

КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Тема: КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

- 1. Контактная разность потенциалов**
- 2. Эффект Зеебека – возникновение термоЭДС**
- 3. Эффект Пельтье**

1. Контактная разность потенциалов

Возникновение разности потенциалов между приведенными в контакт различными металлами было экспериментально открыто итальянским физиологом и анатомом Гальвани и получило верное объяснение в работах итальянского физика Вольты.

Гальвани проводил опыты с препарированными лягушками и наблюдал сокращение лапки лягушки, подвешенной на железный крюк при соприкосновении с серебряной пластинкой.

Гальвани объяснил этот факт наличием «животного» электричества, протекающего по замкнутой цепи.

Вольта первым понял, что в этих основополагающих опытах Гальвани лапка лягушки выполняла роль чувствительного электрометра, а разность потенциалов обусловлена чисто физическими причинами и возникает между двумя различными металлами, приведенными в соприкосновение.

Поместив изолированные друг от друга суконной тряпочкой медные и цинковые пластинки в кислую среду или раствор нашатыря (среда, подобная физиологической среде в живом организме), Вольта впервые создал источник постоянного электрического тока – гальванический элемент.

Тем самым Вольта открыл новую эру в развитии человеческой цивилизации, связанную с использованием электричества.

Вольта установил:

- если металлы привести в контакт, расположив их в порядке, указанном на рис. 1, то потенциал каждого последующего металла будет ниже потенциала предыдущего металла;
- разность потенциалов между крайними металлами в любом составленном ряду металлов не зависит от того, какие металлы являются промежуточными в этом ряду, а определяется только крайними металлами в этом ряду – закон последовательных контактов Вольты.



рис. 1. Ряд Вольты. Потенциал каждого последующего металла в этом ряду ниже потенциала предыдущего

Если замкнуть любую последовательность металлов между собой в кольцо, то в любом из металлов разность потенциалов и ток будут равны нулю.

В такой цепи равна нулю и электродвижущая сила, если температура всех контактов одинакова и между элементами контактов не протекает химическая реакция. Это согласуется с законом сохранения энергии, следствием которого и является закон последовательных контактов Вольты.

Закон последовательных контактов Вольты можно получить, если часть электронов металлов, способных свободно перемещаться, рассматривать как идеальный газ, к которому применимо распределение Больцмана.

Отношение концентраций электронов в условиях термического равновесия с энергиями E_1 и E_2 равно

$$\frac{n(E_1)}{n(E_2)} = \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

Пусть n_A , n_B и n_C – концентрации свободных электронов в металлах A , B и C , E_{AB} , E_{AC} и E_{CB} – разности потенциалов при непосредственном их соприкосновении. Работа перехода электрона из одного металла в другой равна соответственно

$$E_{AB} \cdot e, E_{AC} \cdot e \text{ и } E_{CB} \cdot e.$$

В результате имеем

$$\frac{E_{AB} \cdot e}{kT} = \ln \frac{n_B}{n_A}, \quad \frac{E_{AC} \cdot e}{kT} = \ln \frac{n_C}{n_A}, \quad \frac{E_{CB} \cdot e}{kT} = \ln \frac{n_B}{n_C},$$

откуда следует закон последовательных контактов Вольты:

$$E_{AB} = E_{AC} + E_{CB}.$$

Если два металла с различными энергиями Ферми (энергия, соответствующая последнему заполненному электронному уровню при 0 К) ε_{1F} и ε_{2F} и работами выхода A_1 и A_2 привести в контакт, то электроны из металла с большей энергией Ферми и меньшей работой выхода начнут перетекать в металл с меньшей энергией Ферми и большей работой выхода.

Перенос электронов будет продолжаться до тех пор, пока уровни Ферми у этих металлов не сравняются (рис. 2).



Рис. 2. Вычисление внешней $V_2 - V_1$ и внутренней $\varphi_2 - \varphi_1$ контактной разности потенциалов: ε_{1F} , ε_{2F} – положение уровней Ферми до контакта, $\varepsilon_{1F} + e\varphi_1 = \varepsilon_{2F} + e\varphi_2$ – уровень Ферми после соприкосновения выравнивается. $A_1 = e\varphi_1$, $A_2 = e\varphi_2$.

Поскольку энергии Ферми

$$\varepsilon_F \approx \frac{\pi h^2}{32m} n^{2/3}$$

пропорциональны концентрации электронов, то перетекание электронов из одного металла в другой соответствует их диффузии из металла с большей концентрацией электронов в металл с меньшей концентрацией электронов.

Возникшее электрическое поле, связанное с разделением зарядов, останавливает перетекание электронов из одного металла в другой.

Из условия равенства энергий Ферми

$$e\varphi_1 + \varepsilon_{1F} = e\varphi_2 + \varepsilon_{2F}$$

определим разность потенциалов для двух точек, находящихся внутри металлов,

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\varepsilon_{1F} - \varepsilon_{2F}}{e}$$

— величину внутренней контактной разности потенциалов ($e < 0$ — заряд электрона).

Подставляя в полученную формулу выражение для ε_F , находим

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi \hbar^2}{32 m e} \left(n_2^{2/3} - n_1^{2/3} \right) \approx 3,7 \cdot 10^{-19} \left(n_2^{2/3} - n_1^{2/3} \right) [\text{В}]$$

В частности, для меди $\varphi_2 - \varphi_1 \approx 1$ В. Для других металлов эта величина порядка сотых или десятых долей вольта.

Поскольку металлы при контакте заряжаются, то возникшее электрическое поле, созданное приконтактным электрическим зарядом, локализовано не только вблизи границы раздела, но и в зазоре между проводниками.

Разность потенциалов во внешних точках $V_2 - V_1$, лежащих в непосредственной близости (один – два атомных слоя от поверхности проводников), называется внешней контактной разностью потенциалов (рис. 3).

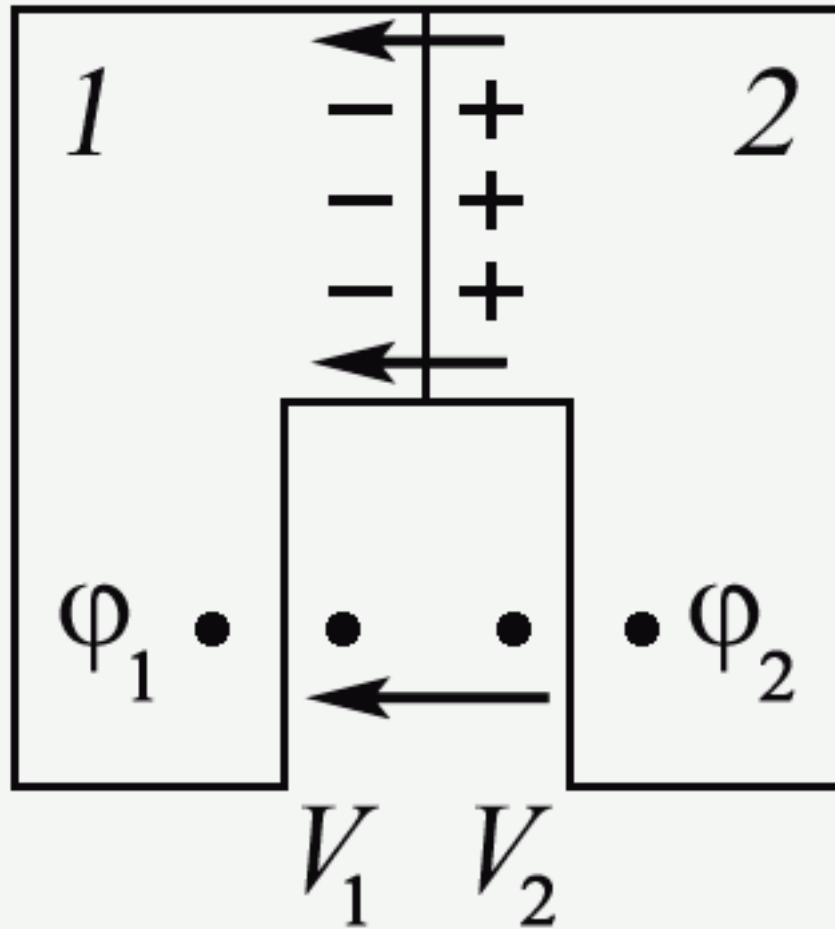


Рис. 3. Электрические поля, созданные при контакте двух различных металлов 1, 2.

Поскольку в условиях установившегося равновесия (рис. 2)

$$A_1 - eV_1 = A_2 - eV_2,$$

то внешняя контактная разность потенциалов ($e < 0$)

$$V_2 - V_1 = \frac{A_2 - A_1}{e}$$

будет определяться разностью работ выхода электрона из металлов.

Металл с меньшей работой выхода заряжается положительно, а с большей работой выхода — отрицательно.

Величина работы выхода материалов существенно зависит от состояния поверхности. Измеряя внешнюю контактную разность потенциалов, можно следить за изменением свойств поверхности в ходе различных физико-химических процессов.

На существовании контактной разности потенциалов основана работа важнейших элементов полупроводниковой электроники: диодов, триодов, контактов металл — полупроводник.

Учет контактной разности потенциалов важен при конструировании электровакуумных приборов, поскольку она может влиять на их вольтамперные характеристики.

При прямом преобразовании тепловой энергии в электрическую в термоэмиссионном преобразователе создается напряжение, по величине близкое к контактной разности потенциалов.

2. Эффект Зеебека – возникновение термоЭДС

В 1821 г. немецкий физик Зеебек открыл явление возникновения электрического тока в замкнутом контуре, состоящем из двух проводников A , B .

При этом контакты между проводниками поддерживаются при разных температурах. (рис. 4.4).

Градиент температуры в проводнике создает разность концентраций холодных и горячих электронов между спаями. В результате поток горячих электронов направляется к холодному спаю, а поток холодных – к горячему.

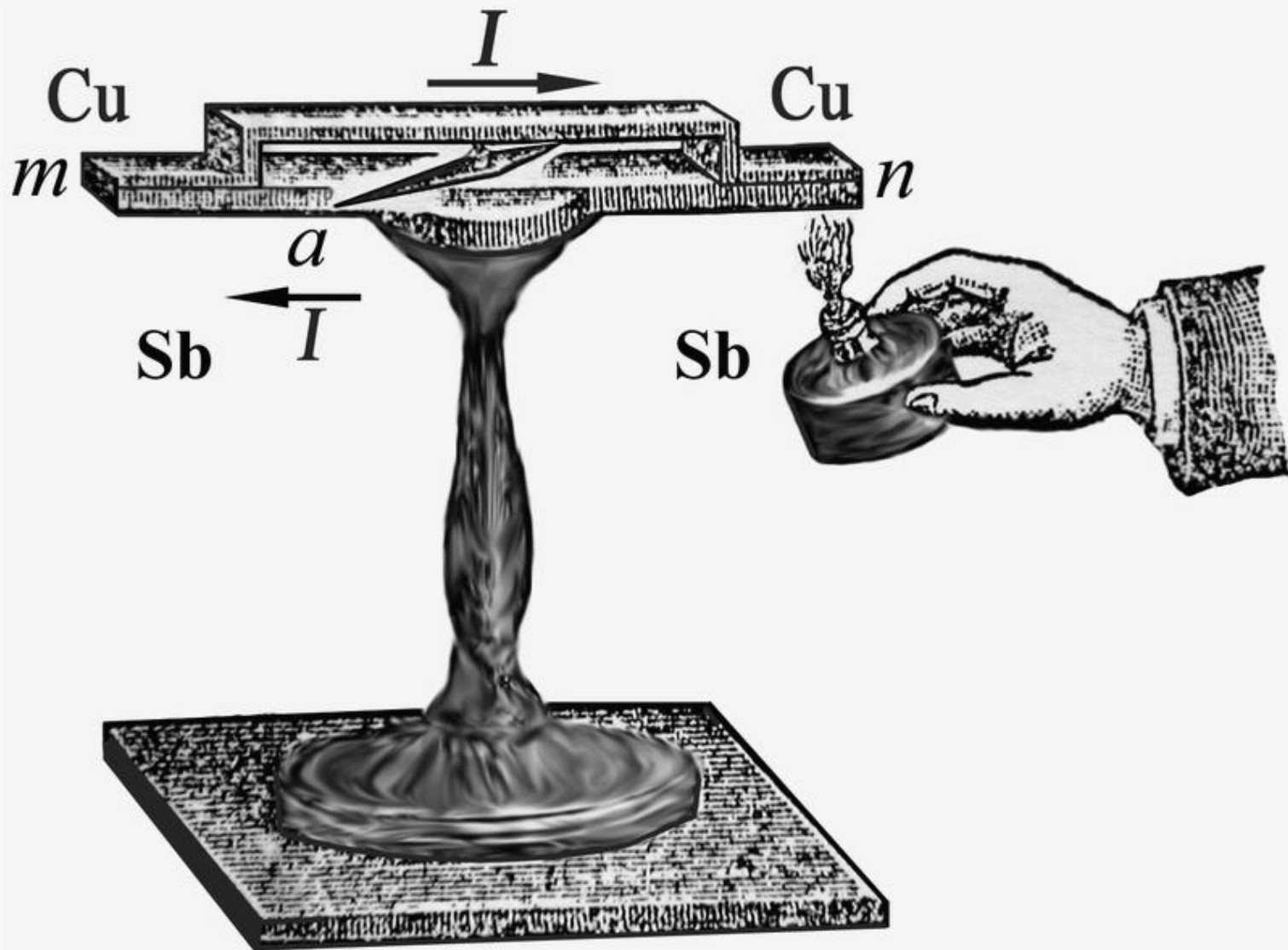


Рис. 4. Схема опыта Зеебека по обнаружению термоЭДС

Поскольку скорости холодных и горячих электронов различны, то на одном из спаев создается избыток отрицательного, а на другом — положительного заряда.

В замкнутой цепи суммарные потоки электронов в проводниках A , B различны, поэтому устанавливается некоторое значение стационарного тока, обусловленного величиной возникшей электродвижущей силы в замкнутой цепи.

Возникающая диффузионная термо ЭДС определяется температурной зависимостью концентрации носителей заряда и их подвижностью (рис. 5). Подвижность изменяется с температурой, поскольку меняется характер взаимодействия электронов с колебаниями решетки и примесями.

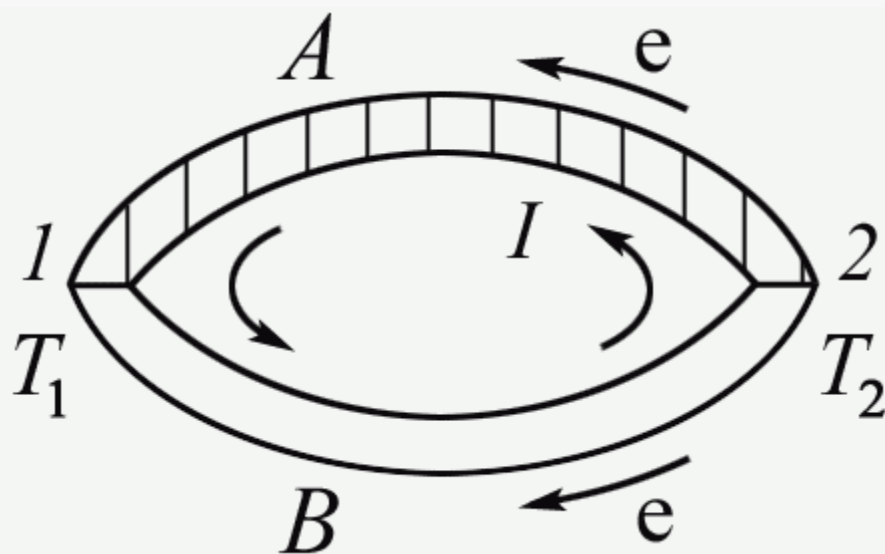


Рис. 5

В металлах термоЭДС определяется в основном различием подвижностей горячих и холодных электронов.

Электродвижущая сила в замкнутом контуре из двух проводников равна разности ЭДС более и менее нагретого слоя

$$\Delta \mathbf{E} = \mathbf{E}(T_2) - \mathbf{E}(T_1).$$

Производная

$$\alpha = \frac{d\Delta \mathbf{E}}{dT}$$

называется коэффициентом термоЭДС и является характеристикой обоих материалов термопары.

Поскольку число возможных пар очень велико, то условились определять величину α для каждого из материалов по отношению к свинцу.

В этом случае коэффициент термоЭДС металла A по отношению к металлу B равен

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B,$$

где α_A и α_B измерены для металла A и металла B по отношению к свинцу. Величины α сильно зависят от чистоты материалов.

В случае линейной зависимости ε от температуры

$$\mathbf{E}(T) = \alpha T$$

получаем

$$\Delta \mathbf{E} = (\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1).$$

Для таких пар металлов, как (Cu, Bi), (Ag, Cu), (Au, Cu), (Pt, Fe) это соотношение выполняется в широких пределах.

В полупроводниках термоэлектрические свойства выражены значительно сильнее, чем в металлах, поскольку в полупроводниках концентрация электронов и дырок сильно изменяется с температурой, как и положение уровня Ферми.

Поэтому в то время, как у металлов α изменяется от единиц до десятков микровольт на градус, то у полупроводников α достигает милливольт на градус, т.е. в десятки и сотни раз больше.

Термоэлектричество может быть использовано для генерации электрического тока, если объединить термопары в термобатареи, состоящие из последовательно соединенных термоэлементов, слои которых поддерживаются при разных температурах (рис. 4.6). Термобатареи из металлических термопар обладают малым КПД ~ 0,1%.

КПД полупроводниковых элементов намного больше и может достигать 15% и выше.

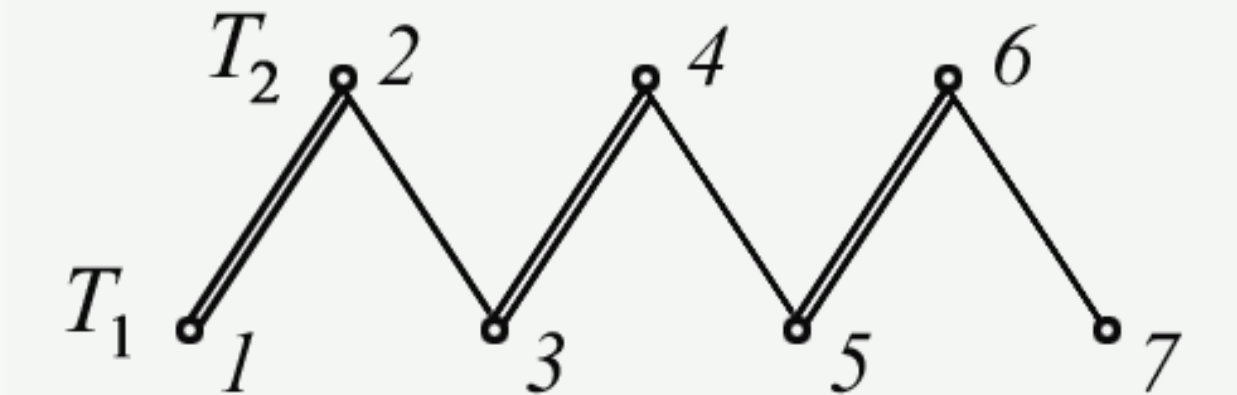


Рис. 6. Термобатарея.

Металлические термопары нашли широкое применение для точного измерения температур в диапазоне от нескольких градусов Кельвина до 2800 К с точностью от нескольких градусов Кельвина до 0,01 К.

3. Эффект Пельтье

Пельтье состоит в поглощении или выделении теплоты при прохождении электрического тока через контакт двух различных проводников.

Выделение теплоты сменяется поглощением при изменении направления тока. Эффект был обнаружен в 1834 г. французским часовщиком Пельтье.

Помещенная на стыке двух металлов – висмута и сурьмы капля воды замерзала при одном направлении тока, а при изменении направления тока образовавшийся лед таял.

Это указывало, что помимо джоулева тепла в спае выделяется или поглощается дополнительное тепло, которое стало называться теплом Пельтье.

В отличие от джоулева тепла, пропорционального квадрату тока, тепло Пельтье Q пропорционально количеству заряда q , прошедшему через контакт:

$$Q = \Pi q.$$

Величина Π называется коэффициентом Пельтье. Коэффициент Π определяется родом контактирующих материалов и их температурой. Для металлов коэффициент Пельтье порядка $10^{-2} \div 10^{-3}$ В, для полупроводников $3 \cdot 10^{-1} \div 10^{-3}$ В.

Явление Пельтье обратное явлению Зеебека. Эффект Пельтье объясняется тем, что средние энергии носителей тока в различных проводниках различны и зависят от энергетического спектра материала и механизмов рассеяния.

При переходе из одного проводника в другой электроны либо передают избыточную энергию атомам твердого тела, либо пополняют недостающую энергию за счет тепловых колебаний решетки (рис. 7). В первом случае будет происходить выделение тепла, а во втором — поглощение.

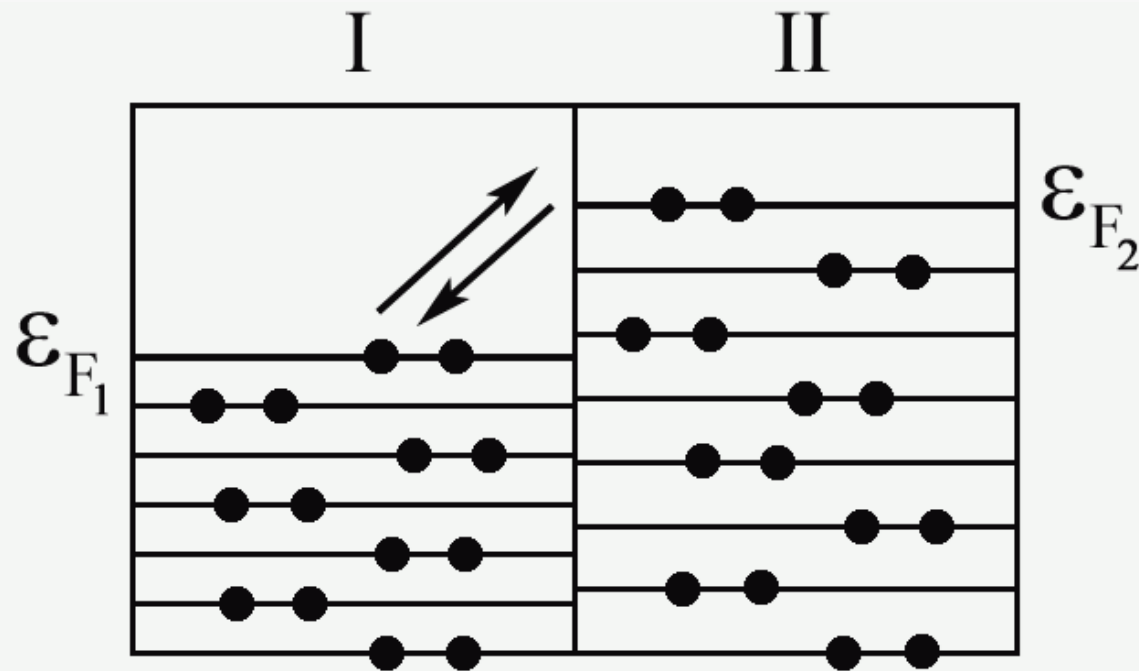


Рис. 4.7. Эффект Пельтье. В металле II средняя энергия электронов выше, чем в металле I. Уровень Ферми расположен в металле II выше, чем в I. При переходе электронов из I металла во II происходит поглощение дополнительной энергии – тепло Пельтье отрицательно. При переходе из металла II в I тепло Пельтье положительно.

Эффект Пельтье используется для охлаждения в холодильных установках, где совершенно исключены механические, движущиеся части, а также в электронных приборах.

Основные выводы

Контактная разность потенциалов возникает между приведенными в контакт различными металлами.

Разность потенциалов в любом составленном ряду металлов определяется только крайними металлами.

Для двух точек, находящихся внутри различных металлов, контактная разность потенциалов определяется разностью уровней Ферми в металлах до контакта

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\varepsilon_{1F} - \varepsilon_{2F}}{e}$$

($e < 0$ – заряд электрона).

Разность потенциалов $V_1 - V_2$ во внешних точках, лежащих в непосредственной близости от поверхности проводников, называется внешней контактной разностью потенциалов:

$$V_2 - V_1 = \frac{A_2 - A_1}{e}$$

где A – работа выхода электрона из металла.

Эффект Зеебека – возникновение электрического тока в замкнутом контуре, состоящем из разных металлов, контакты между которыми поддерживаются при разной температуре.

Величина термоЭДС ΔE пропорциональна разности температур ΔT спаев

$$\Delta E = \alpha \Delta T,$$

где α – коэффициент термоЭДС для конкретной пары металлов.

Эффект Пельтье – поглощение или выделение тепла при прохождении электрического тока через контакт двух различных материалов. Выделение теплоты сменяется поглощением при изменении направления тока.

Дополнительное к джоулеву тепло Q пропорционально количеству заряда, прошедшего через контакт,

$$Q = \Pi q,$$

где Π – коэффициент Пельтье.