

Министерство образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ»

Факультет электроники
Кафедра микроэлектроники

Материалы и элементы электронной техники Ч.І

доц. Лазарева Н.П.

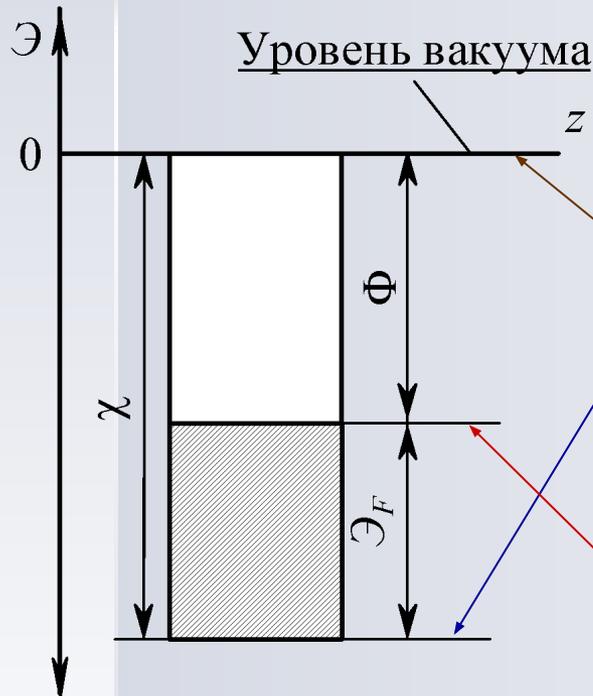
тема: 8

Контактные явления и термоэлектродвижущая сила



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Основные положения



В металлах состоянию покоя свободного электрона соответствует **дно зоны проводимости**.

Состояние покоящегося электрона в вакууме обычно принимают за **нулевой уровень отсчета энергии**.

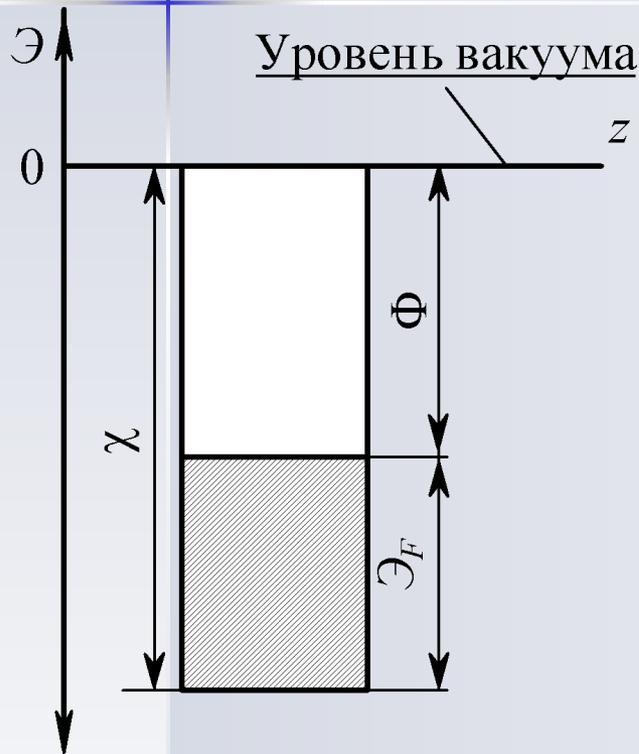
Чтобы перевести электрон из твердого тела в вакуум, необходимо затратить некоторую энергию.

Уровень Ферми в металле



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Основные положения



Работу, которую требуется совершить, чтобы перевести электрон со дна зоны проводимости в состояние покоя в вакууме, называют электронным средством χ или **истинной работой выхода**. Величина χ определяет **глубину потенциальной ямы**, т.е. потенциальную энергию электронов в металле.

Термодинамическая работа выхода Φ характеризуется энергетическим зазором между уровнем Ферми и нулевым уровнем вакуума.

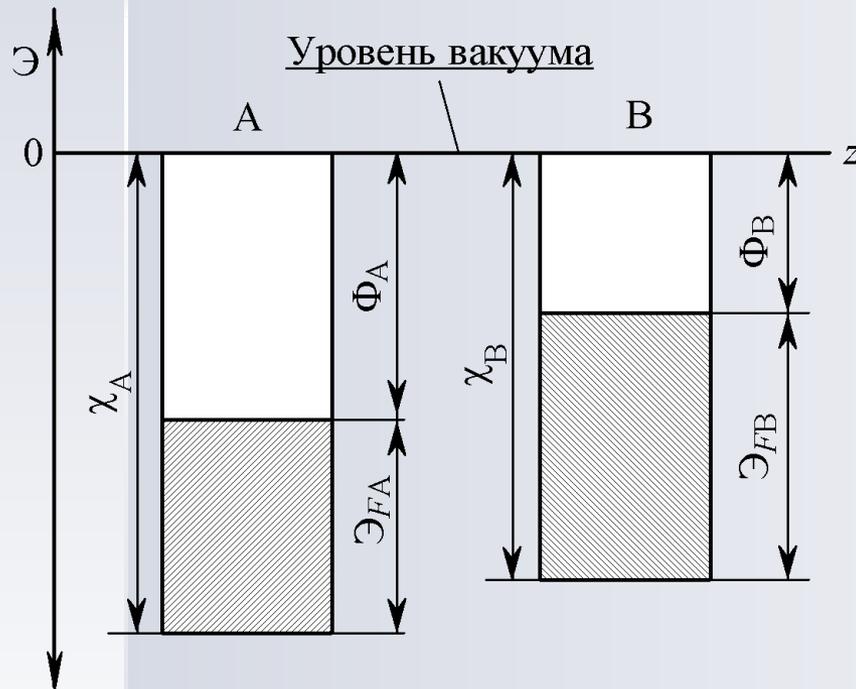
Кинетическая энергия электронов, находящихся на нижнем уровне зоны проводимости, равна нулю.

Максимальной кинетической энергией обладают электроны, занимающие состояния вблизи уровня Ферми.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Энергетическая диаграмма контакта двух металлов



В изолированном состоянии электронный газ в металлах A и B характеризуется энергиями Ферми \mathcal{E}_{FA} и \mathcal{E}_{FB} , которые отсчитываются от дна зоны проводимости.

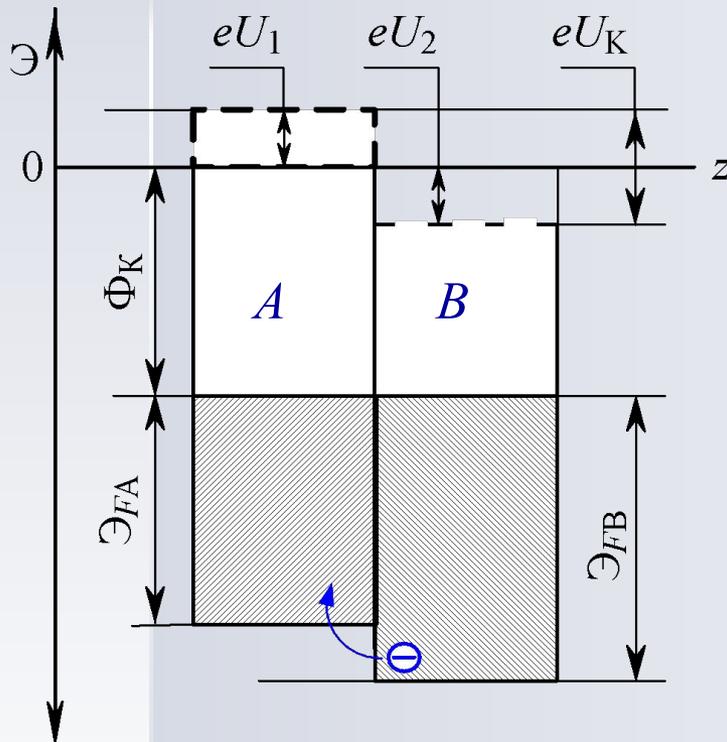
Электроны в металле B имеют более высокую кинетическую энергию, чем в металле A .

Исходное энергетическое состояние
двух разнородных металлов



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Энергетическая диаграмма контакта двух металлов



Контакт в двух разнородных металлах в состоянии термодинамического равновесия

Если два металла привести в металлургический контакт, начнется обмен электронами между ними, который будет продолжаться до установления термодинамического равновесия в системе.

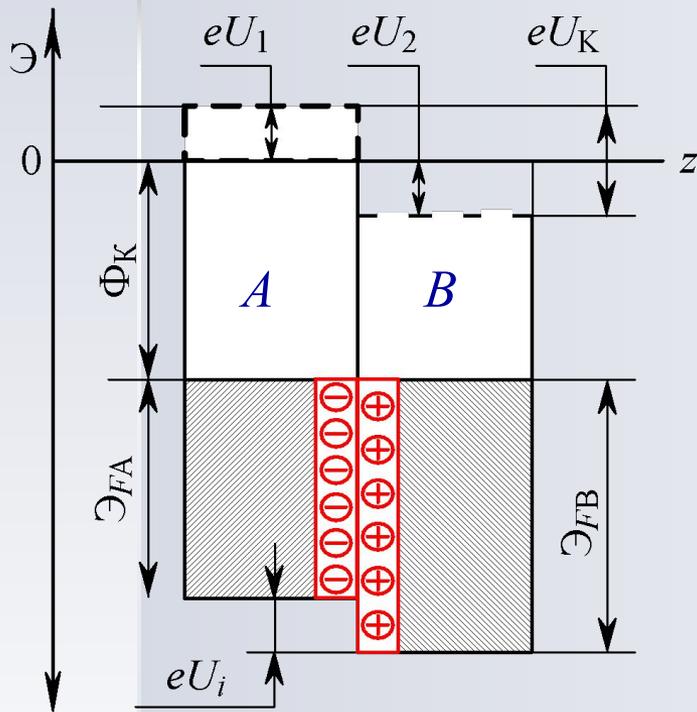
Имеет место преимущественный переход электронов из металла с меньшей работой выхода (Φ_B), т.е. с более высоким положением уровня Ферми в исходном состоянии, в металл, у которого работа выхода больше (Φ_A). Такой переход электронов приводит к уменьшению суммарной свободной энергии системы.

Установление равновесия сопровождается выравниванием положений уровней Ферми в металлах и значений термодинамических работ выхода электронов.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Энергетическая диаграмма контакта двух металлов



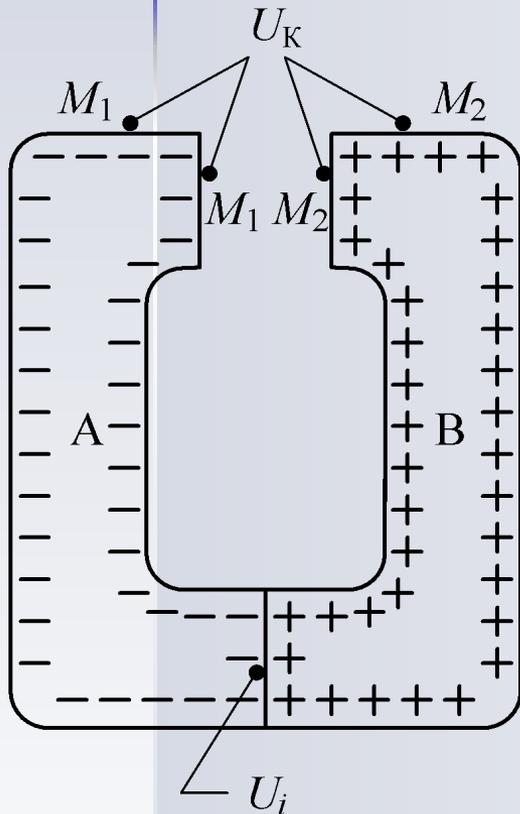
В результате перераспределения электронов металл A заряжается отрицательно, его энергетические уровни поднимаются на eU_1 , металл B заряжается положительно, соответственно его энергетические уровни опускаются на величину eU_2 .

Чтобы приблизить электрон от бесконечно удаленной точки к отрицательно заряженной поверхности металла A , надо совершить работу против сил кулоновского отталкивания, равную eU_1 . Потенциальная энергия электрона у поверхности металла A выше, энергии нулевого уровня в вакууме.

При положительном заряде поверхности для удаления электрона от металла требуется совершить работу eU_2 против сил кулоновского притяжения. Это означает, что потенциальная энергия электрона у поверхности металла B меньше, чем энергия в вакууме вдали от системы.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила



Заряд в металле локализуется вблизи поверхности в тонком слое толщиной порядка $0,02 \div 0,05$ нм (глубина экранирования Томаса - Ферми).

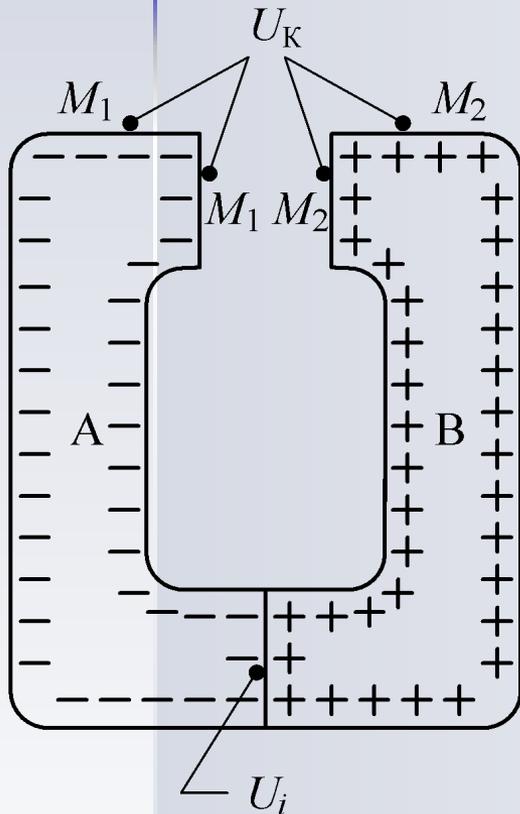
Поскольку носители заряда в металле подвижны, происходит выравнивание электронной плотности по поверхностям обоих проводников.

При отсутствии тока через металлический проводник его поверхность оказывается эквипотенциальной.

Разность потенциалов U_K между любыми двумя точками M_1 и M_2 , расположенными в непосредственной близости от поверхности проводников, но находящимися вне этих тел, называют *внешней контактной разностью потенциалов*



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила



Внешняя контактная разность потенциалов

$$eU_K = \Phi_A - \Phi_B$$

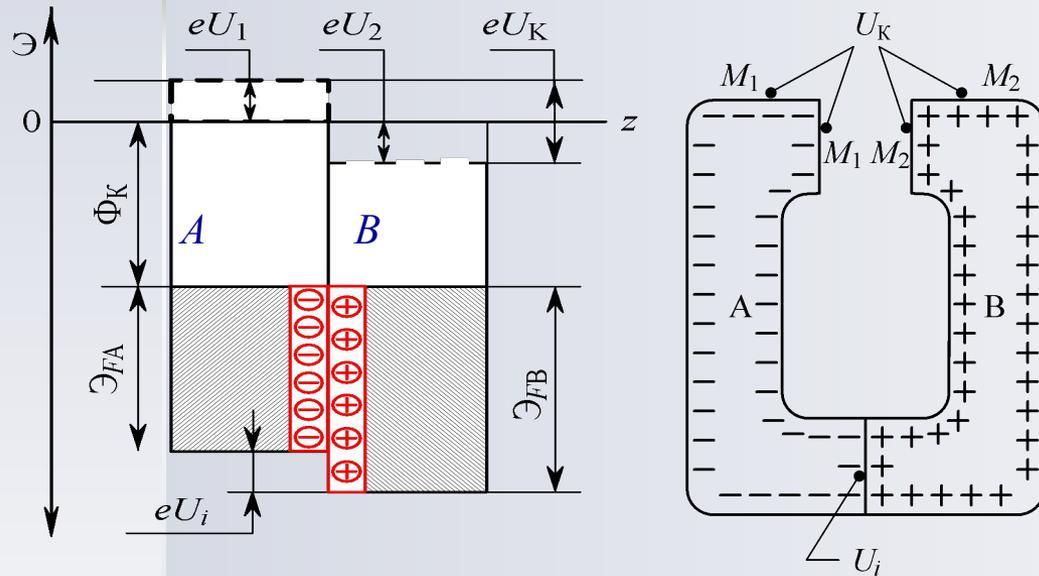
Внешняя контактная разность потенциалов U_K определяется разностью термодинамических работ выхода электронов у контактирующих металлов в исходном состоянии.

Величина eU_K представляет собой энергетический барьер, обеспечивающий эквивалентность переходов электронов в вакуум из металлов A и B при их контактировании.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Схема распределения зарядов в области контакта двух металлов



В контакте между металлами в состоянии термодинамического равновесия также формируется энергетический барьер и обусловленное им электрическое поле. Это поле E_i называют контактным, а соответствующую ему разность потенциалов U_i – внутренней контактной разностью потенциалов.

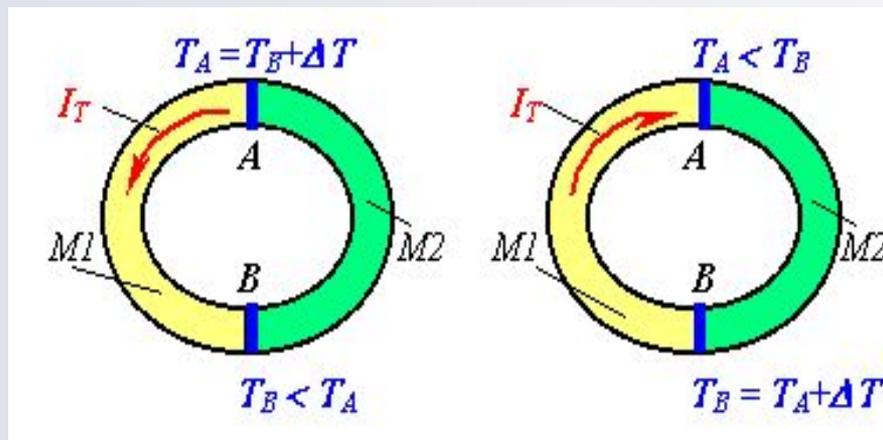
Для перевода электрона с нулевой кинетической энергией из металла B в металл A необходимо совершить работу, равную разности в энергиях Ферми, отсчитываемых относительно дна зоны проводимости, для металлов в исходном состоянии

$$eU_i = \mathcal{E}_{FA} - \mathcal{E}_{FB}$$



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Термоэлемент, составленный из двух различных проводников, образующих замкнутую цепь, называют термопарой.

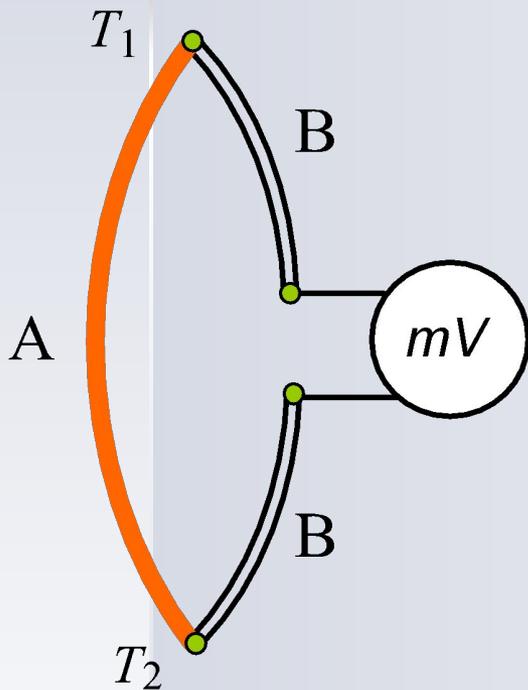


Возникновение термоиндуцированного тока в двух спаянных проводниках при различных температурах контактов

При различной температуре контактов в замкнутой цепи возникает ток, называемый термоэлектрическим.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила



Внутренняя разность потенциалов U_i возникает на каждом из контактов, причем внутреннее поле в обоих контактах направлено от металла с большей энергией Ферми к металлу с меньшим значением \mathcal{E}_F . Это значит, что при обходе по замкнутому контуру внутренние э.д.с. имеют встречную полярность и компенсируют друг друга.

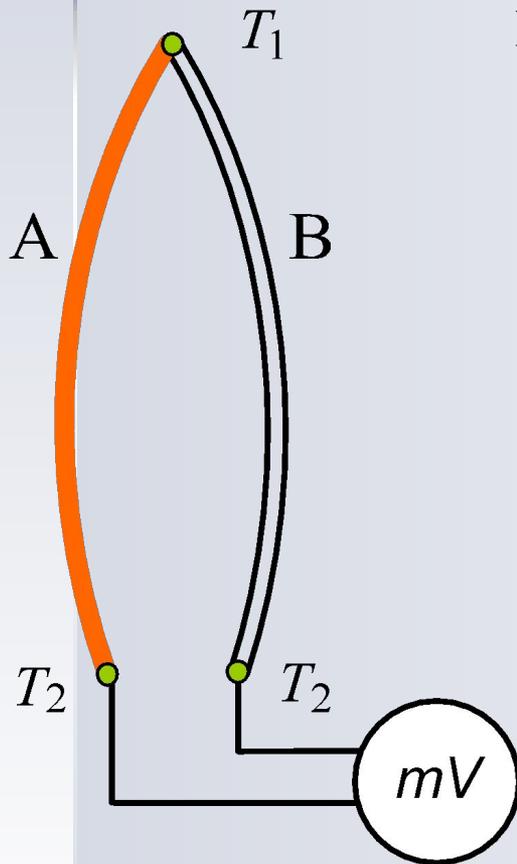
Если цепь разорвать в произвольном месте, то на концах разомкнутой цепи появится разность потенциалов, которую называют *термоэлектродвижущей силой*.

Включение в измерительную цепь термопары концами термоэлектродов

По имени первооткрывателя это явление получило название эффекта Зеебека.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила



В относительно небольшом температурном интервале *термоэлектродвижущая сила* (термо-э.д.с.) пропорциональна разности температур контактов (спаев):

$$U_{AB} \approx \alpha_{AB} (T_2 - T_1).$$

Коэффициент пропорциональности α_{AB} называют относительной дифференциальной или удельной термо-э.д.с.

Значение α_{AB} зависит от природы соприкасающихся проводников и температуры.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Термо-э.д.с. в контуре складывается из трех составляющих.

Первая из них обусловлена температурной зависимостью внутренней контактной разности потенциалов U_i , которая, в свою очередь, связана с температурным изменением положения уровня Ферми.

В металлах с увеличением температуры уровень Ферми, хотя и слабо, но смещается вниз по энергетической шкале в соответствии с выражением

$$\mathcal{E}_F(T) = \mathcal{E}_{F(0)} \left\{ 1 - \pi^2 \left[kT / \mathcal{E}_{F(0)} \right]^2 / 12 \right\}.$$

Поэтому на более холодном конце проводника он должен располагаться несколько выше, чем на более нагретом.

Следствием смещения уровня Ферми является возникновение контактной составляющей термо-э.д.с.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Термо-э.д.с. в контуре складывается из трех составляющих.

Вторая составляющая термо-э.д.с., называемая объемной, обусловлена диффузией носителей заряда от горячих спаев к холодным.

Средняя кинетическая энергия электронов в металле изменяется с температурой:

$$\mathcal{E}_{cp}(T) = 3/5 \mathcal{E}_{F(0)} \{ 1 + 5 \pi^2 [kT / \mathcal{E}_{F(0)}]^2 / 12 \}.$$

Отсюда следует, что электроны, сосредоточенные на более горячем конце, обладают несколько большей кинетической энергией и большей скоростью теплового движения по сравнению с носителями заряда холодного конца. Поэтому они в большем количестве диффундируют в направлении температурного градиента, нежели в обратную сторону.

Диффузионный поток, перенося заряд из горячего конца в холодный, создает между ними разность потенциалов.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Термо-э.д.с. в контуре складывается из трех составляющих.

Третья составляющая термо-э.д.с. возникает в контуре вследствие увлечения электронов квантами тепловой энергии (фононами).

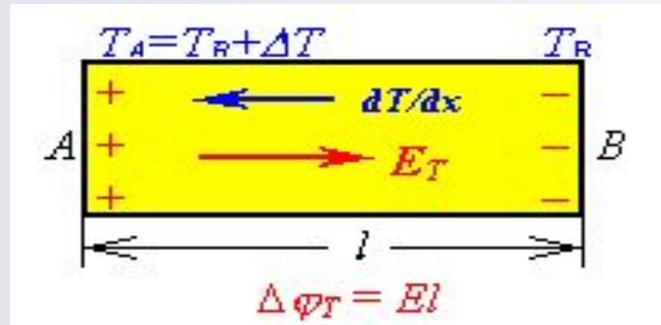
Их поток распространяется к холодному спаю («фононный ветер»).

Все составляющие термо-э.д.с. определяются небольшой концентрацией электронов, расположенных на энергетических уровнях, близких к уровню Ферми, и отстоящих от него на величину порядка kT .

Поэтому удельная термо-э.д.с. для металлов оказывается очень небольшой.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила



И в однородном проводнике, т.е. изготовленным из одного металла, при наличии перепада температуры на концах его также возникает разность потенциалов.

Ее значение, отнесенное к единичной разности температур, называют абсолютной удельной термо-э.д.с. α_{Me}

В термопарном контуре относительная удельная термо-э.д.с. представляет собой разность абсолютных удельных термо-э.д.с. составляющих проводников:

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

где α_A и α_B – абсолютные удельные термо-э.д.с. контактирующих металлов A и B .

При комнатной температуре отношение kT / \mathcal{E}_F имеет значение порядка 10^{-3} . Поэтому α_{Me} должна составлять несколько мкВ / К.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Применение эффекта Зеебека

Возникновение э.д.с. (термо-э.д.с.) в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми находятся при разных температурах

Металлические термопары широко используются для точного измерения температуры.

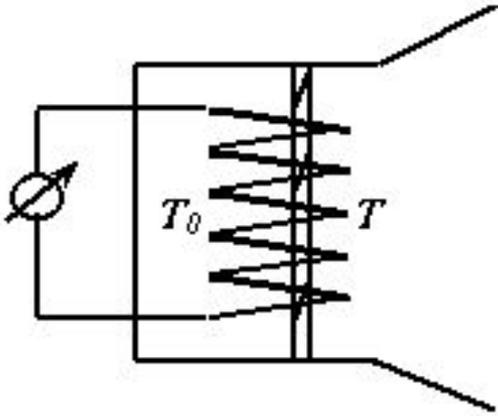
Прибор для измерения возникающей э.д.с. включают либо в разрыв одной из ветвей, либо в разрыв одного из спаев термопары, как показано выше. В процессе измерений необходимо стабилизировать температуру одного из спаев термопары (например, с помощью тающего льда).

Точность измерения температуры обычно составляет $0,1 \div 1,0$ К, а диапазон измеряемых температур зависит от материалов термопары.



Контактные явления и термоэлектродвижущая сила

Применение эффекта



Термобатарея

Для увеличения чувствительности термоэлементы соединяют последовательно в термобатареи). Все четные спаи поддерживаются при одной температуре, а все нечетные - при другой. Термо-э.д.с. такой батареи равна сумме термо-э.д.с. отдельных элементов.

Миниатюрные термобатареи (так называемые термостолбики) применяют для измерения интенсивности света (как видимого, так и невидимого). В соединении с чувствительным гальванометром они обладают огромной чувствительностью: обнаруживают, например, тепловое излучение человеческой руки.

С помощью явления Зеебека, помимо температуры, можно определять и другие физические величины, измерение которых может быть сведено к измерению температур: силы переменного тока, потока лучистой энергии, давления газа и т.д.



ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К ГЛАВЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

1. Какие основные виды проводников электрического тока вам известны?
2. В каком соотношении друг к другу находятся скорость дрейфа и тепловая скорость движения электронов в металле в нормальных условиях?
3. Сформулируйте закон Видемана Франца. Пользуясь данными по электрическим свойствам меди, рассчитайте ее теплопроводность при температуре 200 °С.
4. Объясните физический смысл уровня Ферми.
5. Какими свойствами обладает «электронный газ» в состоянии вырождения?
6. Как влияет температура на среднюю скорость теплового движения электронов в металле?



ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К ГЛАВЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

7. Почему удельное сопротивление металлов растет с повышением температуры?
8. Что называют температурным коэффициентом удельного сопротивления? Является ли он константой для данного металла?
9. Как влияют примеси на удельное сопротивление металлов?
10. Почему примеси металлоидных элементов сильнее влияют на удельное сопротивление металлов, нежели примеси металлических атомов?
11. Почему металлические сплавы типа твердых растворов обладают более высоким удельным сопротивлением, нежели чистые компоненты, образующие сплав?
12. Как изменяется средняя длина свободного пробега электронов при упорядочении структуры металлического сплава?
13. Почему сплавы типа твердых растворов имеют меньший $\alpha\rho$, нежели чистые металлы?
14. Почему возрастает удельное сопротивление металлов на высоких частотах?



ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К ГЛАВЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

15. Как зависит удельное сопротивление тонких металлических пленок от их толщины и почему?
16. Изобразите температурную зависимость поверхностного удельного сопротивления для пленок с островковой структурой.
17. Что понимают под истинной и термодинамической работами выхода электронов из металла?
18. Объясните физический смысл внешней и внутренней контактных разностей потенциалов, возникающих в спае двух металлов.
19. В каких условиях возможно появление термо-э.д.с. в замкнутой цепи? Назовите основные механизмы, ответственные за возникновение термо-э.д.с.
20. Как связаны между собой абсолютная и относительная удельные термо-э.д.с. контактной пары?