

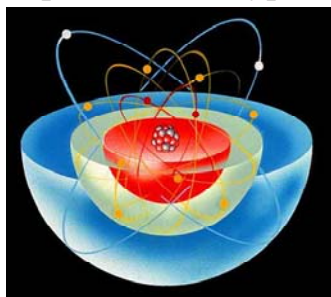
Лекция 2

Общие положения теории электропроводности. Электропроводность полупроводников.

2.1. Электроны в атоме. Основы зонной теории твёрдого тела.

В соответствии с электронной теорией все окружающие нас вещества состоят из атомов.

В 1913 году датский физик Нильс Бор предложил модель атома, согласно которой атом вещества состоит из положительно заряженного ядра и электронов, которые находятся в движении на некотором расстоянии от ядра в пределах слоев (оболочек), определяемых их энергиями. Чем дальше от ядра вращается электрон, тем большей энергией он обладает (тем выше его энергетический уровень). Траектория движения атома называется орбитой.



Ядро, в котором сосредоточена практически вся масса атома, образуется протонами и нейтронами. В нормальном состоянии атом содержит одинаковое количество протонов и электронов и поэтому электрически нейтрален.

Общее число электронов всегда равно порядковому номеру элемента в периодической таблице Менделеева и определяет химические свойства элемента.

Если рассматривать структуру атомов различных элементов, то можно выделить оболочки, полностью заполненные электронами (внутренние) и незаполненные (внешние). Электроны внешней оболочки атома называются валентными, а их количество определяет валентность элемента. Валентные электроны наиболее слабо связаны с ядром и легче вступают во взаимодействие с другими атомами.

Электроны, освободившиеся от внутриатомных связей, называются свободными электронами. Они перемещаются внутри вещества между атомами в различных направлениях и с различными скоростями. При наличии внешнего электрического поля беспорядочное движение свободных электронов становится упорядоченным направленным. В результате возникает электрический ток. Чем больше свободных электронов веществе, тем выше его электропроводность. Этим объясняется хорошая проводимость металлов, а также деление твёрдых тел по способности проводить электрический ток на проводники, полупроводники и диэлектрики.

Теряя или приобретая электроны, нейтральный в электрическом отношении атом становится положительно или отрицательно заряженным ионом. Процесс отрыва электрона от атома или присоединения к атому

называется ионизацией атома. Ионы, имеющие разноимённые заряды, могут притягиваться друг к другу, образуя молекулы.

В 1900 г. Макс Планк выдвинул гипотезу о том, что энергия электронов в атоме может принимать лишь вполне определённые дискретные значения. Изменение энергии электронов может происходить только скачкообразно. Переход из состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией может происходить при условии поглощения извне порции энергии, равной разности значений энергии в этих состояниях. При обратном переходе эта порция должна быть отдана. Такая порция называется квантом энергии.

Каждой орбите соответствует строго определённая энергия электрона или разрешённый энергетический уровень. Уровни энергии, которые не могут иметь электроны при переходе с одной орбиты на другую, называются запрещёнными зонами.

На рис. 2.1б показаны графически энергетические зоны твёрдого тела. По вертикальной оси отложены уровни энергии, которой обладают электроны, горизонтальная ось безразмерная.

Нижняя разрешенная зона (рис.2.1.б) называется валентной зоной. Энергетические уровни этой зоны обычно заполнены электронами внешней оболочки атомов – внешних устойчивых орбит (валентными электронами).

Верхняя разрешенная зона называется зоной проводимости. Электроны, находящиеся в этой зоне, обладают довольно большой энергией и могут ее изменять под действием электрического поля, перемещаясь в объеме полупроводника.

Запрещенная зона разделяет разрешенные зоны. Ширина запрещенной зоны ϵ_3 определяет электропроводность материала. У полупроводников ширина запрещенной зоны не превышает 3 эВ.

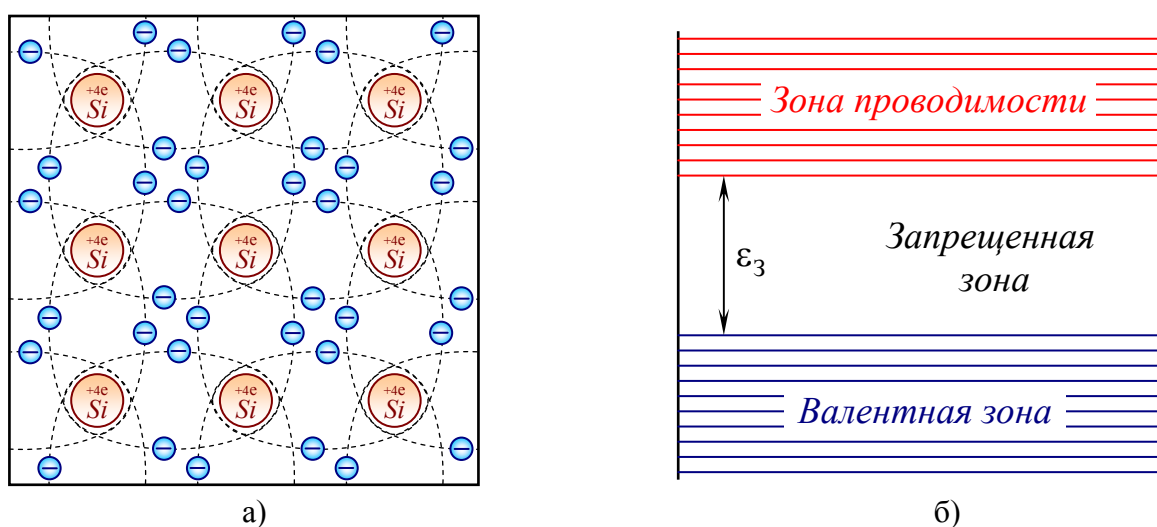


Рисунок 2.1 – Структура связей атомов кремния в кристаллической решетке и зонная диаграмма собственного полупроводника

У диэлектриков она больше, чем у полупроводников ($\epsilon_3 > 3 \text{ эВ}$), а у металлов запрещенной зоны нет ($\epsilon_3 = 0$), и валентная зона сливается с зоной проводимости.

С точки зрения зонной теории свободные электроны – это электроны, получившие достаточное количество энергии и перешедшие из валентной зоны в зону проводимости.

Количество электронов, находящихся на каждой орбите, и количество орбит для каждого вещества совершенно определены. Электроны всегда стремятся занять уровни наименьшей энергии. Поэтому внутренние орбиты всегда полностью заполнены. Частично заполненной может быть только внешняя орбита. Чем более удаленную орбиту занимает электрон, тем большую энергию он имеет. При переходе на орбиту более близкую ядру, электрон отдаёт часть своей энергии в окружающую среду в виде излучения, вследствие чего его энергия уменьшается. Если электрон получает энергию извне, то он переходит на следующий энергетический уровень.

2.2. Собственная электропроводность полупроводника.

К полупроводникам относится большое количество веществ и элементов, которые по своим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Формальным признаком принадлежности вещества к классу полупроводников является величина удельной электропроводности, которая при комнатной температуре лежит в пределах $\sigma = 10^{-10} \dots 10^4 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$.

Отличительной особенностью полупроводников является сильная зависимость удельной электропроводности от внешних факторов: температуры, концентрации примесей, действия света и ионизирующих излучений и т.д.

Наибольшее применение в полупроводниковой технике получили кремний (Si), германий (Ge), селен (Se), а также полупроводниковые соединения: арсенид галлия (GaAs), карбид кремния (SiC), сульфид кадмия.

Германий и кремний относятся к элементам четвертой группы периодической системы Д.И. Менделеева. Атомы этих элементов имеют по четыре валентных электрона. Арсенид галлия GaAs состоит из соединения элементов третьей группы (Ga) и пятой группы (As). Так как атомы третьей группы имеют три валентных электрона, а атомы пятой группы – пять, то среднее число валентных электронов у этого соединения тоже четыре.

В дальнейшем для определенности мы будем рассматривать структуру кремния, поскольку примерно 97% всех изделий полупроводниковой электроники на сегодняшний день выполняются на основе кремния.

Кристаллическая решетка кремния (германия) называется тетраэдрической или решеткой типа алмаза. Она характерна для всех четырехвалентных элементов.

Связь атомов в кристалле кремния устанавливается вследствие наличия специфических обменных сил, возникающих при парном объединении валентных электронов. В кристаллической решетке кремния (рис.2.1а) каждый атом связан с четырьмя соседними атомами общей орбитой, на которой находятся два электрона. Такая связь называется ковалентной, а валентные электроны, которые ее образуют, по своей энергии расположены в валентной зоне.

У абсолютно чистого однородного полупроводника электроны будут присутствовать во всех связях только при температуре абсолютного нуля. В этих условиях полупроводник является идеальным диэлектриком. По мере нагревания полупроводника происходит нарушение связей, т.е. некоторые валентные электроны получают энергию, достаточную для перехода из валентной зоны в зону проводимости. Эти электроны становятся свободными (электронами проводимости), а полупроводник – электропроводным.

Уход электрона из валентной зоны приводит к образованию в ней незаполненного энергетического уровня. Вакантное энергетическое состояние носит название *дырки*. Валентные электроны соседних атомов могут переходить на эти свободные энергетические уровни, создавая дырки в другом месте. Такое перемещение электронов можно рассматривать как движение фиктивных положительных зарядов-дырок.

Электропроводность, обусловленную движением свободных электронов, называют *электронной*, а электропроводность, обусловленную движением дырок – *дырочной*.

У абсолютно чистого и однородного полупроводника при $t \neq 0\text{K}$ свободные электроны и дырки образуются попарно, т.е. число электронов равняется числу дырок. Электропроводность такого полупроводника называется *собственной*.

Процесс образования пар электрон-дырка называют *генерацией пары*. В процессе своего движения в объеме полупроводника электрон проводимости может быть захвачен дыркой, заполняя собой ее энергетический уровень. В этом случае разорванные валентные связи восстанавливаются, а носители заряда – электрон и дырка исчезают. Процесс исчезновения пар электрон-дырка называют *рекомбинацией*.

В табл.2.1 приведены основные свойства полупроводников, которые нашли наиболее широкое применение в электронной технике.

Малая ширина запрещенной зоны германия приводит к большому току утечки при повышении температуры. Главным недостатком арсенида галлия является малое время жизни неосновных носителей заряда.

Этими свойствами обусловлено ограниченное применение данных элементов в полупроводниковой технике. Кремний имеет умеренно широкую запрещенную зону, высокую температуру плавления и достаточно большое время жизни неосновных носителей заряда.

Таблица 2.1

Материал полупроводника	Ge	Si	GaAs
Ширина запрещенной зоны, эВ	0,66	1,11	1,42
Концентрация собственных носителей заряда при комнатной температуре, см ⁻³	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^6$
Подвижность дрейфа, см ² /В·с			
электронов	3900	1400	1500
дырок	1900	450	400
Время жизни неосновных носителей, с	10^{-3}	$2,5 \cdot 10^{-3}$	10^{-8}
Температура плавления, °С	937	1415	1238

2.3. Примесная электропроводность полупроводника

На электропроводность полупроводников большое влияние оказывают примеси. Даже весьма незначительное их содержание может вызвать существенное повышение электропроводности. Так, например, наличие всего 0,001% примесей в германии приводит к увеличению его электропроводности в 10^4 раз.

Рассмотрим подробнее влияние примеси на электрофизические свойства полупроводников.

Если в кремний ввести атом пятивалентного элемента (например, фосфора (P), мышьяка, сурьмы, бора), то четыре из пяти валентных электронов этого элемента образуют ковалентные связи с четырьмя соседними атомами кремния (подобно атомам собственного полупроводника), а пятый электрон окажется избыточным (рис.2.2а). Он оказывается очень слабо связанным со своим атомом и поэтому, даже при воздействии малой тепловой энергии, он может оторваться от атома и превратиться в свободный носитель заряда.

На энергетической диаграмме, соответствующей данному случаю, появляется еще один разрешенный энергетический уровень, который принес с собой атом фосфора (рис.2.2б). На этом уровне, при очень низкой температуре, будет находиться избыточный электрон фосфора. При незначительном повышении температуры он перейдет в зону проводимости и станет свободным. Нейтральный атом фосфора при этом превращается в положительный ион. Этот ион прочно связан с кристаллической решеткой и не может перемещаться подобно дырке.

Количество энергии, необходимое для отделения избыточного электрона и образования иона, называют *энергией активации (ионизации) примеси* ($\Delta\varepsilon_D \approx 0,1 \text{ эВ}$).

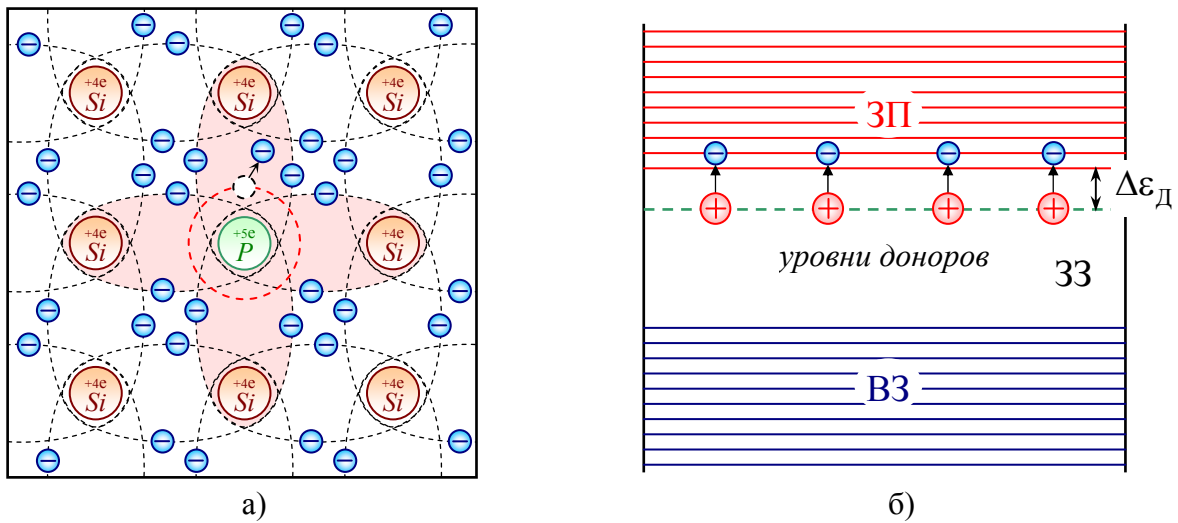


Рисунок 2.2 – Структура и зонная диаграмма полупроводника n-типа

Таким образом, появление в кристалле кремния атома фосфора привело к образованию в зоне проводимости свободного электрона. Образование данного электрона не связано с образованием дырки.

В реальных случаях в полупроводник вводится $10^{14} \dots 10^{18}$ атомов примеси в см^3 . Поэтому и примесных уровней получается довольно много. Они образуют примесную зону, которая в рассматриваемом случае будет находиться в запрещенной зоне кремния, вблизи зоны проводимости.

Атомы пятивалентной примеси принято называть *донорами*, а разрешенные уровни, которые они образуют – донорными.

Примесные полупроводники, полученные за счет введения доноров, называют электронными или *полупроводниками n-типа*. Электропроводность таких полупроводников определяется свободными электронами, которые здесь являются основными носителями заряда. Дырки в полупроводнике n-типа являются неосновными носителями заряда. Их концентрация значительно меньше концентрации электронов ($n_n \gg p_n$).

Дырочный полупроводник, или *полупроводник p-типа*, получается за счет введения в него трехвалентных атомов примеси (например, индия (In), галлия, алюминия).

Атомы трехвалентной примеси принято называть *акцепторами*.

Находясь среди атомов кремния, атом индия образует только три ковалентные связи с соседними атомами кремния. Четвертая связь оказывается незаполненной, однако она не несет заряда, т.е. атом индия является электрически нейтральным. При воздействии даже небольшой

тепловой энергии электрон одной из соседних заполненных ковалентных связей кремния может перейти на эту незаполненную связь. Во внешней оболочке атома индия появится лишний электрон, т.е. атом индия превращается в отрицательный ион. Ионизированная связь атома кремния, откуда электрон перешел к атому индия, несет положительный заряд, являясь дыркой (рис.2.3а).

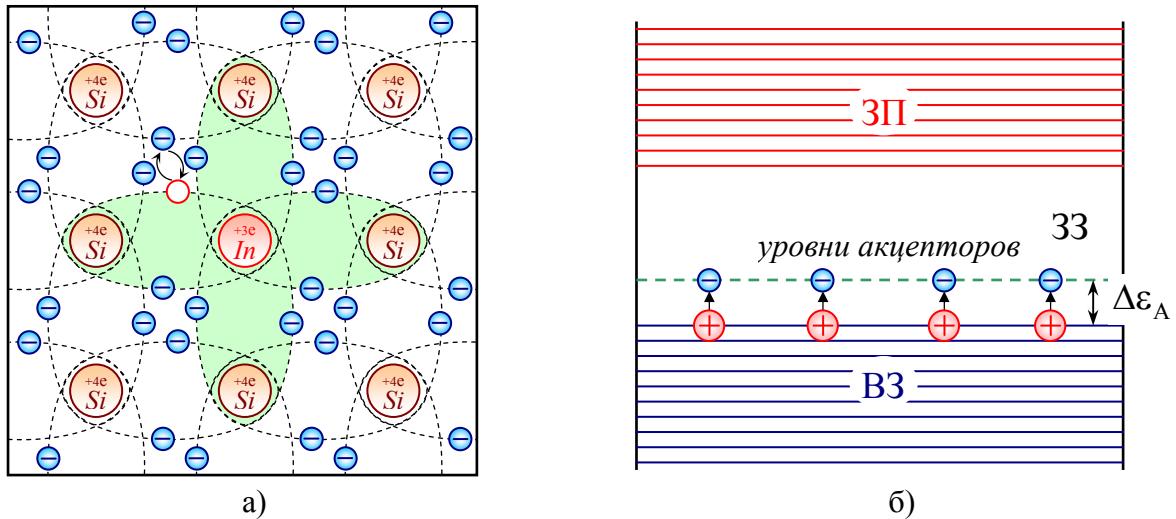


Рисунок 2.3 – Структура и зонная диаграмма полупроводника р-типа

На энергетической диаграмме, соответствующей данному случаю, появился разрешенный энергетический акцепторный уровень ε_A , который принес с собой атом индия (рис.2.3б). Этот уровень будет незаполненным только при очень низкой температуре. При небольшом повышении температуры один из электронов валентной зоны переходит на акцепторный уровень, затратив энергию равную энергии активации примеси ($\Delta\varepsilon_A \approx 0,1$ эВ).

Электропроводность дырочного полупроводника определяется дырками, которые здесь являются основными носителями заряда. Электроны в полупроводнике *p*-типа являются неосновными носителями заряда. Их концентрация значительно меньше концентрации дырок ($p_p \gg n_p$).

При рассмотрении примесных полупроводников обычно используют понятие "*концентрация примеси*" – число частиц примеси в единице объема. Чем выше концентрация доноров (N_D), тем выше концентрация электронов, а чем выше концентрация акцепторов (N_A), тем выше концентрация дырок в полупроводнике.

Если оба типа примеси находятся в равном количестве ($N_A = N_D$), то такой полупроводник называют *компенсированным*. В компенсированном полупроводнике концентрация носителей заряда остается такой же, как и в собственном, однако их подвижность оказывается пониженной.

Практически при изготовлении примесных полупроводников величины N_A и N_D всегда во много раз превышают концентрацию собственных носителей заряда n_i .

Например, для германия у которого при комнатной температуре $n_i = p_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, величины N_A и N_D могут быть порядка 10^{16} см^{-3} , т.е. в 1000 раз больше концентрации собственных носителей.

В примесном полупроводнике при низких температурах преобладает примесная электропроводность. Однако по мере повышения температуры собственная электропроводность непрерывно растет, в то время как примесная имеет предел, соответствующий ионизации всех атомов примеси. Поэтому, при достаточно высоких температурах, электропроводность полупроводника всегда собственная.

Среднюю термодинамическую энергию электронов в кристалле полупроводника характеризует энергетический уровень Ферми (электрохимический потенциал). *Это такой энергетический уровень, вероятность заполнения которого при температуре отличной от температуры абсолютного нуля равна 50%.*

Величина уровня Ферми зависит от концентрации носителей заряда. Для собственных полупроводников уровень Ферми расположен посередине запрещенной зоны.

В электронном полупроводнике (*n*-типа) в сравнении с собственным имеется большее число электронов в зоне проводимости, т.е. средняя энергия электронов здесь будет выше и уровень Ферми находится выше середины запрещенной зоны. Причем, чем больше концентрация доноров, тем выше будет располагаться уровень Ферми.

В дырочном полупроводнике (*p*-типа) уровень Ферми расположен ниже середины запрещенной зоны, причем тем ниже, чем больше концентрация акцепторов.

В технике находят применение т.н. *вырожденные полупроводники*. У таких полупроводников уровень Ферми располагается в разрешенных зонах. Это достигается за счет значительного повышения концентрации примеси до $10^{19} \dots 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Свойства вырожденных полупроводников близки к свойствам металлов.

2.4. Дрейфовый и диффузионный токи

Если в полупроводнике создать электрическое поле напряженностью E , то хаотическое движение носителей заряда упорядочится. Движение носителей заряда в полупроводнике, вызванное наличием электрического поля и градиентом потенциала, называют *дрейфом*, а созданный этими зарядами ток – *дрейфовым током*.

При этом возникнут два встречно направленных потока носителей заряда, создающих электронный и дырочный дрейфовые токи, плотности которых равны

$$J_{n\text{др}} = qn\mu_n E, \quad J_{p\text{др}} = qp\mu_p E, \quad \text{А/см}^2$$

где $q = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;

n, p – концентрация электронов и дырок в полупроводнике;

μ_n, μ_p – подвижность носителей заряда – физическая величина, характеризующая среднюю направленную скоростью носителей заряда в электрическом поле с напряженностью 1 В/см: $\mu = v/E$, где v – средняя скорость носителя заряда.

Так как носители заряда противоположных знаков движутся в противоположных направлениях, то результирующая плотность тока в полупроводнике

$$J_{\text{др}} = J_{n\text{др}} + J_{p\text{др}} = (qn\mu_n + qp\mu_p) \cdot E$$

В то же время плотность тока по закону Ома равна

$$J_{\text{др}} = \sigma E,$$

где σ – удельная проводимость (электропроводность) вещества.

Удельную электропроводность полупроводника σ можно найти как отношение удельной плотности тока к напряженности электрического поля:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{J}{E} = qn\mu_n + qp\mu_p,$$

где ρ – удельное сопротивление полупроводника.

Удельная электропроводность полупроводника зависит от:

- концентрации электронов и дырок;
- от температуры. Чем выше температура, тем удельная электропроводность выше, причём эта зависимость носит экспоненциальный характер.

- подвижности зарядов.

Наряду с переходами электронов с нижних энергетических уровней на более высокие происходят и обратные переходы с высоких энергетических уровней на более низкие. Одновременно с генерацией пары электрон-дырка происходит и обратный процесс – рекомбинация. При некоторой

установившейся температуре полупроводник находится в состоянии термодинамического равновесия – процесс генерации уравнивается процессом рекомбинации.

Диффузией называется движение носителей зарядов из области, где их концентрация повышена в направлении области с более низкой концентрацией. Создаваемый этими носителями ток называют током диффузии. Неравномерность концентрации зарядов в полупроводнике может возникнуть под действием света, нагревания, электрического поля и т.д.

Плотность суммарного диффузионного тока

$$J_{\text{диф}} = J_{n \text{ диф}} + J_{p \text{ диф}} .$$

Промежуток времени с момента генерации носителя заряда до его рекомбинации называют *временем жизни*, а расстояние, пройденное носителем заряда за время жизни – *диффузионной длиной*. Среднее время жизни носителей заряда определяется как промежуток времени, в течение которого концентрация носителей заряда, введенных тем или иным способом в полупроводник, уменьшается в e раз ($e \approx 2,7$).

Диффузионная длина (L) и среднее время жизни (τ) связаны между собой уравнением

$$L = \sqrt{D \cdot \tau} ,$$

где D - коэффициент диффузии, который имеет различные значения для электронов и дырок.

Т.о. движение носителей зарядов в полупроводнике обусловлено двумя процессами: диффузией и дрейфом. Плотность тока, протекающего в полупроводнике

$$J = J_{\text{диф}} + J_{\text{др}} = J_{n \text{ диф}} + J_{p \text{ диф}} + J_{n \text{ др}} + J_{p \text{ др}} .$$