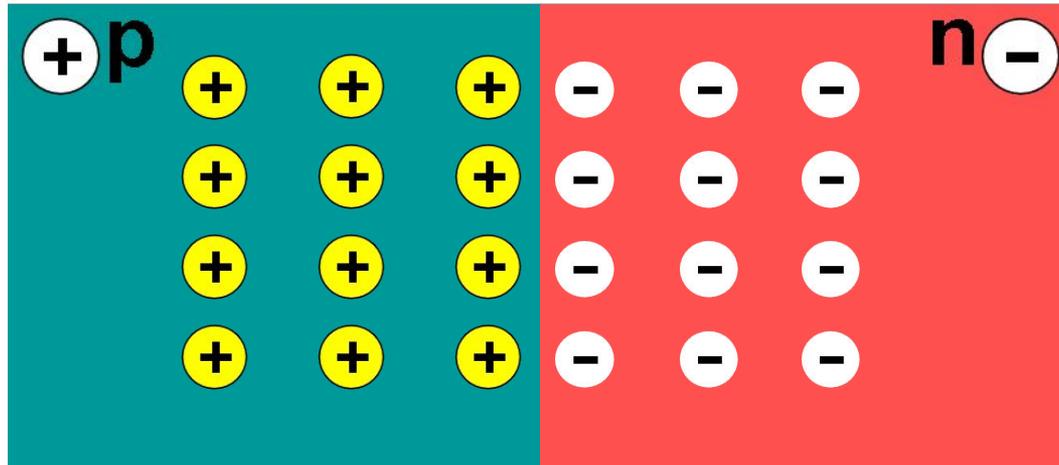
- нехватка одного электрона для образования ковалентной связи — дырка
 - - основные носители заряда: дырки
 - - неосновные носители заряда: электроны
- полупроводники *p-типа* (**дырочная проводимость**)



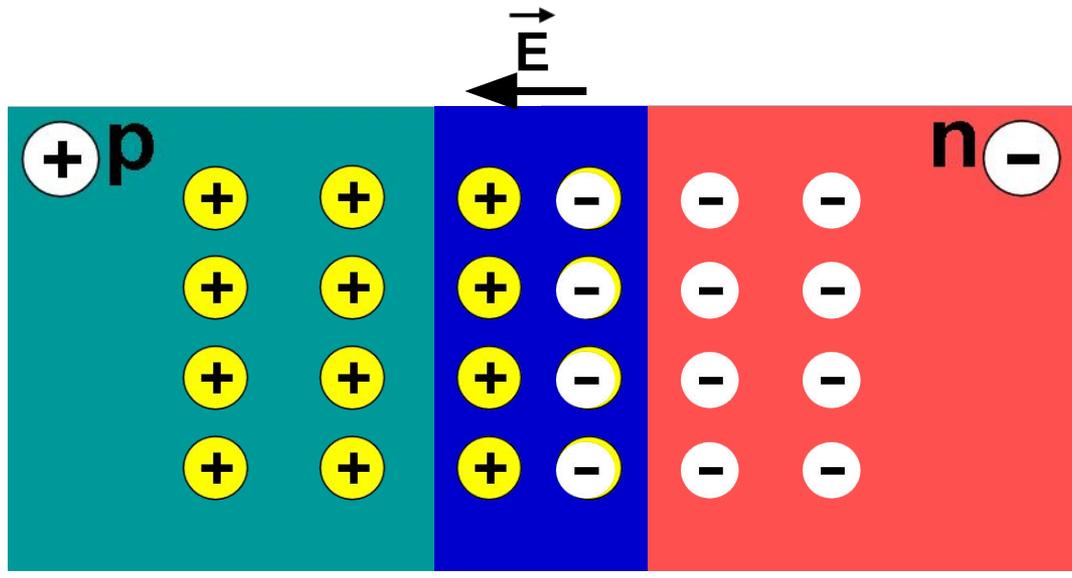
Электронно-дырочный переход



Полупроводник с избыточными электронами проводимости называют полупроводником n-типа, с избыточными дырками полупроводником p-типа.



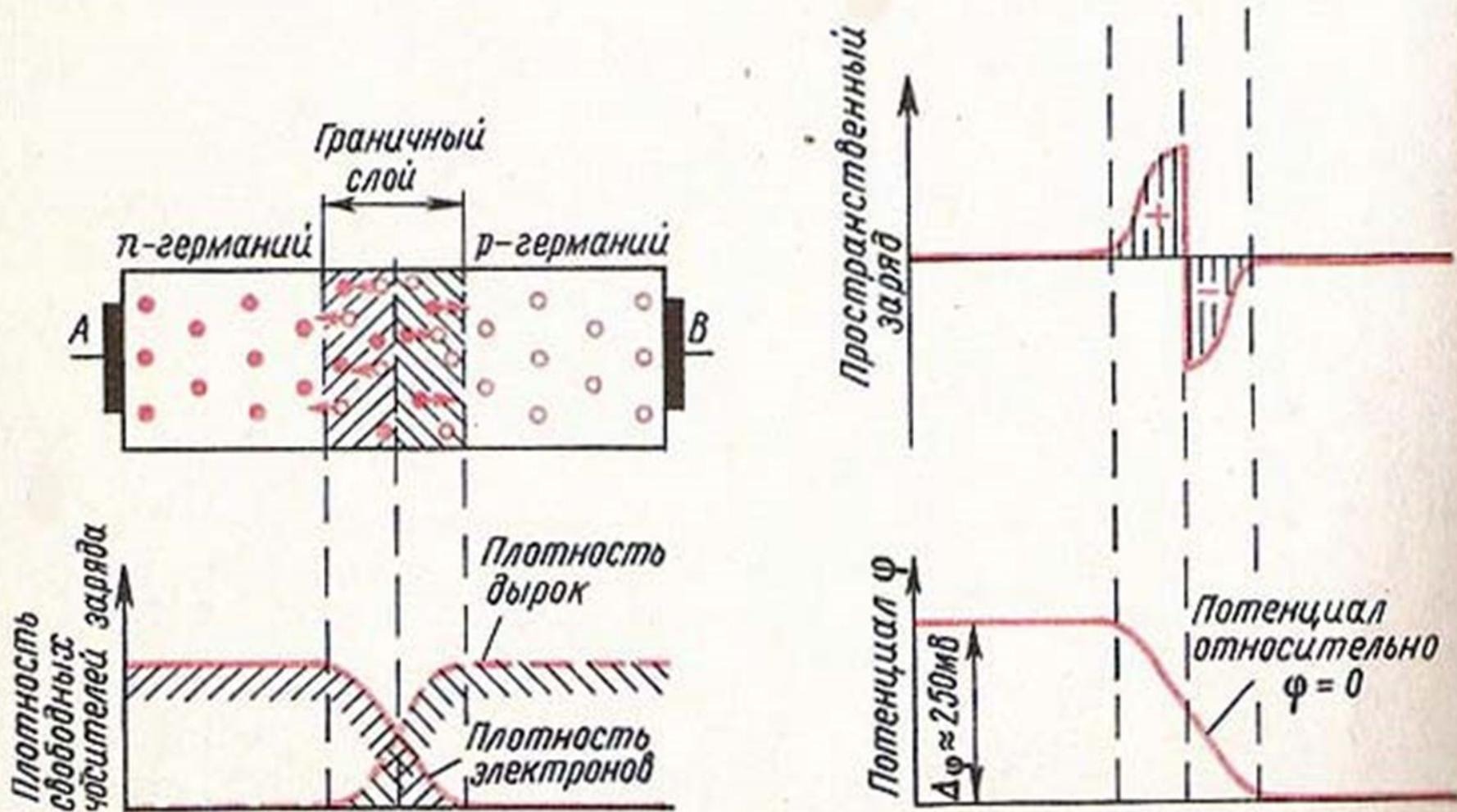
Электрическая проводимость p-типа определяется дырками, поэтому их называют здесь основными носителями заряда, а электроны проводимости - не основными. В полупроводнике n-типа - наоборот.

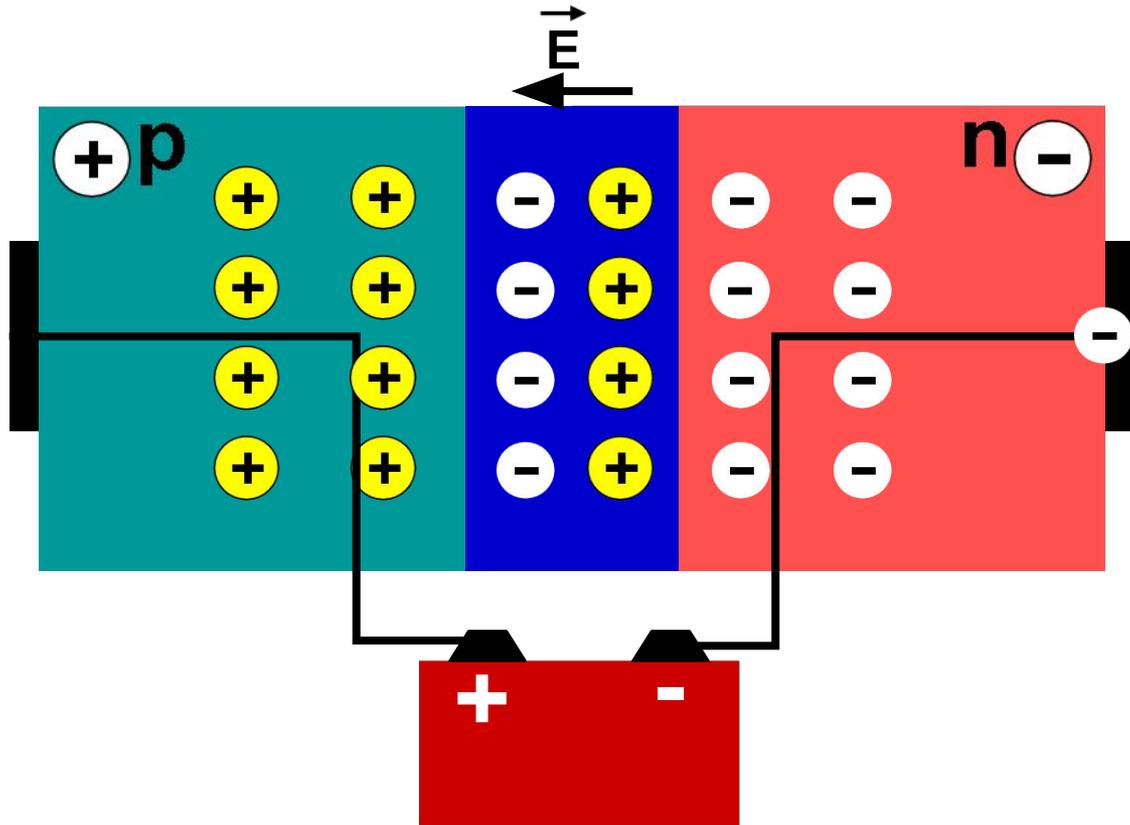


- *Электрическим переходом* в полупроводнике называется граничный слой между двумя областями, физические характеристики которых имеют существенные физические различия.

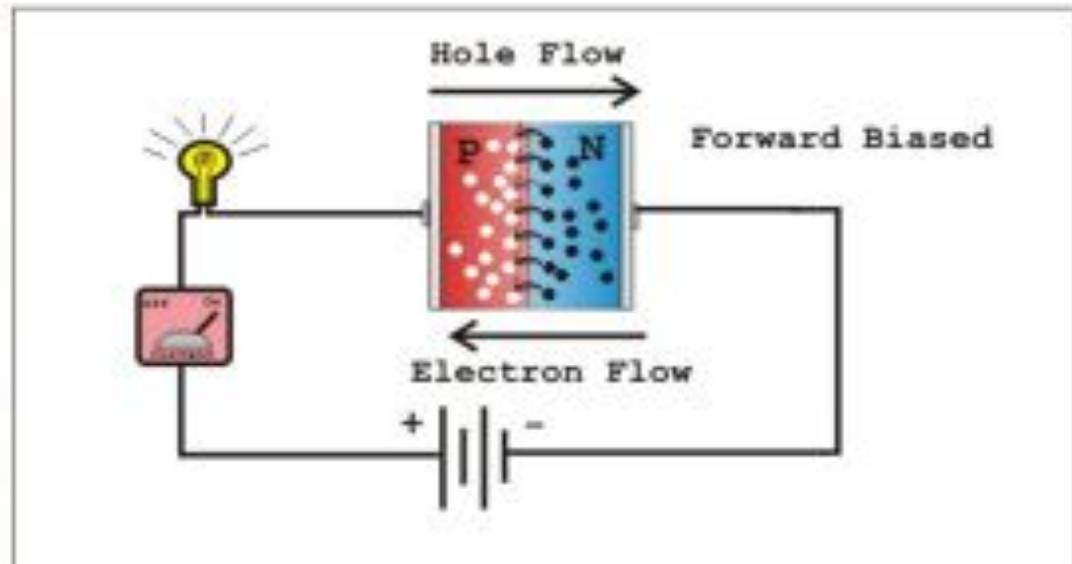
- Различают следующие виды электрических переходов:
- *электронно-дырочный*, или *p–n-переход* – переход между двумя областями полупроводника, имеющими разный тип электропроводности;
- *переход металл – полупроводник* - переходы между двумя областями, если одна из них является металлом, а другая полупроводником *p*- или *n*-типа;
- переходы между двумя областями с одним типом электропроводности, отличающиеся значением концентрации примесей;
- переходы между двумя полупроводниковыми материалами с различной шириной запрещенной зоны (*гетеропереходы*).

p-n переход





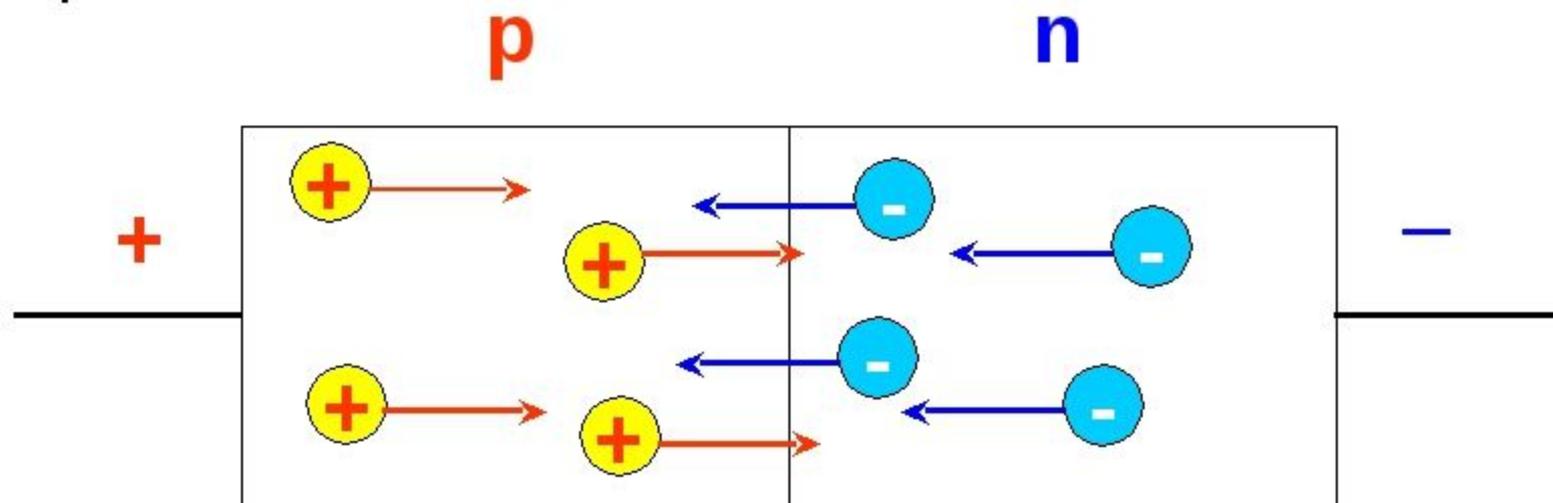
P-n переход прямое включение



p – n переход и его свойства

Электрический контакт двух полупроводников **p** и **n** типа называется **p – n переходом**

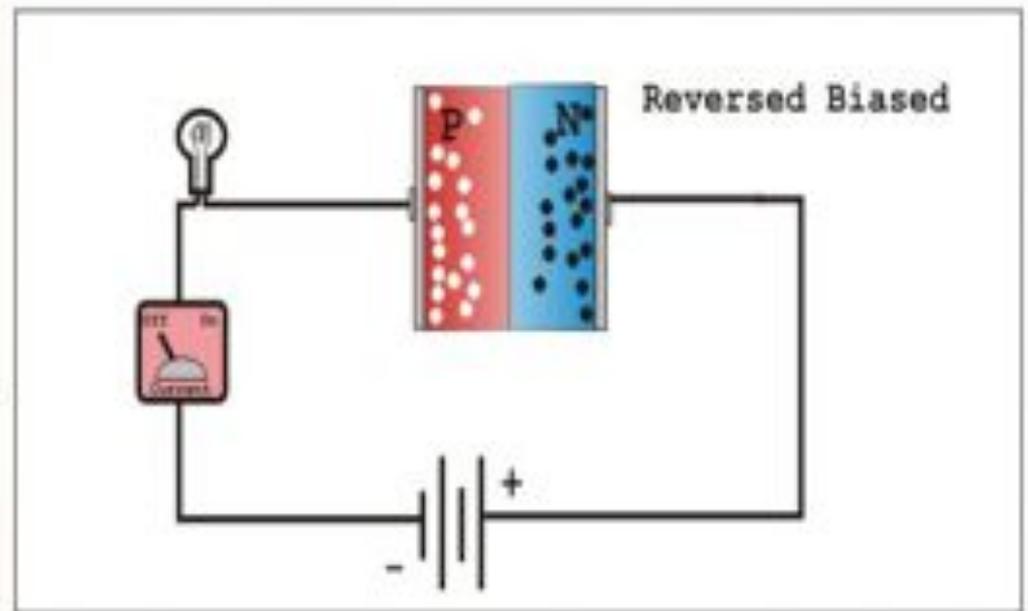
1. Прямое включение



Ток через **p – n** переход осуществляется основными носителями заряда (дырки двигаются вправо, электроны – влево)

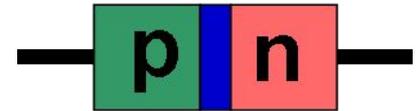
Такое включение называется **прямым**, сопротивление перехода мало, в прямом направлении **p – n** переход хорошо проводит электрический ток

P-n переход обратное включение



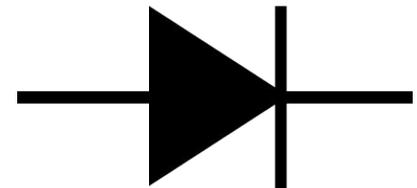
Способность p–n-перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в приборах, которые называются полупроводниковыми диодами.

Полупроводниковые диоды изготавливают из кристаллов кремния или германия. При их изготовлении в кристалл с каким-либо типом проводимости вплавляют примесь, обеспечивающую другой тип проводимости.



Изображают полупроводниковые диоды на электрических схемах в виде треугольника и отрезка, проведенного через одну из его вершин параллельно противоположной стороне. В зависимости от назначения диода его обозначение может содержать дополнительные символы. В любом случае острая вершина треугольника указывает на направление протекания прямого тока через диод. Треугольник соответствует p-области и называется иногда анодом, или эмиттером, а прямолинейный отрезок — n-области и называется катодом, или базой.

Эмиттер Э



База Б

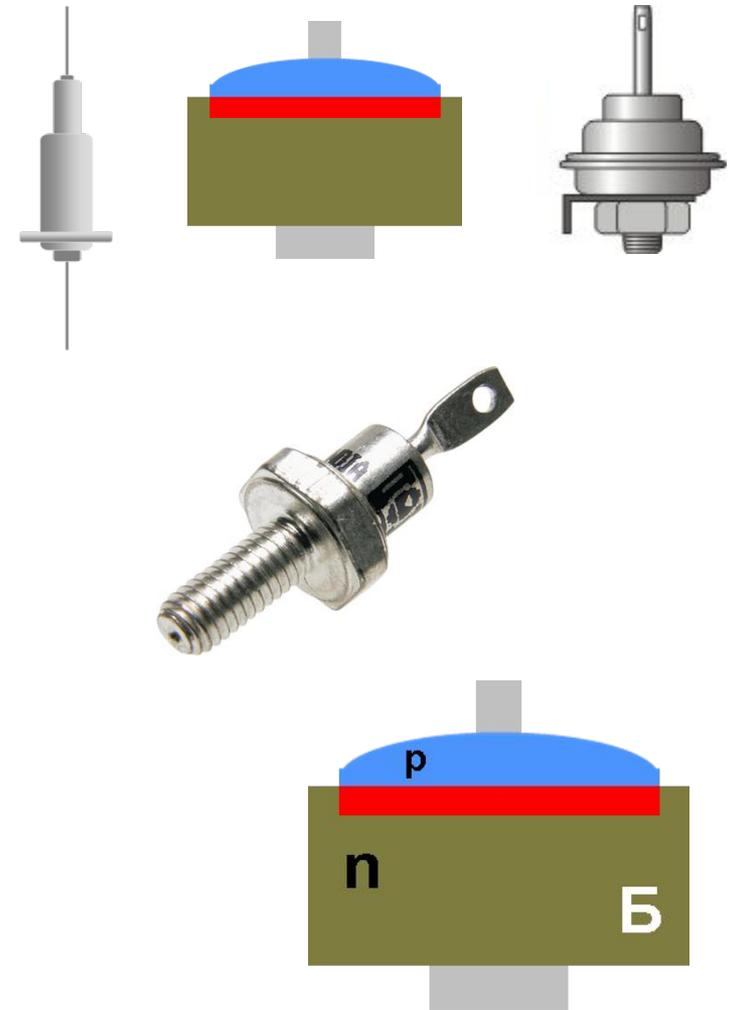
Вентильное свойство $p-n$ -перехода

- $P-n$ -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 вентилем*.

Строение полупроводникового диода

По конструкции полупроводниковые диоды могут быть плоскостными или точечными.

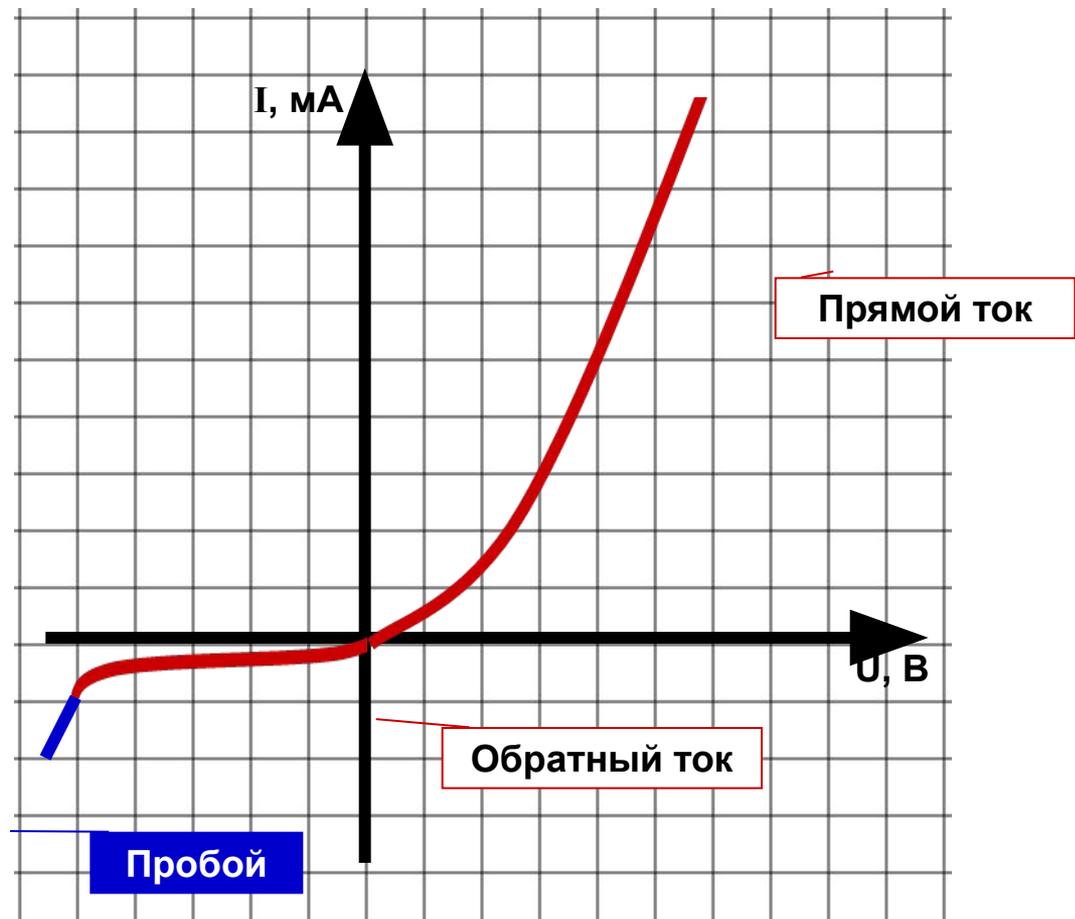
Как правило, диоды изготавливают из кристалла германия или кремния, с проводимостью n-типа. В одну из поверхностей кристалла вплавляют каплю индия. Вследствие диффузии атомов индия в глубь второго кристалла, в нём образуется область p-типа. Остальная часть кристалла по-прежнему имеет проводимость n-типа. Между ними и возникает p-n - переход. Для предотвращения воздействия влаги и света, а также для прочности кристалл заключают в корпус, снабжая контактами. Германиевые и кремниевые диоды могут работать в разных интервалах температур и с токами различной силы и напряжения.



**Вольт - амперная
характеристика
полупроводникового диода**

Обратный ток очень мал и почти не зависит от величины обратного напряжения, т. к. он образован дрейфовым током (не основными носителями зарядов). Но при определенном напряжении обратный ток резко возрастает. Это явление называется электрическим пробоем.

Объясняется это тем, что электроны приобретают большую скорость и, ударяясь об атомы, выбивают их них электроны. Если напряжение не увеличивать, диод останется исправным. Если же продолжать увеличивать напряжение, то электрический пробой переходит в тепловой пробой. Это значит, что диод нагревается, и ток резко увеличивается за счет выхода электронов из своих атомов при повышении температуры. Тепловой пробой разрушает полупроводник, диод неисправен.



Виды пробоя **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.

- Существуют четыре типа пробоя:
- лавинный,
- туннельный,
- тепловой,
- поверхностный.

- При увеличении обратного напряжения, приложенного к $p-n$ -переходу, обратный ток изменяется незначительно, так как 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*.

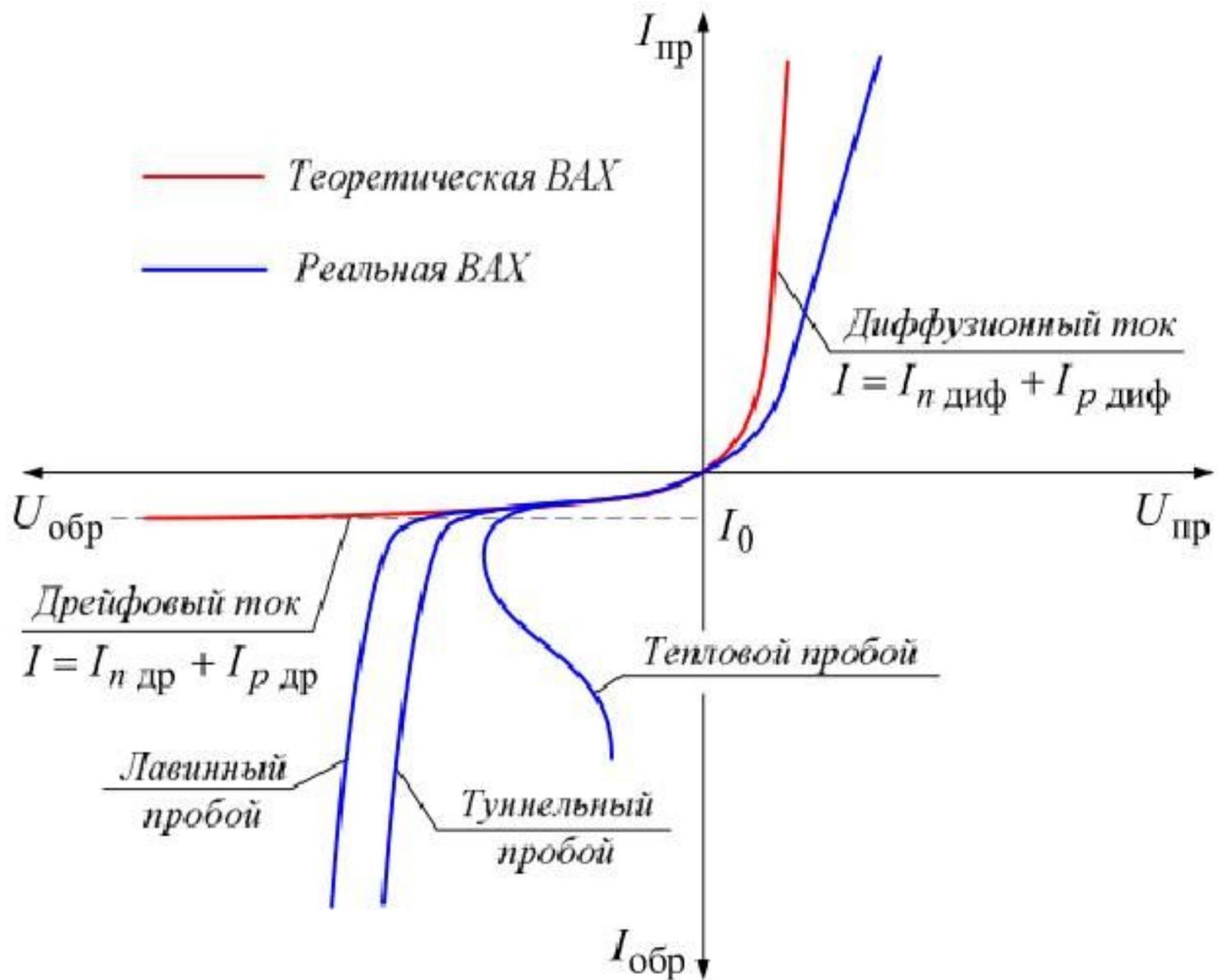


Рис. 1.19. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

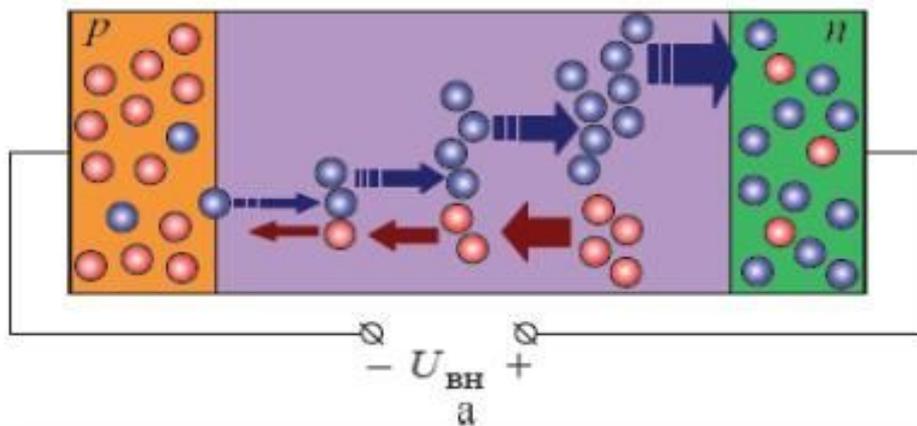
Виды пробоев p - n -перехода

- Возможны обратимые и необратимые пробои.
- Обратимый пробой – это пробой, после которого p - n -переход сохраняет работоспособность.
- Необратимый пробой ведет к разрушению структуры полупроводника.

- *Лавинный и туннельный* пробои объединятся под названием – *электрический пробой*, который является **обратимым**.
- К **необратимым** относят *тепловой и поверхностный*.

- *Лавинный пробой* свойственен полупроводникам, со значительной толщиной $p-n$ -перехода, образованных слаболегированными полупроводниками.
- Пробой происходит под действием сильного электрического поля с напряженностью $E \gg (8 \dots 12) \times 10^4$ В/см.
- В лавинном пробое основная роль принадлежит неосновным носителям, образующимся под действием тепла в $p-n$ -переходе.

- Эти носители испытывают со стороны электрического поля $p-n$ -перехода ускоряющее действие и могут разогнаться до такой скорости, что их кинетической энергии может оказаться достаточно, чтобы при соударении с атомом полупроводника ионизировать его, т.е. «выбить» один из его валентных электронов и перебросить его в зону проводимости, образовав при этом пару «электрон –дырка».



Происходит резкий рост обратного тока при практически неизменном обратном напряжении.

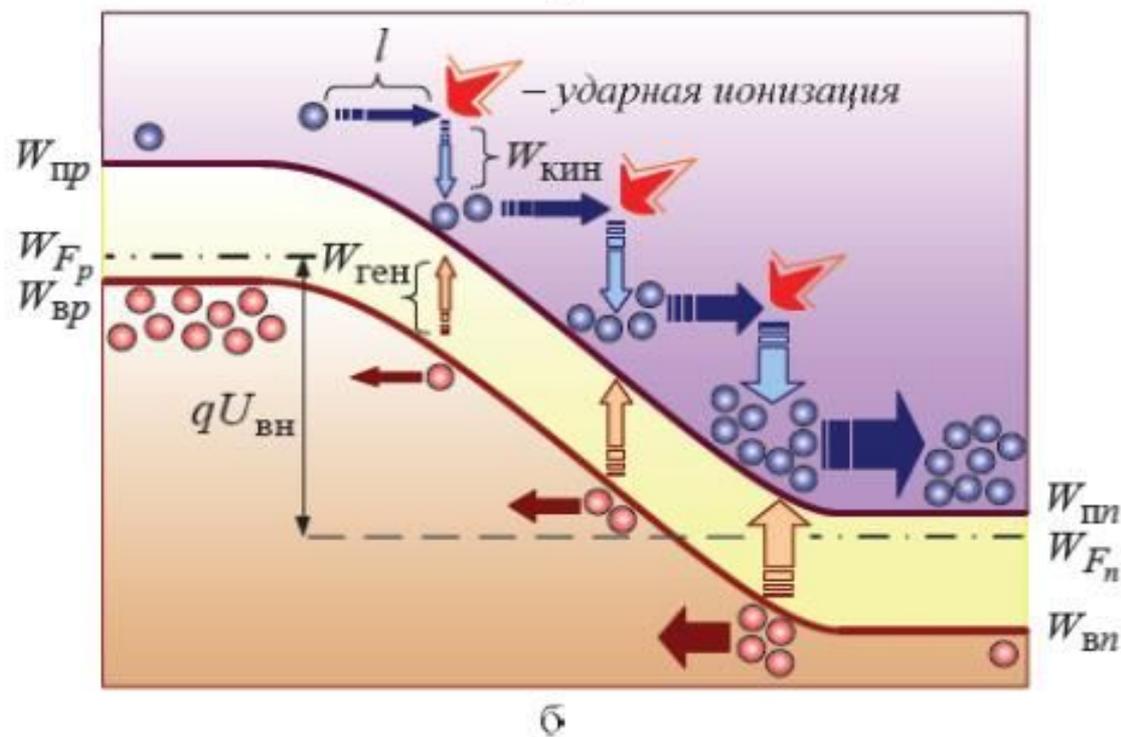


Рис. 1.20. Схема, иллюстрирующая лавинный пробой в $p-n$ -переходе: распределение токов (а); зональная диаграмма (б), иллюстрирующая лавинное умножение при обратном смещении перехода

- *Туннельный пробой* происходит в очень тонких *p-n*-переходах, что возможно при очень высокой концентрации примесей $N \gg 10^{19} \text{ см}^{-3}$, когда ширина перехода становится малой (порядка 0,01 мкм) и при небольших значениях обратного напряжения (несколько вольт), когда возникает большой градиент электрического поля.

- Высокое значение напряженности электрического поля, воздействуя на атомы кристаллической решетки, повышает энергию валентных электронов и приводит к их туннельному «просачиванию» сквозь «тонкий» энергетический барьер из валентной зоны p -области в зону проводимости n -области. Причем «просачивание» происходит без изменения энергии носителей заряда.

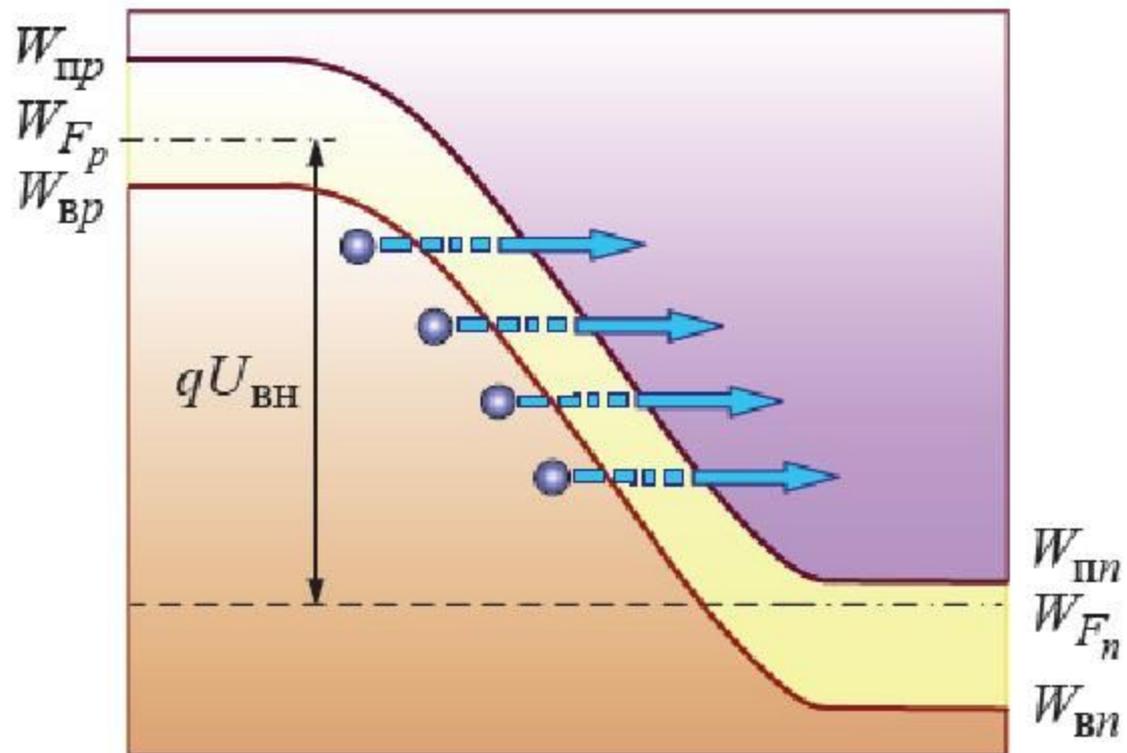


Рис. 1.21. Зонная диаграмма, иллюстрирующая туннельный пробой p - n -перехода при обратном смещении

- Если обратный ток при обоих видах электрического пробоя не превысит максимально допустимого значения, при котором произойдет перегрев и разрушение кристаллической структуры полупроводника, то они являются обратимыми и могут быть воспроизведены многократно.

- *Тепловым* называется пробой $p-n$ -перехода, обусловленный ростом количества носителей заряда при повышении температуры кристалла.
- С увеличением обратного напряжения и тока возрастает тепловая мощность, выделяющаяся в $p-n$ -переходе, и, соответственно, температура кристаллической структуры.

- Под действием тепла усиливаются колебания атомов кристалла и ослабевают связи валентных электронов с ними, возрастает вероятность перехода их в зону проводимости и образования дополнительных пар носителей «электрон – дырка».

Ёмкость $p-n$ -перехода

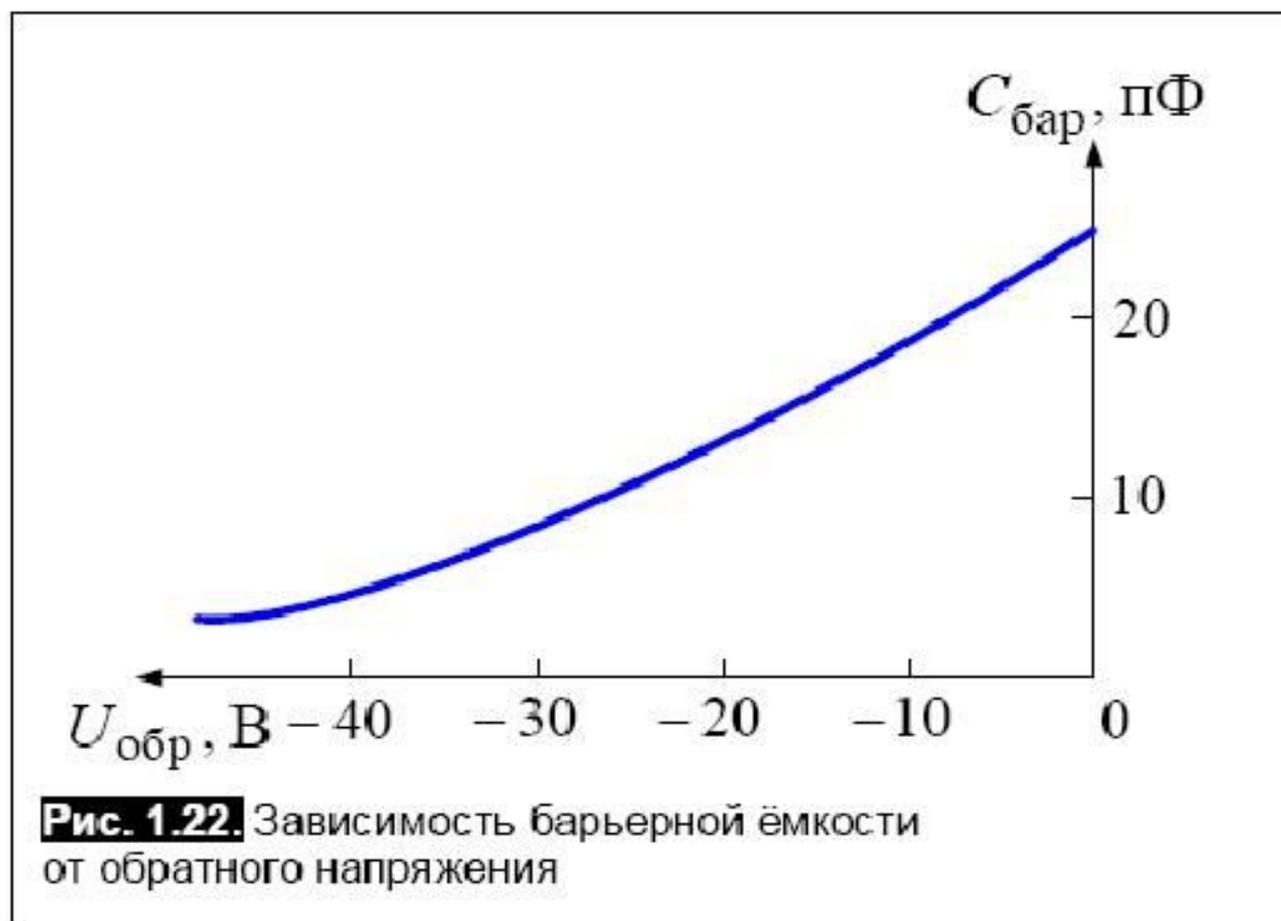
- Изменение внешнего напряжения на $p-n$ -переходе приводит к изменению ширины обедненного слоя и, соответственно, накопленного в нем электрического заряда
- Исходя из этого $p-n$ -переход ведет себя подобно конденсатору, ёмкость которого определяется как отношение изменения накопленного в $p-n$ -переходе заряда к обусловившему это изменение приложенному внешнему напряжению.

- Различают *барьерную* (или зарядную) и *диффузионную ёмкость* p - n -перехода.
- Барьерная ёмкость соответствует обратновключенному p - n -переходу, который рассматривается как обычный конденсатор, где пластинами являются границы обедненного слоя, а сам обедненный слой служит несовершенным диэлектриком с увеличенными диэлектрическими потерями:

$$C_{\text{бар}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\delta},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала; ε_0 – электрическая постоянная; S – площадь p – n -перехода; δ – ширина обеднённого слоя.

- При возрастании обратного напряжения ширина перехода увеличивается и ёмкость $C_{бар}$ уменьшается.



- Диффузионная ёмкость характеризует накопление подвижных носителей заряда в n - и p -областях при прямом напряжении на переходе.
- Она практически существует только при прямом напряжении, когда носители заряда диффундируют (инжектируют) в большом количестве через пониженный потенциальный барьер и, не успев рекомбинировать, накапливаются в n - и p -областях.

- Ёмкость $C_{\text{диф}}$ представляет собой отношение зарядов к разности потенциалов:

$$C_{\text{диф}} = \frac{\Delta Q_{\text{диф}}}{\Delta U_{\text{пр}}} .$$

- Диффузионная ёмкость значительно больше барьерной, но использовать ее не удастся, т.к. она шунтируется малым прямым сопротивлением $p-n$ -перехода.
- Таким образом, $p-n$ -переход можно использовать в качестве **конденсатора переменной емкости**, управляемого величиной и знаком приложенного напряжения.

Контакт «металл – полупроводник»

- Контакт «металл – полупроводник» возникает в месте соприкосновения полупроводникового кристалла n - или p - типа проводимости с металлами. Происходящие при этом процессы определяются соотношением работ выхода электрона из металла A_m и из полупроводника A_p .

- Под *работой выхода электрона* понимают энергию, необходимую для переноса электрона с уровня Ферми на энергетический уровень свободного электрона.
- Чем меньше работа выхода, тем больше электронов может выйти из данного тела.

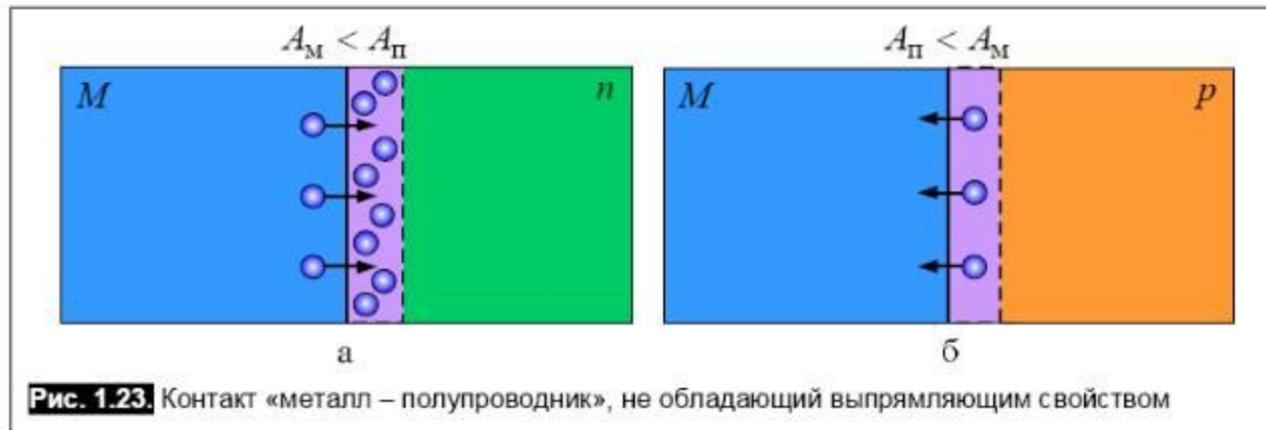
- В результате диффузии электронов и перераспределения зарядов нарушается электрическая нейтральность прилегающих к границе раздела областей, возникает контактное электрическое поле и контактная разность потенциалов

$$\varphi_{\text{КОНТ}} = \frac{(A_{\text{М}} - A_{\text{П}})}{q}.$$

- Переходный слой, в котором существует контактное электрическое поле при контакте «металл – полупроводник», называется *переходом Шоттки*, по имени немецкого ученого В. Шоттки, который первый получил основные математические соотношения для электрических характеристик таких переходов.

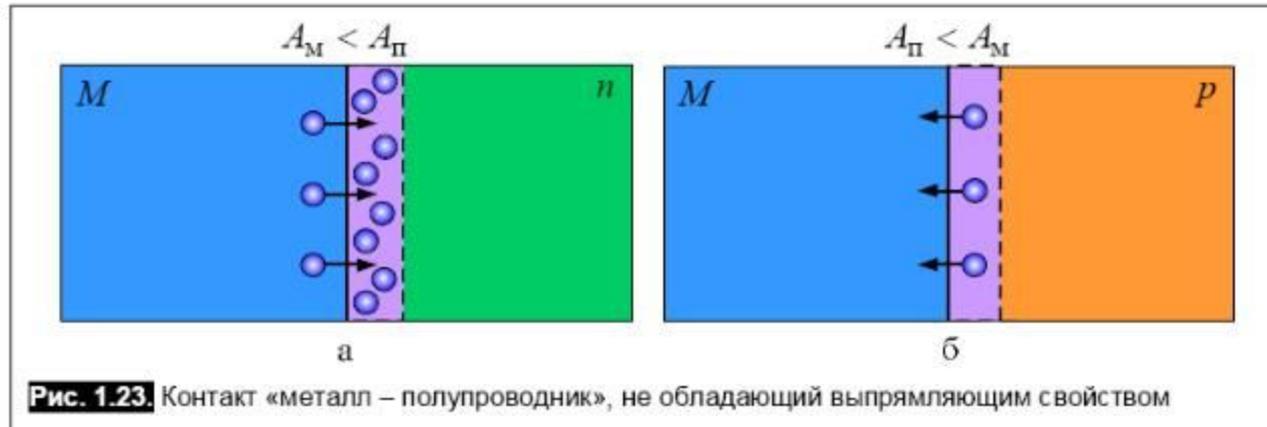
- Контактное электрическое поле на переходе Шоттки сосредоточено практически в полупроводнике, так как концентрация носителей заряда в металле значительно больше концентрации носителей заряда в полупроводнике.
- Перераспределение электронов в металле происходит в очень тонком слое, сравнимом с межатомным расстоянием.

- 1. $A_M < A_{\Pi}$, полупроводник n -типа (а). В данном случае будет преобладать выход электронов из металла (M) в полупроводник, поэтому в слое полупроводника около границы раздела накапливаются основные носители (электроны), и этот слой становится обогащенным, т.е. имеющим повышенную концентрацию электронов.

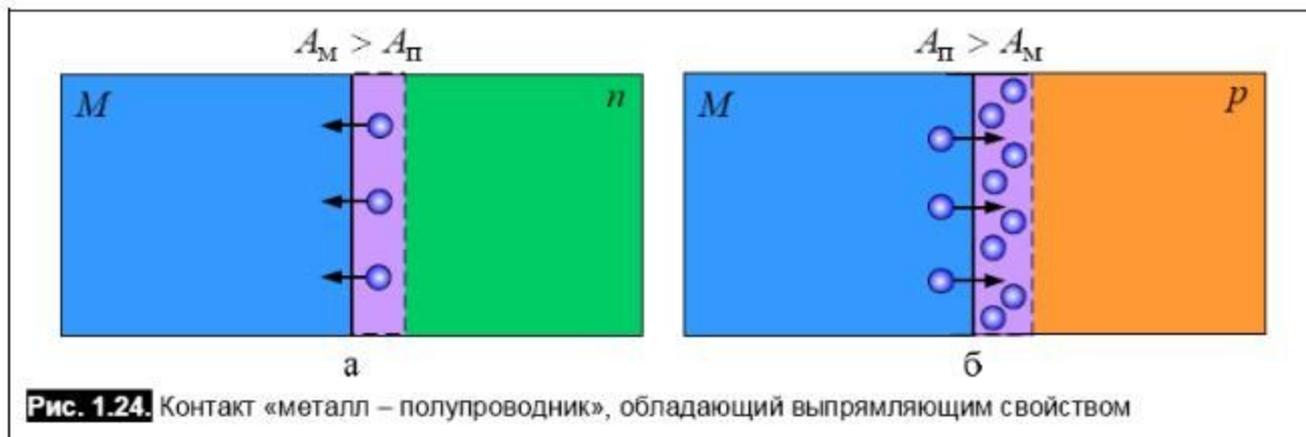


- Сопротивление этого слоя будет малым при любой полярности приложенного напряжения, и, следовательно, такой переход не обладает выпрямляющим свойством. Его иначе называют *невыпрямляющим переходом*.

- 2. $A_{\text{п}} < A_{\text{м}}$, полупроводник p -типа (б). В этом случае будет преобладать выход электронов из полупроводника в металл, при этом в приграничном слое также образуется область, обогащенная основными носителями заряда (дырками), имеющая малое сопротивление. Такой переход также не обладает выпрямляющим свойством.

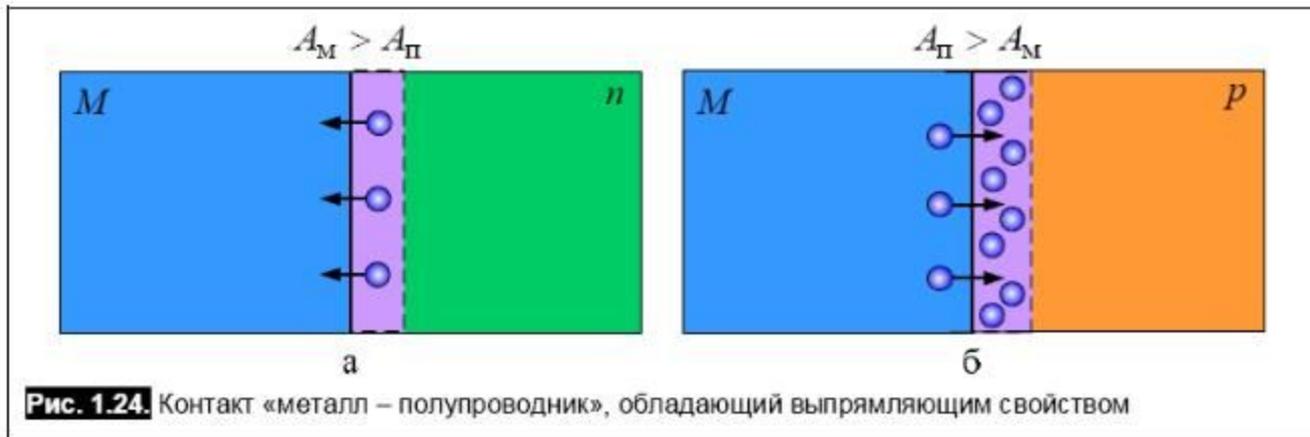


- 3. $A_M > A_{\Pi}$, полупроводник n -типа (а). При таких условиях электроны будут переходить из полупроводника в металл и в приграничном слое полупроводника образуется область, обедненная основными носителями заряда и имеющая большое сопротивление.



- Создается сравнительно высокий потенциальный барьер, высота которого будет существенно зависеть от полярности приложенного напряжения.
- Если $A_n \gg A_m$, то возможно образование инверсного слоя (p -типа). Такой контакт обладает выпрямляющим свойством.

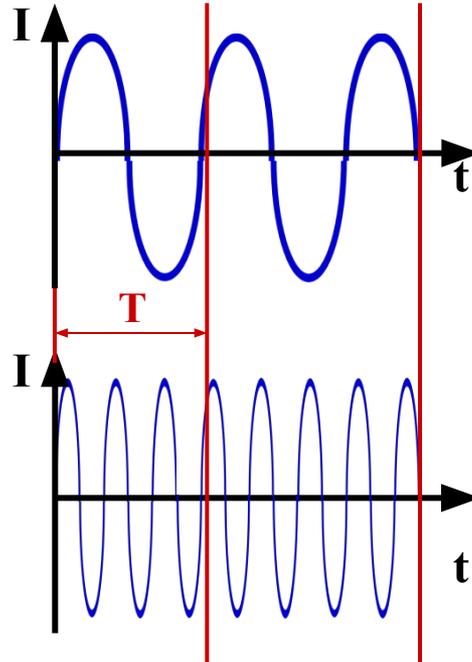
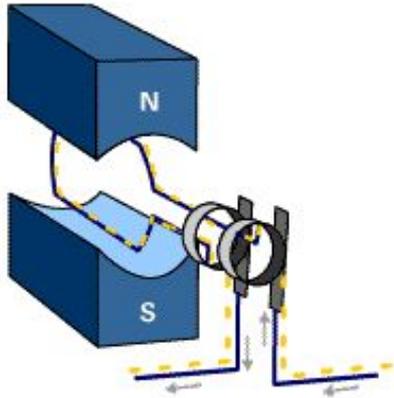
- 4. $A_{\text{п}} > A_{\text{м}}$, полупроводник p -типа (б). Контакт, образованный при таких условиях обладает выпрямляющим свойством, как и предыдущий.



Переменный ток

Переменный ток

Рассмотрим понятие «переменный ток» на самом простом уровне.



Чем быстрее вращается рамка, тем больше частота переменного тока.

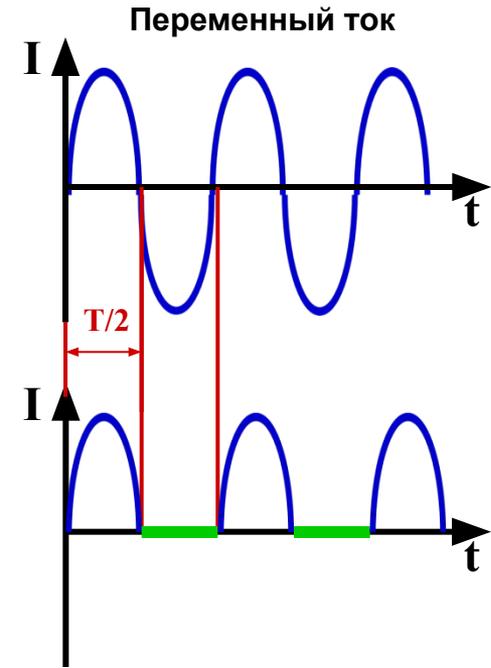
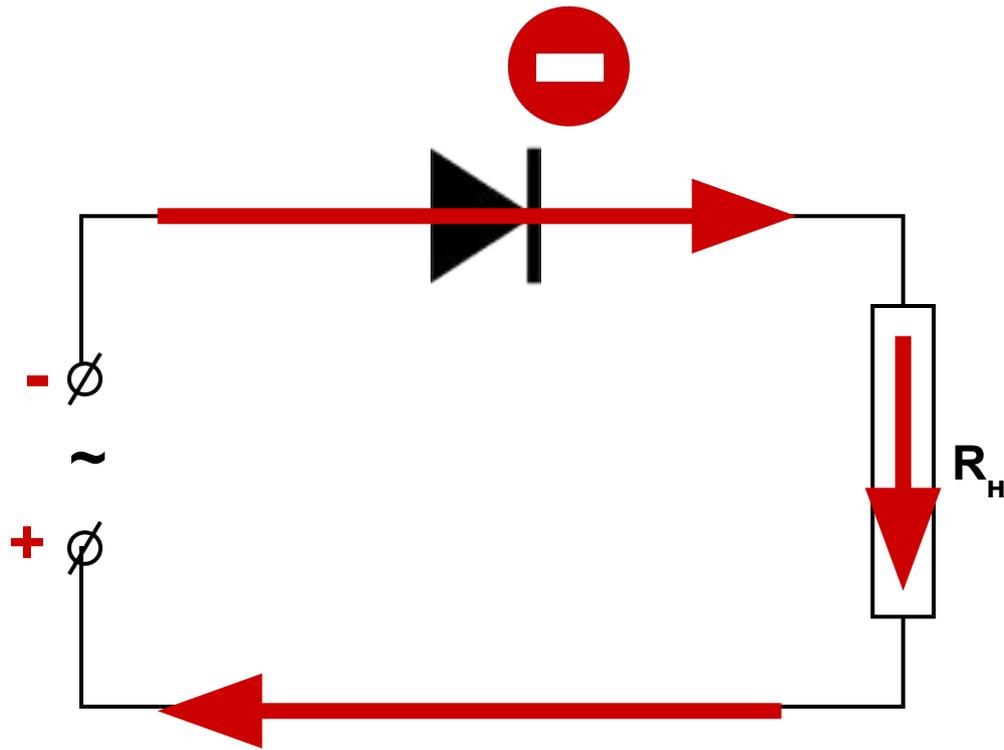
Синусоидальный характер

T – период переменного тока. Это наименьший промежуток времени (выраженный в секундах), через который изменения силы тока (и напряжения) повторяются

В электроэнергетических системах России и большинства стран мира принята стандартная частота $f = 50$ Гц, в США 60 Гц. В технике связи применяются переменный ток высокой частоты (от 100 кГц до 30 ГГц). Для специальных целей в промышленности, медицине и др. отраслях науки и техники используют переменный ток самых различных частот.

Переменный ток - электрический ток, который периодически изменяется по модулю и направлению.

Выпрямление переменного тока



Далее процесс повторяется...

Светодиоды



Дополнительный материал.