



ПОЛУПРОВОДНИКИ

Полупроводники - вещества, электропроводность которых при комнатной температуре имеет промежуточное значение между электропроводностью металлов (10^6 — 10^4 Ом $^{-1}$ см $^{-1}$) и диэлектриков (10^{-8} — 10^{-12} Ом $^{-1}$ см $^{-1}$). Характерная особенность полупроводников — возрастание электропроводности с ростом температуры; при низких температурах электропроводность полупроводников мала; на нее влияют и другие внешние воздействия: свет, сильное электрическое поле, потоки быстрых частиц и т. д. Высокая чувствительность электрических и оптических свойств к внешним воздействиям и содержанию примесей и дефектов в кристаллах также характерна для полупроводников. Все эти особенности и определяют их широкое применение в технике. К полупроводникам относится большая группа веществ (Si, Ge и др.). Носителями заряда в полупроводниках являются электроны проводимости и дырки (носители положительного заряда). В идеальных кристаллах они появляются всегда парами, так что концентрации обоих типов носителей равны. В реальных кристаллах, содержащих примеси и дефекты структуры, равенство концентраций электронов и дырок может нарушаться и проводимость осуществляется практически только одним типом носителей. Полное описание природы носителей заряда в полупроводниках и законов их движения дается в квантовой теории твердого тела.

Полупроводниковый диод - полупроводниковый прибор с двумя электродами, обладающий односторонней проводимостью. К полупроводниковым диодам относят обширную группу приборов с р-п-переходом, контактом металл — полупроводник и др. Наиболее распространены электропреобразовательные полупроводниковые диоды. Они служат для преобразования и генерирования электрических колебаний. Это один из основных современных электронных приборов.



Рекомбинация - электронов и дырок в полупроводниках, исчезновение пары электрон проводимости - дырка в результате перехода электрона из зоны проводимости в валентную зону. Избыток энергии может выделяться в виде излучения (излучательная R). Возможна также безизлучательная R , при которой энергия расходуется на возбуждение колебаний кристаллической решётки или передаётся свободным носителям тока при тройных столкновениях (ударная R). R может происходить как при непосредственном столкновении электронов и дырок, так и через примесные центры (центры R), когда электрон сначала захватывается из зоны проводимости на примесной уровень в запрещенной зоне, а затем уже переходит в валентную зону. Скорость R (число актов R в единицу времени) определяет концентрацию неравновесных носителей тока, создаваемых внешним воздействием (светом, быстрыми заряженными частицами и т. п.), а также время восстановления равновесной концентрации после выключения этого воздействия. Излучательная R проявляется в люминесценции кристаллов и лежит в основе действия лазеров и светоэлектрических диодов.



Собственная проводимость. Собственная проводимость возникает в результате перехода электронов с верхних уровней валентной зоны в зону проводимости. При этом в зоне проводимости появляется некоторое число носителей тока — электронов, занимающих уровни вблизи дна зоны; одновременно в валентной зоне освобождается такое же число мест на верхних уровнях. Такие свободные от электронов места на уровнях заполненной при абсолютном нуле валентной зоны называют дырками.

Распределение электронов по уровням валентной зоны и зоны проводимости определяется функцией Ферми. Вычисления показывают, что уровень Ферми лежит точно посередине запрещенной зоны ([рис. 1](#)). Следовательно, для электронов, перешедших в зону проводимости, величина $W - W_F$ мало отличается от половины ширины запрещенной зоны. Уровни зоны проводимости лежат на хвосте кривой распределения.

Если на графике откладывать зависимость $\ln \sigma$ от $1/T$, то для полупроводников получается прямая линия, изображенная на [рис. 2](#). По наклону этой прямой можно определить ширину запрещенной зоны ΔW .

Типичными полупроводниками являются элементы IV группы периодической системы Менделеева — германий и кремний. Они образуют решетку, в которой каждый атом связан ковалентными (парно-электронными) связями с четырьмя равноотстоящими от него соседними атомами. Условно такое взаимное расположение атомов можно представить в виде плоской структуры, изображенной на [рис. 3](#). Кружки со знаком «+» обозначают положительно заряженные атомные остатки (т. е. ту часть атома, которая остается после удаления валентных электронов), кружки со знаком «—» — валентные электроны, двойные линии — ковалентные связи.

При достаточно высокой температуре тепловое движение может разорвать отдельные пары, освободив один электрон (такой случай показан на [рис. 3](#)).

. Покинутое электроном место перестает быть нейтральным, в его окрестности возникает избыточный положительный заряд $+e$ — образуется дырка. На это место может перескочить электрон одной из соседних пар. В результате дырка начинает также странствовать по кристаллу, как и освободившийся электрон.

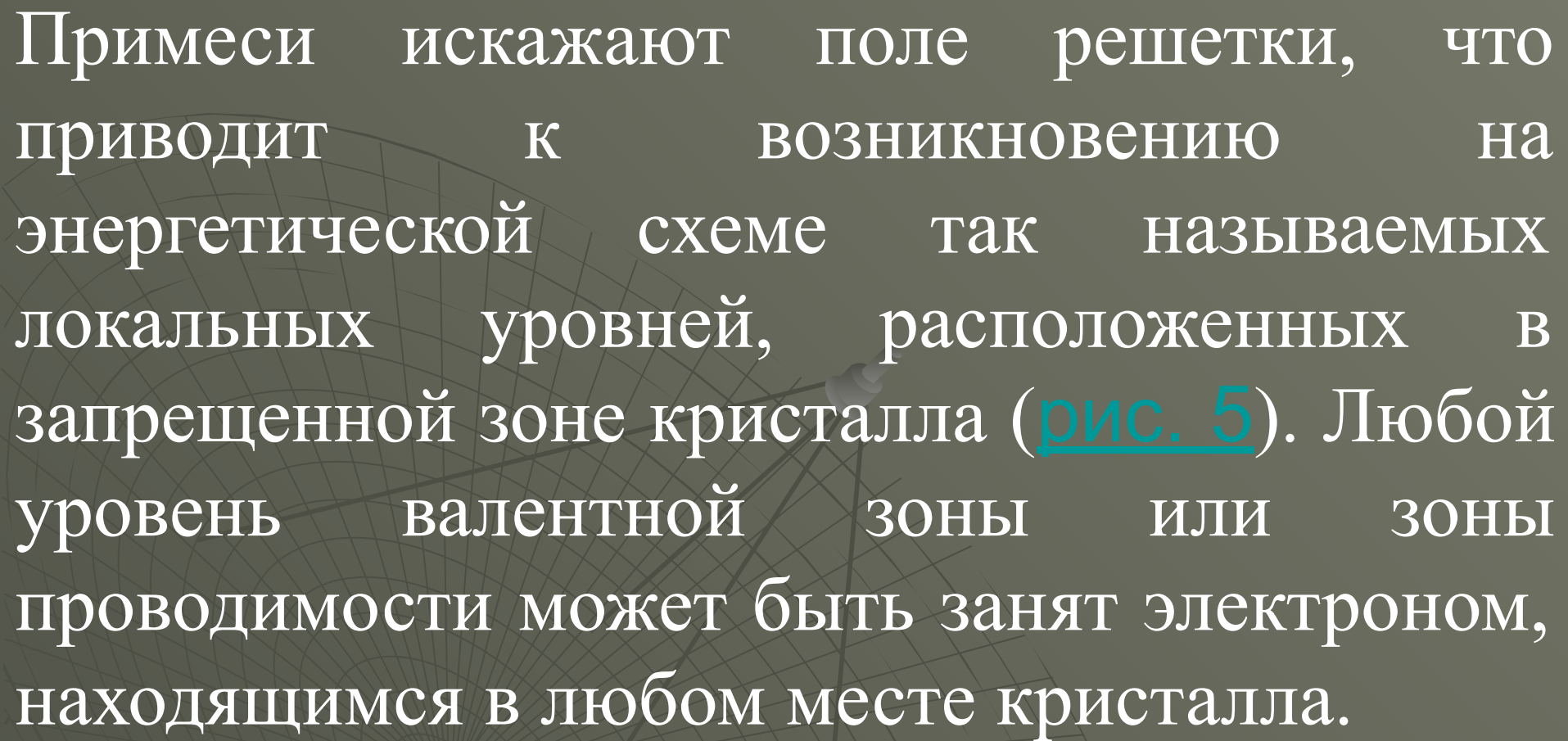


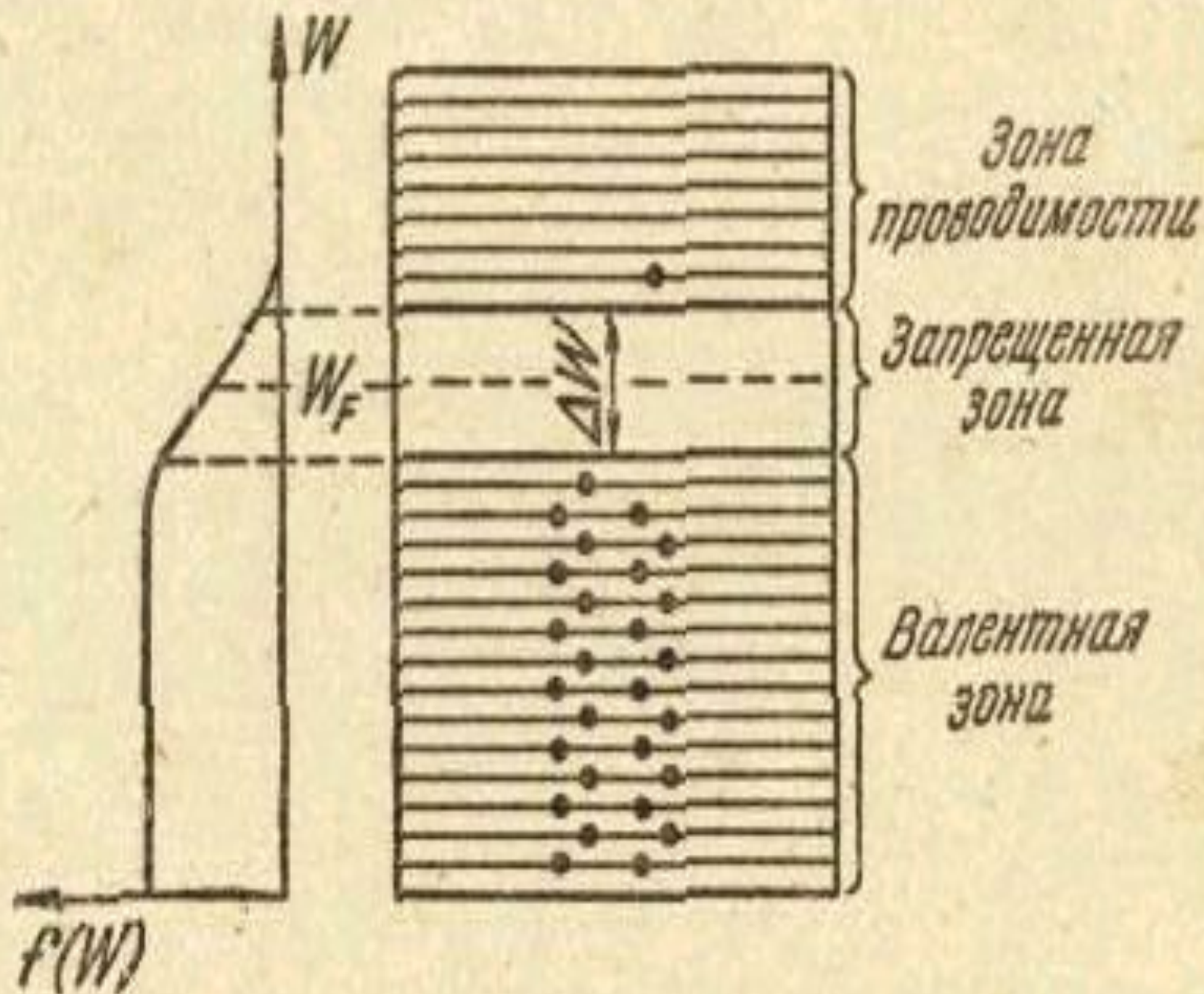
На [рис. 4](#) условно изображена решетка германия с примесью 5-валентных атомов фосфора. Для образования ковалентных связей с соседями атому фосфора достаточно четырех электронов. Следовательно, пятый валентный электрон оказывается как бы лишним и легко отщепляется от атома за счет энергии теплового движения, образуя странствующий свободный электрон. В отличие от рассмотренного раньше случая образование свободного электрона не сопровождается нарушением ковалентных связей, т. е. образованием дырки. Хотя в окрестности атома примеси возникает избыточный положительный заряд, но он связан с этим атомом и перемещаться по решетке не может. Благодаря этому заряду атом примеси может захватить приблизившийся к нему электрон, но связь захваченного электрона с атомом будет непрочной и легко нарушается вновь за счет тепловых колебаний решетки.

Таким образом, в полупроводнике с 5-валентной примесью имеется только один вид носителей тока — электроны. Соответственно говорят, что такой полупроводник обладает электронной проводимостью или является полупроводником n-типа (от слова *negativ* — отрицательный). Атомы примеси, поставляющие электроны проводимости, называются **д о н о р а м и**.

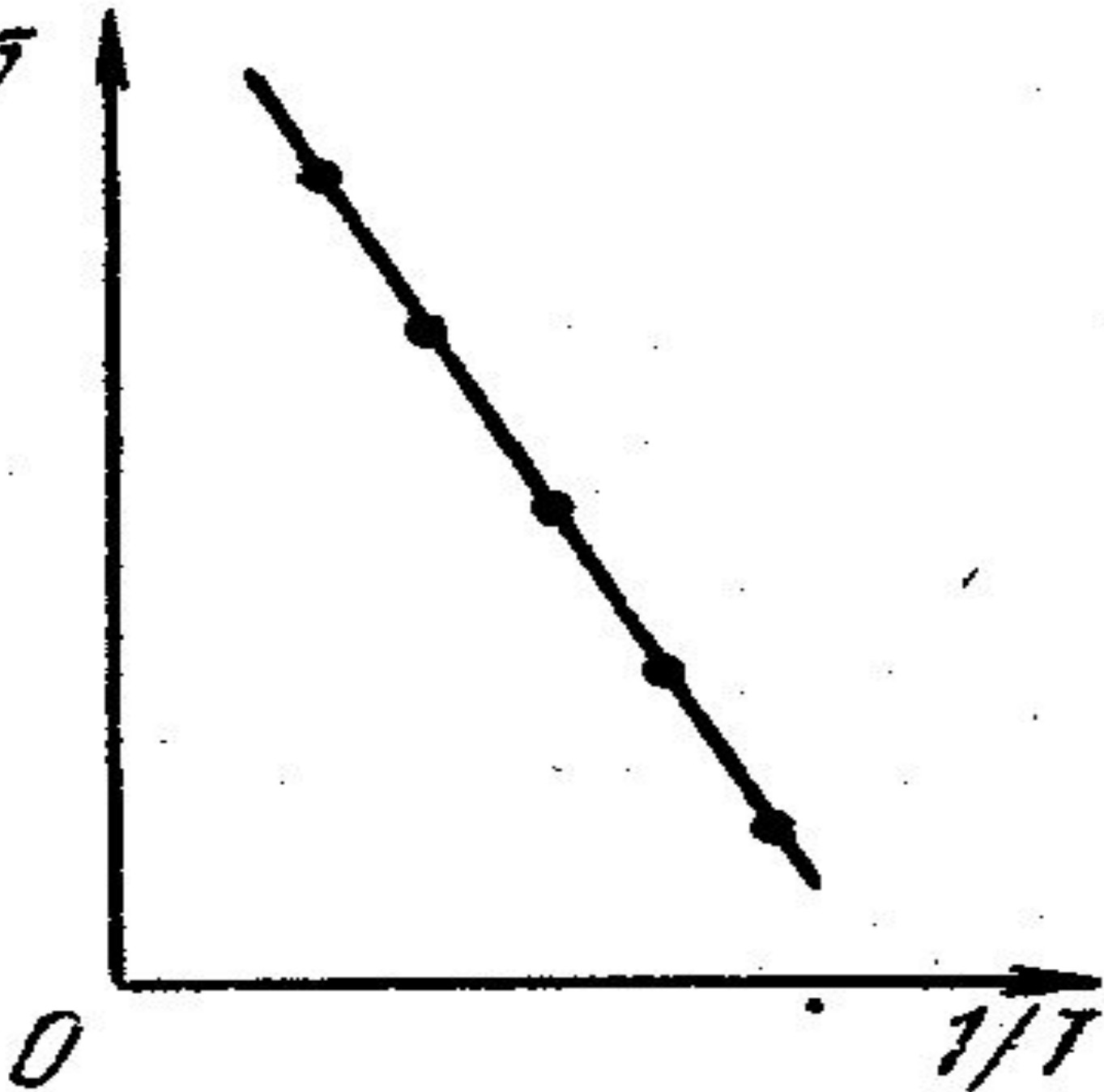


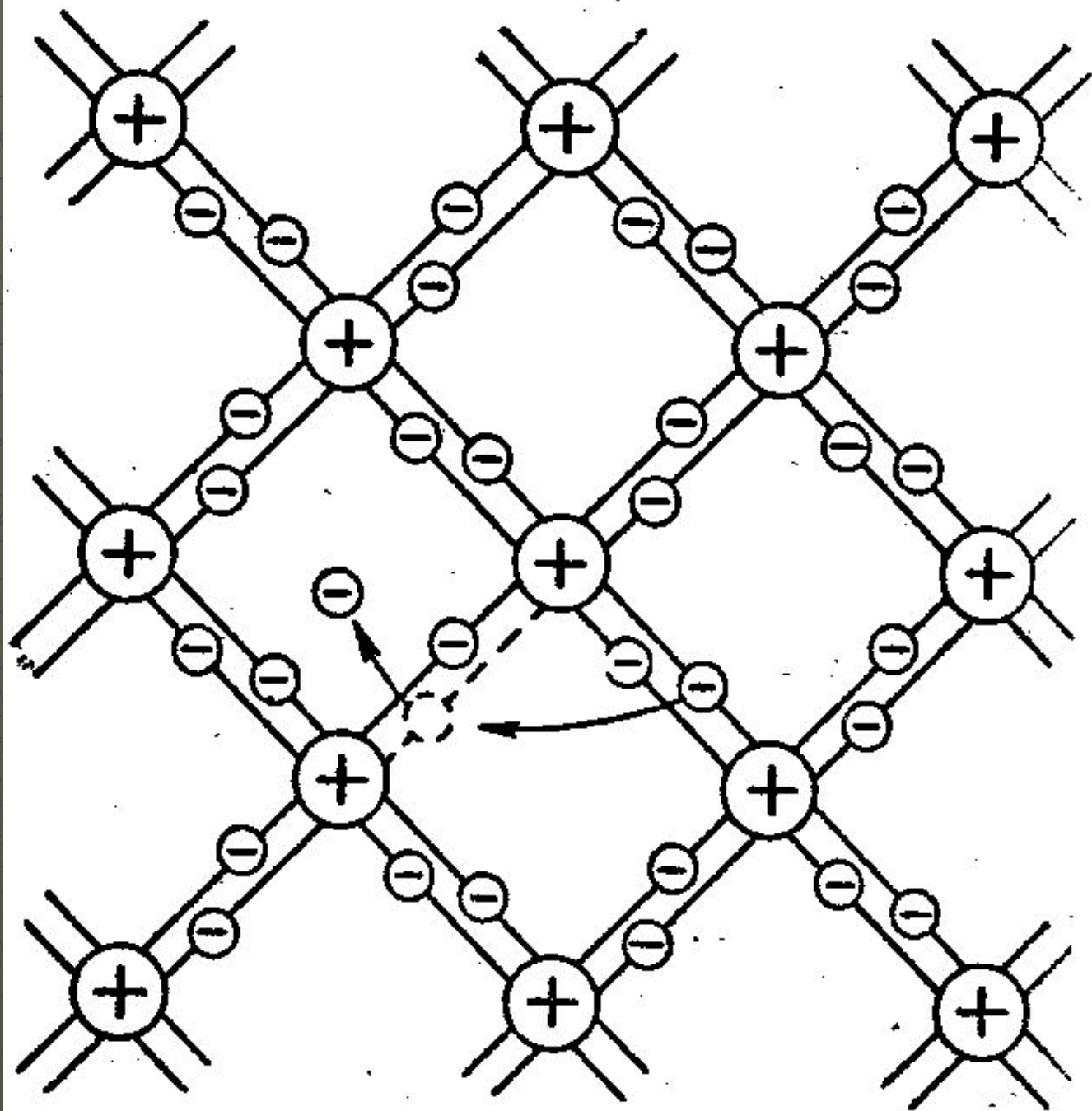
Примеси искажают поле решетки, что приводит к возникновению на энергетической схеме так называемых локальных уровней, расположенных в запрещенной зоне кристалла ([рис. 5](#)). Любой уровень валентной зоны или зоны проводимости может быть занят электроном, находящимся в любом месте кристалла.

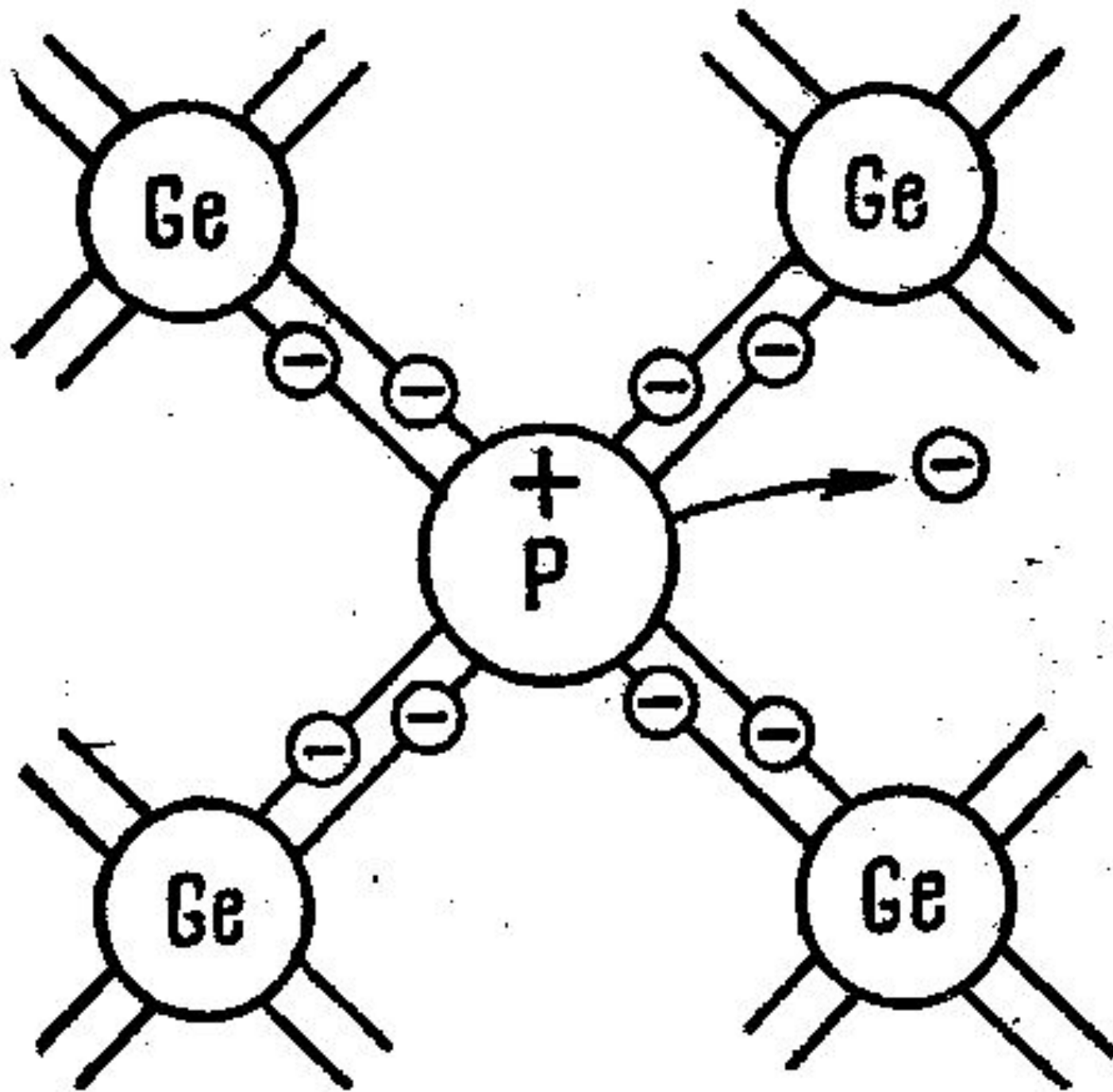
The background of the slide features a faint, semi-transparent energy band diagram. It shows a central point from which concentric circles and radial lines emanate, representing the Brillouin zone. Several energy bands are depicted as curved lines. In the lower right quadrant, there are three small colored dots: two green dots and one blue dot, representing localized energy levels within the band structure.

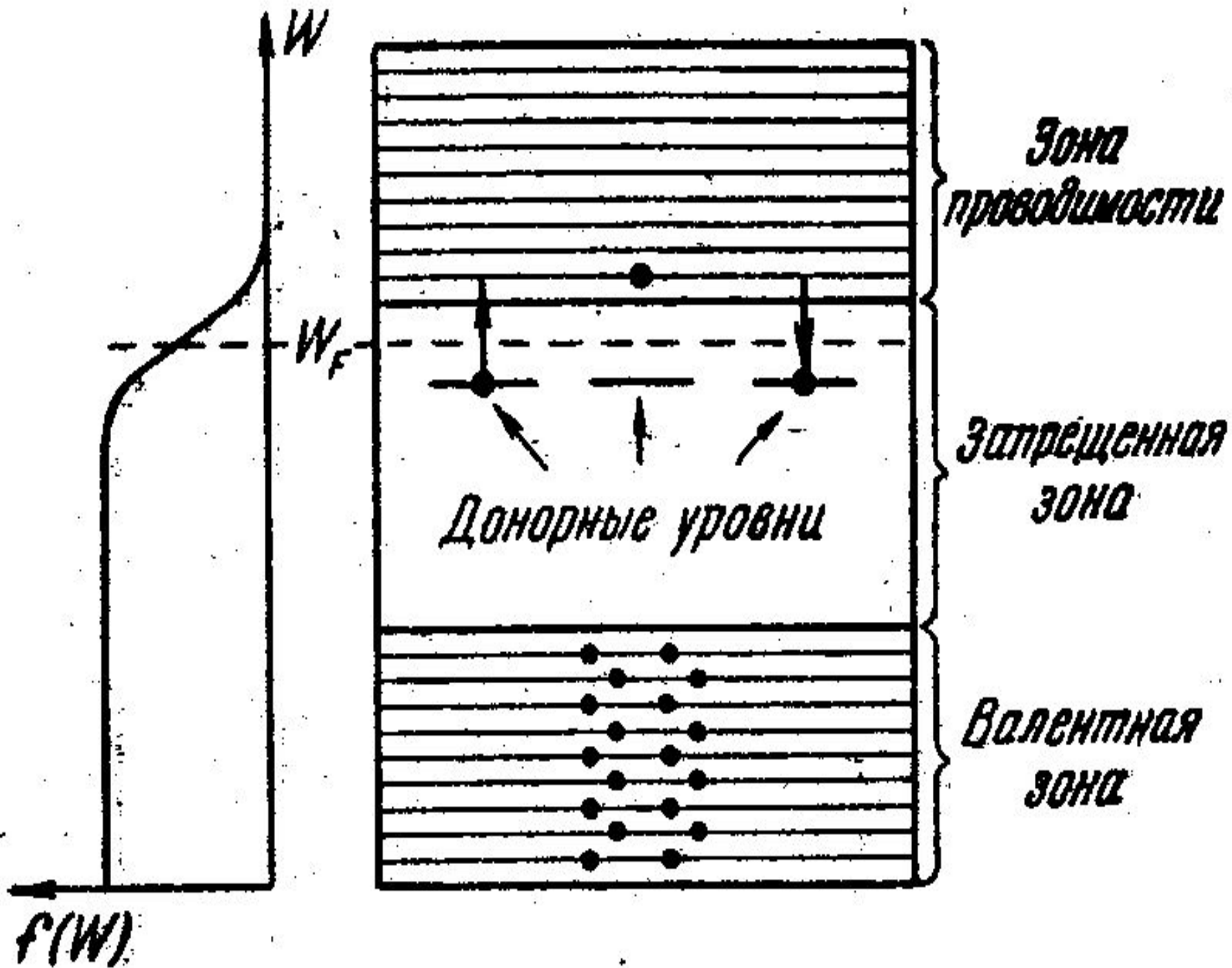


$\ln \sigma$









При больших концентрациях примесей или дефектов проявляется их взаимодействие, ведущее к качественным изменениям свойств П. Это можно наблюдать в сильно легированных П., содержащих примеси в столь больших концентрациях N_{np} , что среднее расстояние между ними, пропорциональное $N^{-1/3}$, становится меньше (или порядка) среднего расстояния a , на котором находится от примеси захваченный ею электрон или дырка. В таких условиях носитель вообще не может локализоваться на каком-либо центре, т.к. он всё время находится на сравнимом расстоянии сразу от нескольких одинаковых примесей. Более того, воздействие примесей на движение электронов вообще мало, т.к. большое число носителей со знаком заряда, противоположным заряду примесных ионов, экранируют (т.е. существенно ослабляют) электрическое поле этих ионов. В результате все носители, вводимые с этими примесями, оказываются свободными даже при самых низких температурах.

Условие сильного легирования: $\lambda \sim a$, легко достигается для примесей, создающих уровни с малой энергией связи (мелкие уровни). Например, в Ge и Si, легированных примесями элементов III или V групп, это условие выполняется уже при $N_{np} \sim 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$ в то время как удаётся вводить эти примеси в концентрациях вплоть до $N_{np} \sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ при плотности атомов основного вещества $\sim 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$. В П. AIVBV практически всегда с большой концентрацией ($\sim 10^{17}-10^{18} \text{ см}^{-3}$) присутствуют вакансии одного из компонентов, а энергии связи носителей с этими вакансиями малы, так что условие $\lambda > a$ практически всегда выполнено.

Фотопроводимость полупроводников - увеличение электропроводности Π . под действием света; как правило, обусловлена появлением дополнительных неравновесных носителей в результате поглощения электронами квантов света с энергией, превышающей энергию их связи. Различают собственную и примесную фотопроводимости. В первом случае фотон поглощается валентным электроном, что приводит к рождению пары электрон - дырка. Очевидно, такой процесс может происходить под действием света с длиной волны, соответствующей области собственного поглощения Π : $w^3 DE$. Пары электрон - дырка могут создаваться и фотонами с энергией, несколько меньшей DE , т.к. возможны процессы, в которых электрон, поглощая фотон, получает дополнительную энергию за счёт теплового движения (кристаллической решётки или от равновесного носителя тока), например энергия w достаточна для создания экситона, который затем под действием теплового движения распадается на свободные электрон и дырку. Под действием существенно более длинноволнового света фотопроводимость возникает только при наличии примесей, создающих локальные уровни в запрещенной зоне, и связана с переходом электрона либо с локального уровня в зону проводимости, либо из валентной зоны на локальный уровень примеси (рождение дырки).

Явление фотопроводимости позволяет за короткое время (\sim мксек или \sim нсек) изменять электропроводность Π . в очень широких пределах, а также даёт возможность создавать высокие концентрации носителей тока в Π ., в которых из-за относительно большой DE и отсутствия подходящих примесей не удаётся получить заметных равновесных концентраций носителей. Использование фотопроводимости Π . с разными DE и глубиной примесных уровней (Si, Te, InSb, PbS, CdS, РЬТе, Ge, легированный Zn или Au и т.д.) позволяет создавать высокочувствительные приёмники света для различных областей спектра от далёкой инфракрасной до видимой



Прохождение быстрых частиц через полупроводники. Значит. доля энергии частицы ($\sim 30\%$) при этом тратится в конечном счёте на создание электронно-дырочных пар, число которых, т. о., порядка отношения DE к энергии частицы. Для частиц с энергиями от 10 кэв до 10 Мэв это отношение $\sim 10^4 - 10^7$. Явление может использоваться для счёта и измерения энергии быстрых частиц

С понятием подвижности связано понятие коэффициента диффузии D носителей, хаотичность движения которых в отсутствие поля создаёт тенденцию к равномерному распределению их в объёме П., т. е. к выравниванию их концентрации. Если в образце П. есть области повышенной и пониженной концентраций, то в нём возникает "перетекание" носителей, т.к. число частиц, уходящих из любой области в результате хаотического движения, пропорционально числу частиц, находящихся в ней, а число приходящих - пропорционально числу частиц в соседних с ней областях. Диффузионные потоки j_d , выравнивающие концентрации n , пропорциональны интенсивности теплового движения и перепаду концентраций и направлены в сторону её уменьшения:

$$j_d = - D \text{grad} n. \quad (13)$$

Это равенство определяет понятие коэффициента диффузии D , который связан с подвижностью m универсальным (если носители тока не вырождены) соотношением Эйнштейна:

$$D = kTm/e, \quad (14)$$

которое, в частности, отражает связь диффузии с интенсивностью теплового движения.

Для неравновесных носителей важной характеристикой является длина диффузии l_d - путь, который они успевают пройти диффузионным образом за время своей жизни t :

$$l_d = \dots \quad (15)$$

Величина l_d может быть различной, достигая в чистых П. с большой подвижностью $0,1 \text{ см}$

Возможности использования термоэлектрических явлений в П. перспективны для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, а также для охлаждения. Полупроводниковые термоэлементы позволяют получать КПД преобразования $\sim 10\%$ или охлаждение до 230 K . Причиной больших (на несколько порядков больших, чем в металлах) величин термоэдс и коэффициентов Пельтье в П. является относительная малость концентрации носителей. Электрон, переходя со дна зоны проводимости E_c на уровень Ферми E_F металла, находящегося в контакте с данным П., выделяет энергию (теплоту Пельтье) $\Pi = E_c - E_F$ или поглощает её при обратном переходе. С термодинамической точки зрения E_F есть химический потенциал электронов и поэтому он должен быть одинаков по обе стороны контакта. В П. в области примесной проводимости величина $\Pi = E_c - E_F$ определяется условием: $n = Nd - Na$. При не слишком высокой концентрации примесей она оказывается большой ($\Pi = E_c - E_F \gg kT$) и относительно быстро возрастающей с ростом температуры, что обеспечивает большие значения Π и термоэдс a , связанной с Π соотношением: $\Pi = aT$.

В металлах E_F лежит глубоко в разрешенной зоне и из-за очень сильного вырождения в переносе тока принимают участие лишь электроны с энергиями очень близкими к E_F . Среднее изменение энергии электрона при прохождении контакта двух металлов оказывается поэтому очень малым: $\Pi \sim kT$.



Выпрямление токов и усиление напряжений можно осуществить с помощью полупроводниковых устройств, называемых полупроводниковыми (или кристаллическими) диодами и триодами. Полупроводниковые триоды называют также транзисторами.

Полупроводниковые устройства можно подразделить на две группы: устройства с точечными контактами и устройства с плоскостными контактами. Мы ограничимся рассмотрением плоскостных диодов и транзисторов.

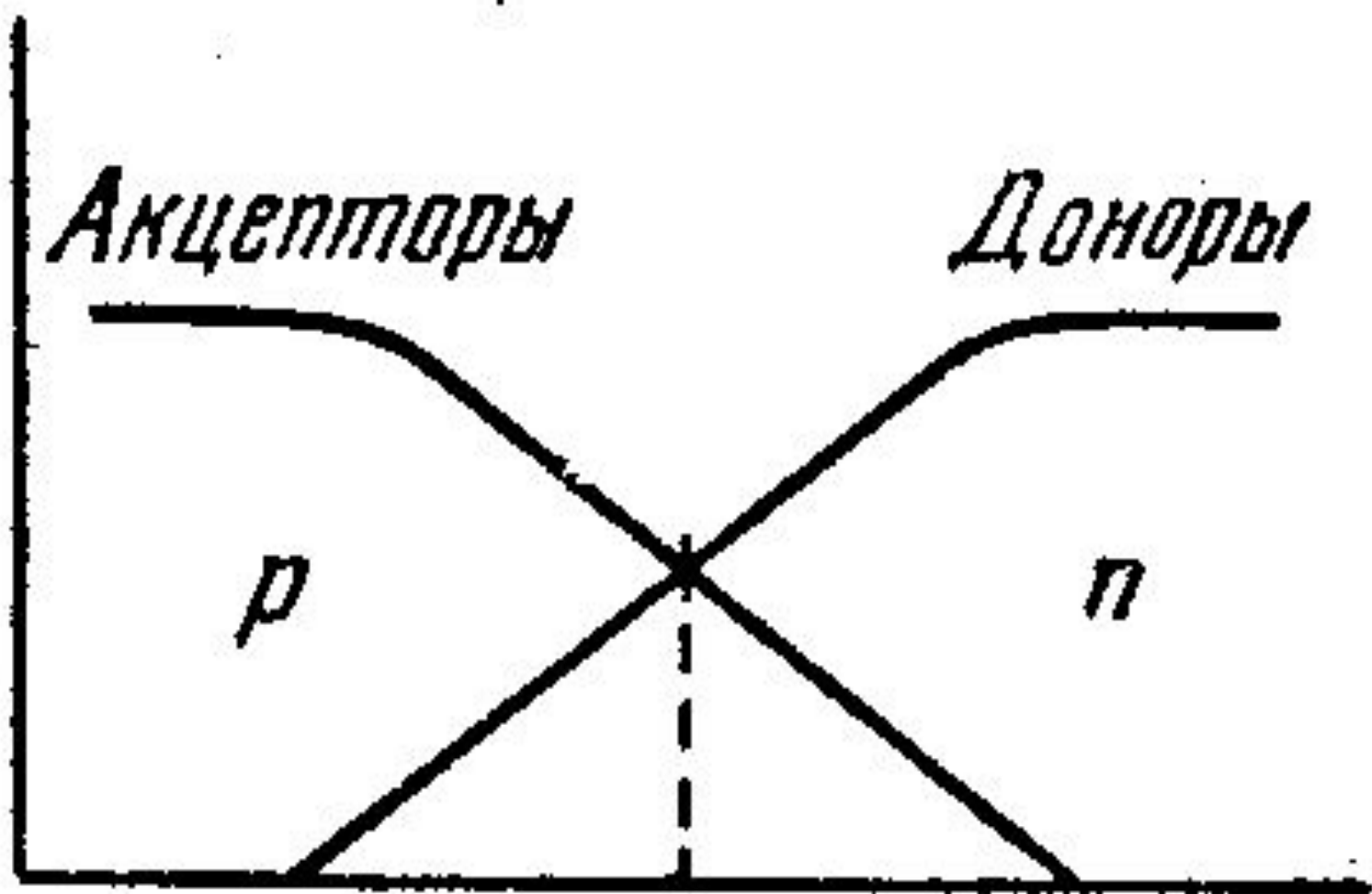
Основным элементом плоскостных устройств является так называемый **p—n-переход**. Он представляет собой тонкий слой на границе между двумя областями одного и того же кристалла, отличающимися типом примесной проводимости. Для изготовления такого перехода берут, например, монокристалл из очень чистого германия с электронным механизмом проводимости (обусловленным ничтожными остатками примесей). В вырезанную из кристалла тонкую пластинку вплавляют с одной стороны кусочек индия. Во время этой операции, которая осуществляется в вакууме или в атмосфере инертного газа, атомы индия диффундируют в германий на некоторую глубину. В той области, в которую проникают атомы индия, проводимость германия становится дырочной. На границе этой области возникает **p—n-переход**.

На [рис. 8](#) показан ход концентрации примесей в направлении, перпендикулярном к граничному слою. В p-области основными носителями тока являются дырки,

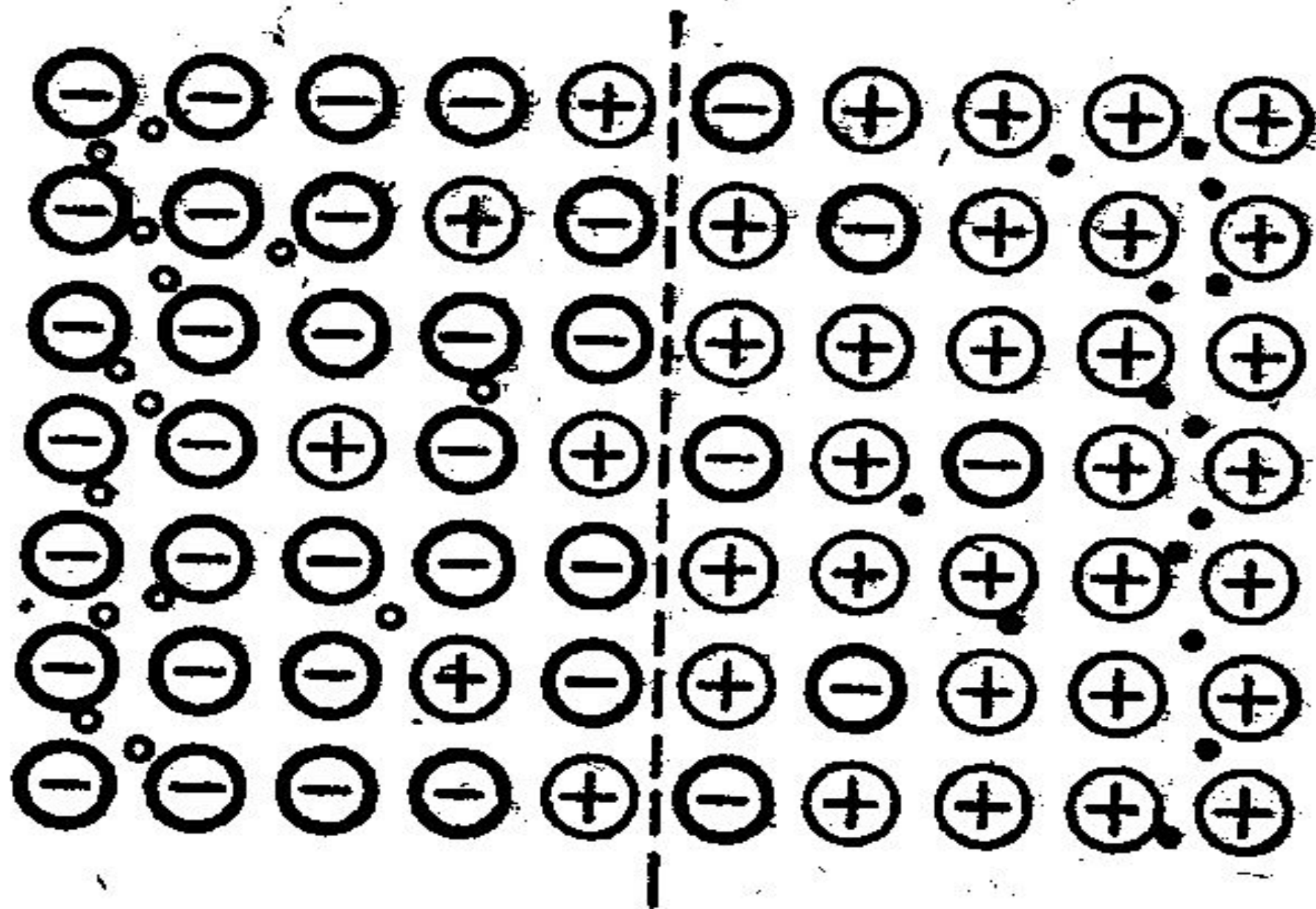
образовавшиеся в результате захвата электронов атомами примеси (акцепторы при этом становятся отрицательными ионами); кроме того, в этой области имеется небольшое число неосновных носителей — электронов, возникающих вследствие перевода тепловым движением электронов из валентной зоны непосредственно в зону проводимости (этот процесс немного увеличивает и число дырок). В n -области основные носители тока — электроны, отданные донорами в зону проводимости (доноры при этом превращаются в положительные ионы); происходящий за счет теплового движения переход электронов из валентной зоны в зону проводимости приводит к образованию небольшого числа дырок — неосновных носителей для этой области. Диффундируя во встречных направлениях через пограничный слой, дырки и электроны рекомбинируют друг другом. Поэтому p — n -переход оказывается сильно обедненным носителями тока и приобретает большое сопротивление. Одновременно на границе между областями возникает двойной электрический слой, образованный отрицательными ионами акцепторной примеси, заряд которых теперь не компенсируется дырками, и положительными ионами донорной примеси, заряд которых теперь не компенсируется электронами ([рис 9](#); кружки—ионы, черные точки — электроны, белые точки—дырки).



Концентрация
примесей



p-n-переход



D-D-переход