

## ЛЕКЦИЯ № 15

### 14. Контакт электронного и дырочного полупроводников

В подавляющем большинстве устройств, используемых в настоящее время в технике, главной частью является контакт двух примесных полупроводников, обладающих различной проводимостью, так называемый электронно-дырочный переход или ***p-n***-переход.

Контакт между ***n***- и ***p***-типами полупроводников можно получить:

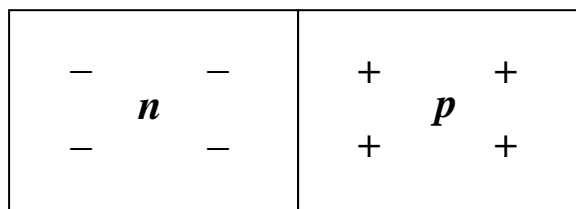
1) путем прямого тесного соединения двух образований, имеющих различные типы проводимости (но такой контакт очень плох, т. к. существуют окисные пленки, различные дефекты и др.);

2) методом сплавления – при этом сплавленный ***p-n***-переход характеризуется почти скачкообразным изменением типа проводимости и поэтому называется резким ***p-n***-переходом;

3) методом диффузии – такой переход образуется в результате диффузии акцепторной примеси из газообразной или жидкой фазы в донорный полупроводник или, наоборот, донорной примеси в акцепторный полупроводник.

В полупроводнике *n*-типа основными носителями заряда являются электроны, отданные донорами в зону проводимости. Здесь же есть и небольшое число дырок (неосновных носителей), образованных за счет перехода электронов из валентной зоны непосредственно в зону проводимости.

В полупроводнике *p*-типа основными носителями заряда являются дырки. Кроме того, здесь имеется небольшое количество электронов (неосновных носителей), которые перешли непосредственно из валентной зоны в зону проводимости в результате теплового движения электронов.

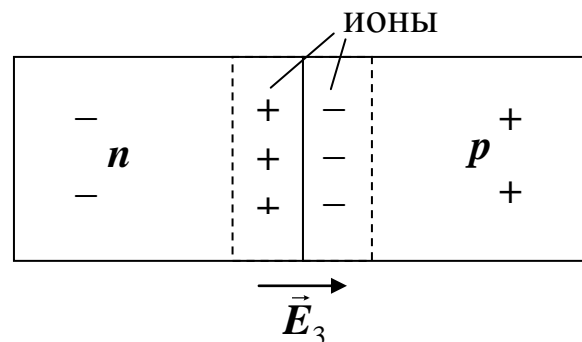


После приведенных в контакт двух полупроводников с разной проводимостью через границу раздела начинается диффузия электронов и дырок.

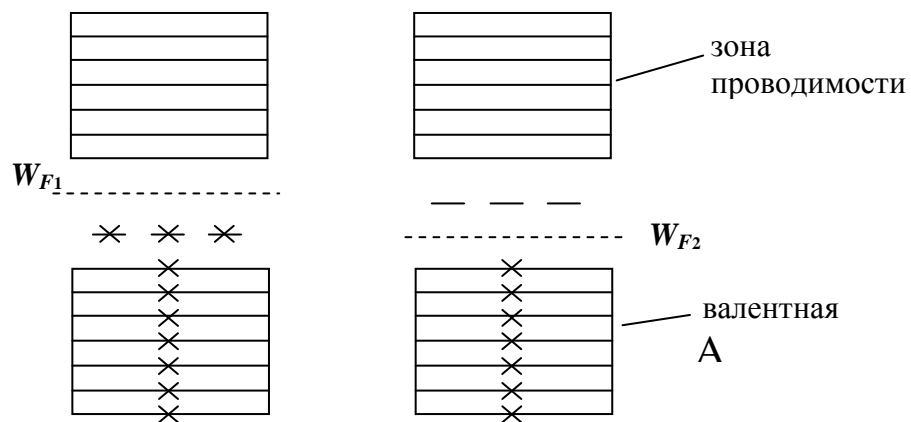
Электроны из полупроводника ***n***-типа диффундируют в полупроводник ***p***-типа, при переходе через границу раздела электроны встречаются с дырками и рекомбинируют (электроны и дырки уничтожают друг друга). И на границе полупроводника ***p***-типа начинает накапливаться нескомпенсированный отрицательный заряд ионов решетки, который прекращает диффузию электронов.

Дырки из полупроводника **p**-типа диффундируют в полупроводник **n**-типа, при переходе через границу раздела дырки встречаются с электронами и рекомбинируют (дырки и электроны уничтожают друг друга). И на границе полупроводника **n**-типа начинает накапливаться нескомпенсированный положительный заряд ионов решетки, который прекращает диффузию дырок.

Разделение зарядов на границе двух полупроводников приводит к созданию запирающего электрического поля с напряженностью  $\vec{E}_3$ , которое не дает ни электронам, ни дыркам двигаться через границу раздела – говорят, образовался **p-n**-переход.



Образование **p-n**-перехода можно объяснить с помощью зонной теории твердых тел.



В полупроводнике **n**-типа уровень Ферми расположен выше, чем в полупроводнике **p**-типа. Это значит, что  $\langle W \rangle$  электронов в полупроводнике **n**-типа выше, чем в полупроводнике **p**-типа (электроны полупроводника **n**-типа «горячее» электронов полупроводника **p**-типа).

После приведения в контакт полупроводников с разной проводимостью стремление электронов занять состояния с меньшей энергией приведет к появлению диффузии электронов.

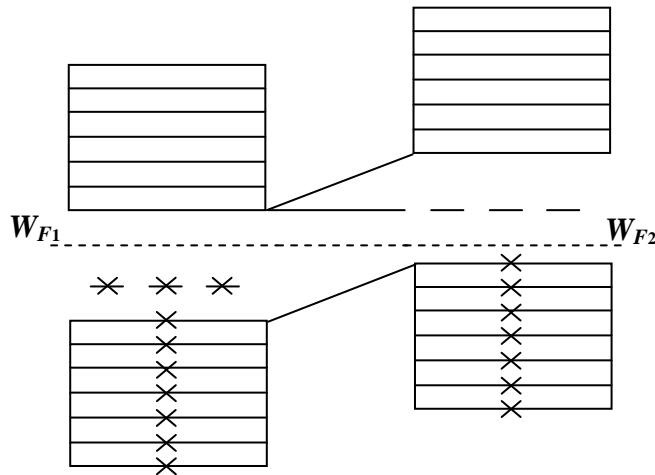
$$I_{n \rightarrow p} \sim \exp\left(-\frac{W - W_{F_1}}{k_B T}\right) = \exp\left[-\frac{W - (W_{F_2} + \Delta W_F)}{k_B T}\right] = \exp\left[-\frac{W - W_{F_2} - \Delta W_F}{k_B T}\right].$$

$$I_{p \rightarrow n} \sim \exp\left(-\frac{W - W_{F_2}}{k_B T}\right),$$

$$I_{\text{рез}} = I_{n \rightarrow p} - I_{p \rightarrow n} \sim \exp\left(-\frac{W - W_{F_2}}{k_B T}\right) \left[ \exp\left(\frac{\Delta W_F}{k_B T}\right) - 1 \right].$$

Переход «горячих» электронов из полупроводника ***n***-типа в полупроводник ***p***-типа, где электроны «холодные», приводит к снижению средней энергии в полупроводнике ***n***-типа и к повышению средней энергии в полупроводнике ***p***-типа (это приводит к смещению энергетических зон).

Диффузия будет проходить до тех пор, пока уровень Ферми в обоих полупроводниках не сравняется.



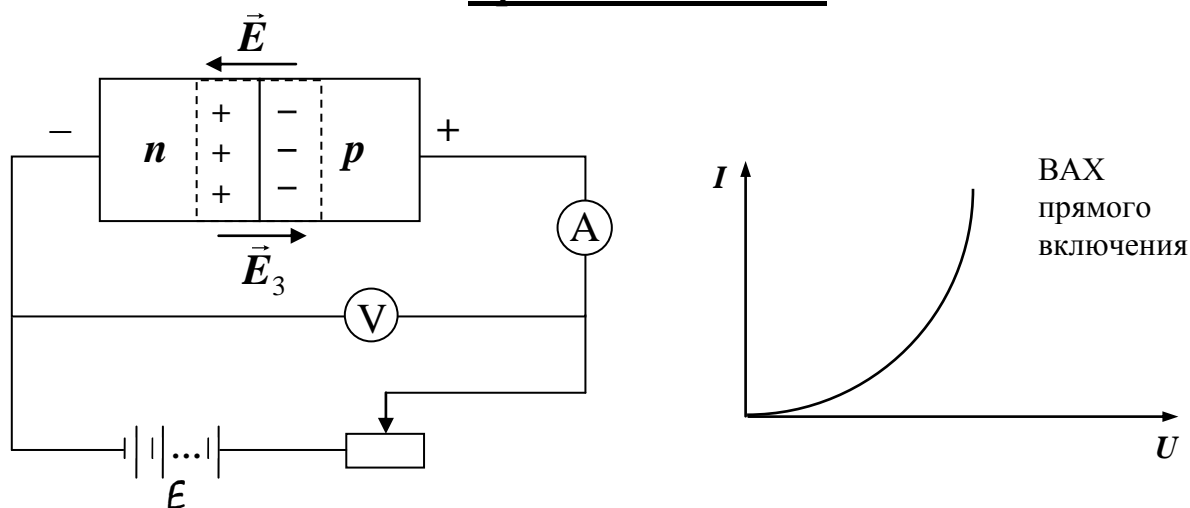
т. к.  $W_{F_1} = W_{F_2}$ , тогда  $\Delta W_F = 0 \rightarrow I_{\text{рез}} = 0!$

Смещение зон относительно друг друга приводит к образованию потенциального барьера, который электроны самостоятельно преодолеть не могут.

Все замечательные свойства ***p-n***-перехода проявляются при включении его в электрическую цепь.

Различают прямое и обратное включения.

### Прямое включение



Напряженность внешнего электрического поля направлена навстречу запирающему и снижает его действие. Поэтому при прямом включении через переход течет электрический ток. И чем больше напряженность внешнего поля, тем больше величина силы прямого тока.

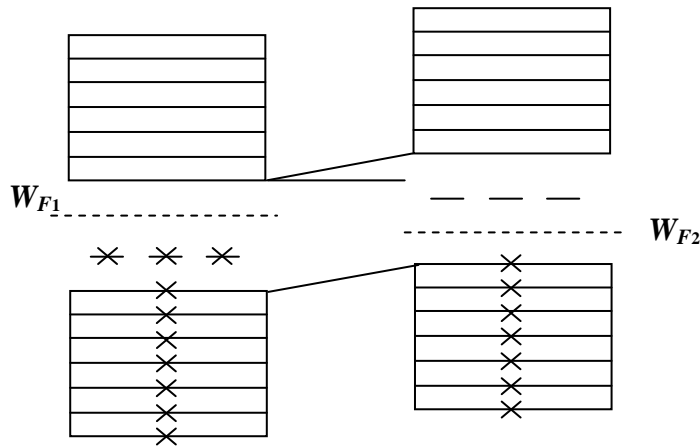
При прямом включении полупроводник *n*-типа получает от внешнего источника дополнительные «более горячие» электроны и  $\langle W \rangle$  электронов в полупроводнике *n*-типа увеличивается. И из полупроводника *p*-типа электроны уходят, что снижает  $\langle W \rangle$  электронов в нем.

Это приводит к смещению энергетических зон относительно друг друга и уровни Ферми вновь оказываются не на одной высоте.

Работа внешнего электрического поля

$$A_c = qU = W_{F_1} - W_{F_2} = \Delta W_F.$$

При этом высота потенциального барьера между энергетическими зонами полупроводников с разной проводимостью уменьшается. И чем больше внешнее напряжение  $U$ , тем ниже потенциальный барьер, а значит больше сила тока прямого включения.



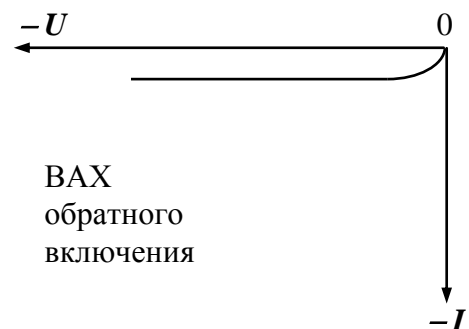
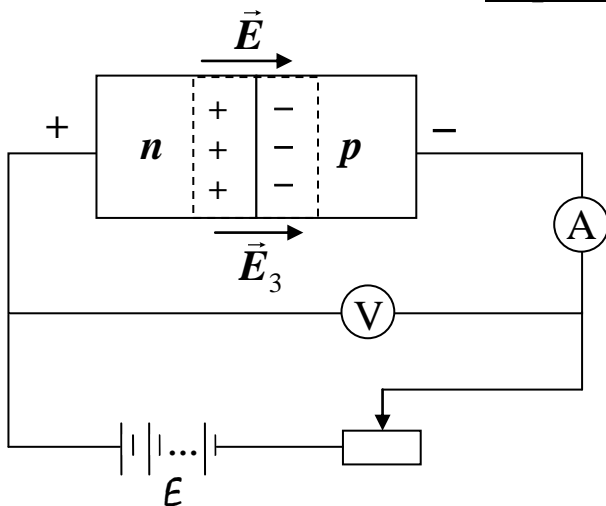
$$I_{\text{рез}} = I_{n \rightarrow p} - I_{p \rightarrow n} \sim \exp\left(\frac{qU}{k_B T}\right) - 1$$

$$I_{\text{прям}} = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

(Сопротивление *p-n*-перехода при прямом включении снижается)

$$R = \frac{dU}{dI} = \left( \frac{dI}{dU} \right)^{-1}.$$

### Обратное включение



Напряженность внешнего электрического поля направлена в ту же сторону, что и запирающее и усиливает его действие. Электрического тока через *p-n*-переход не должно быть.

Но эксперимент показывает, что при обратном включении есть небольшой обратный ток ( $\sim 10^3$  раз меньше прямого тока).

Обратный ток объясняется наличием в полупроводниках неосновных носителей заряда (в полупроводниках *n*-типа – дырок, а в полупроводниках *p*-типа – электронов). Т. к. их небольшое количество, то они все вовлекаются в процесс переноса зарядов и небольшой ток достигает быстро насыщения.

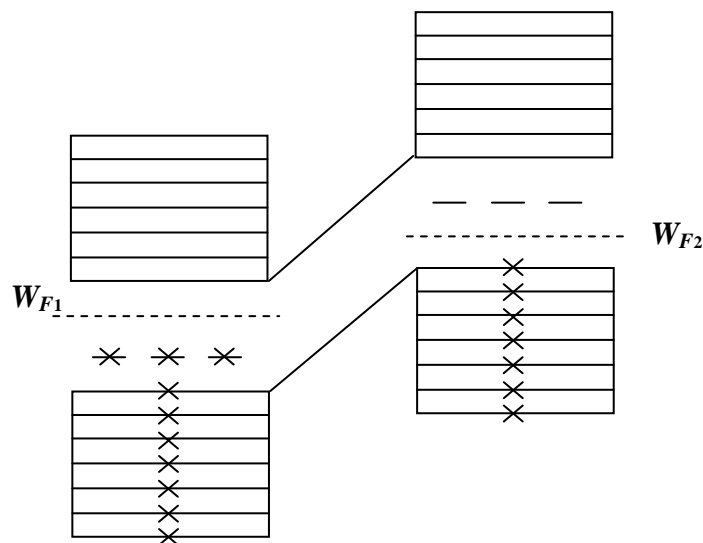
При обратном включении из полупроводника *n*-типа уходят электроны и  $\langle W \rangle$  оставшихся электронов снижается, а полупроводник *p*-типа от внешнего источника получает «более горячие» электроны и  $\langle W \rangle$  электронов в этом полупроводнике увеличивается.

Это приводит к смещению энергетических зон относительно друг друга и уровни Ферми оказываются вновь не на одной высоте, но при этом  $W_{F_2} > W_{F_1}$ , т. е.  $\Delta W_F = W_{F_1} - W_{F_2} < 0$ .

Тогда работа внешнего электрического поля при обратном включении

$$A_c = -qU = W_{F_1} - W_{F_2} = \Delta W_F.$$

При этом высота потенциального барьера между энергетическими зонами полупроводников с разной проводимостью еще более возрастает, препятствуя току основных носителей.



$$I_{\text{рез}} = I_{n \rightarrow p} - I_{p \rightarrow n} \sim \exp\left(\frac{\Delta W_F}{k_B T}\right) - 1 = \exp\left(-\frac{qU}{k_B T}\right) - 1$$

откуда

$$I_{\text{обп}} = -I_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{qU}{k_B T}\right) \right]$$

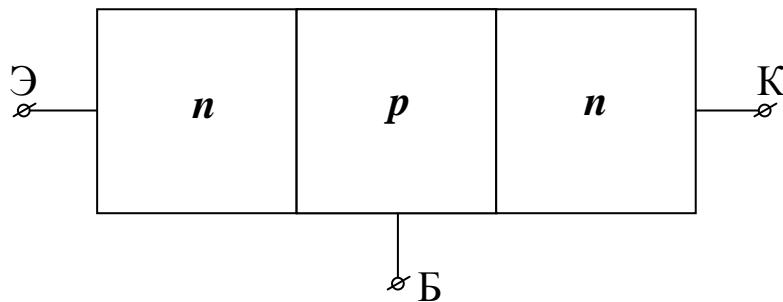
при  $U = 0$ ,  $I_{\text{обп}} = 0$ , при  $\frac{qU}{k_B T} \gg 1$   $I_{\text{обп}} \rightarrow -I_0 = \text{const}$

(ток неосновных носителей заряда).

Т. к. *p-n*-переход в прямом направлении хорошо пропускает электрический ток, а в обратном направлении практически не пропускает, то такое устройство стали называть полупроводниковым диодом.

Полупроводниковые диоды нашли широкое применение в качестве полупроводниковых элементов в выпрямителях электрического тока (где переменный ток преобразуется в постоянный).

А если привести в контакт три полупроводника с разной проводимостью *n-p-n* или *p-n-p*, то такое устройство будет еще и обладать свойством управления сигналами – полупроводниковый транзистор.



Соединение большого количества полупроводников с разной проводимостью – интегральная схема (широкое использование в микроэлектронике).

## 15. Термоэлектронная эмиссия

Электроны в любом твердом теле не свободные частицы, они находятся в потенциальной яме и их энергия квантуется.

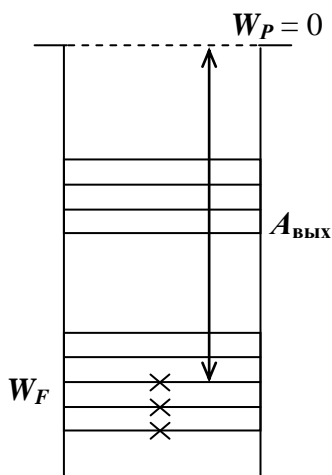
В отличие от диэлектриков и полупроводников, где нет свободных электронов, в металлах электроны, занимая все нижележащие уровни вплоть до уровня Ферми, наделенные эффективной массой, считаются практически свободными в пределах металла.

Но самостоятельно из металла они не могут выбраться, нужна дополнительная энергия  $\equiv$  работа выхода электрона из металла  $A_{\text{вых}}$ .

Если дополнительную энергию сообщают путем облучения металла электромагнитным излучением и при  $W_f \geq A_{\text{вых}}$  электроны покидают металл – это внешний фотоэффект.

А если дополнительную энергию сообщают путем подведения тепла (нагрева металла), тогда, если  $Q \geq A_{\text{вых}}$ , то электроны тоже могут покидать металл.

Явление вырывания электронов с поверхности металлов при их нагревании называется термоэлектронной эмиссией.



Т. к.  $W$  вылетевших электронов  $W \gg W_F$ , тогда функцию распределения Ферми-Дирака можно записать

$$\langle N_F \rangle = \frac{1}{\exp\left(\frac{W - W_F}{k_B T}\right) + 1} \approx \exp\left(-\frac{A_{\text{ВЫХ}}}{k_B T}\right)$$

Т. о. для вылетевших электронов вырождение снижается и они становятся классическими частицами и описываются функцией распределения Максвелла-Больцмана.

$A_{\text{ВЫХ}} \sim$  несколько эВ (табл.)

Тогда при  $T = 300 \text{ К}$   $k_B T \sim 0,026 \text{ эВ} \rightarrow \langle N_F \rangle \sim 10^{-44}$ ,

а при  $T = 3000 \text{ К}$   $\langle N_F \rangle \sim 10^{-5}$ , тогда  $\frac{\Delta N}{N_0} \cdot 100\% \sim 10^{-3}\%$ , а это уже заметный ток.

Термоэмиссия находила и находит широкое применение в различных электронных устройствах (ЭЛТ, электронные пушки и т. п.).

## 16. Контакт двух металлов

Законы Вольта:

1) При контакте двух проводников из разных металлов между ними возникает контактная разность потенциалов, которая зависит только от химического состава металлов и их температуры.

2) Разность потенциалов между концами электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных металлических проводников, находящихся при одинаковой температуре, не зависит от химического состава промежуточных проводников, а определяется лишь разностью потенциалов, возникающей при непосредственном контакте крайних проводников.

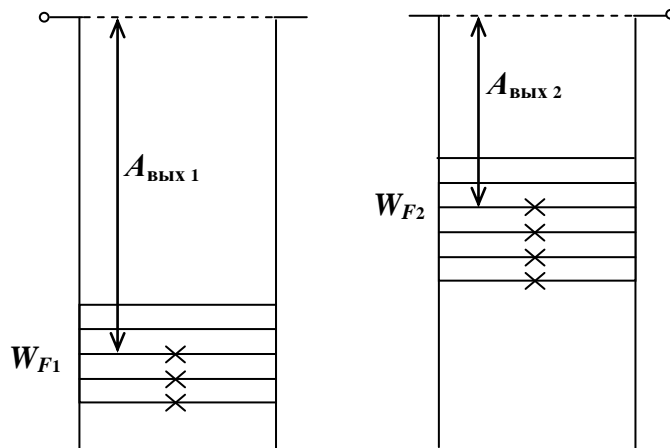
Классическая физика объяснить смогла только 2-й закон Вольта:

$$\Delta\varphi_{14} = \Delta\varphi_{12} + \Delta\varphi_{23} + \Delta\varphi_{34} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_2 - \varphi_3 + \varphi_3 - \varphi_4 = \varphi_1 - \varphi_4.$$



1	2	3	4
---	---	---	---

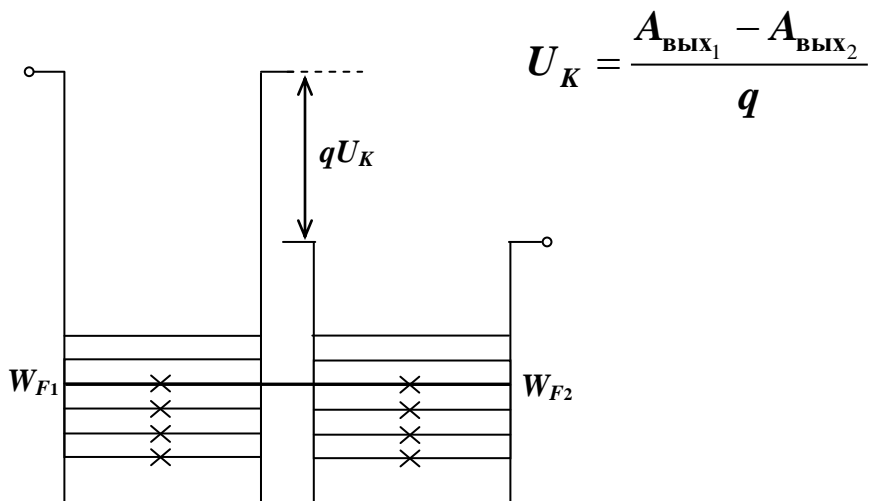
Только квантовая физика дала объяснение первого закона Вольты.



Т. к. уровни Ферми в разных металлах находятся на разной высоте, то возникает внутренняя контактная разность потенциалов

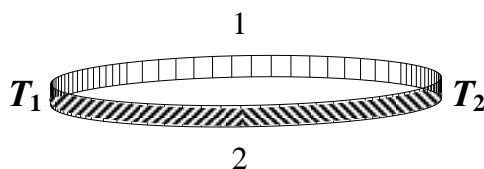
$$V_K = \frac{W_{F_2} - W_{F_1}}{q}$$

Это при контакте металлов приводит к диффузии электронов → уровень Ферми выравнивается и возникает внешняя контактная разность потенциалов.



## 17. Эффект Зеебека

В 1823 г. немецкий физик Зеебек установил, что в цепи, состоящей из 2-х разнородных проводников 1 и 2



возникает ЭДС, если контакты этих проводников поддерживаются при различных температурах  $T_1$  и  $T_2$ .

Эта ЭДС называется термо-ЭДС.

Как показывает опыт, в относительно узком интервале температур она ~ разности температур контактов:

$$E_{t^{\circ}} = C(T_2 - T_1)$$

Коэффициент пропорциональности:

$$C = \frac{E_{t^{\circ}}}{T_2 - T_1}$$

называется дифференциальной или удельной термо-ЭДС.

Она зависит от природы соприкасающихся проводников и разности температур их спаев.

Физический смысл  $C$ : она равна  $E_{t^{\circ}}$  при разности температур контактов (спаев) = 1 К.

Долгое время эффект Зеебека применялся лишь в измерительных целях.

Помещая один спай термопары в термостат с постоянной температурой, другой в исследуемую среду, можно по возникающей  $E_{t^{\circ}}$  определить температуру среды!

Т. о. удастся весьма просто, надежно и с достаточно большой степенью точности измерять температуру в широком диапазоне.