

**Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Кафедра физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3к.8

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПЕЛЬТЬЕ

МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ

Минск 2021

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПЕЛЬТЬЕ

Цель работы:

- изучить явление Пельтье;
- определить физические параметры исследуемого модуля Пельтье.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ

Явление было обнаружено для спаев различных металлов французским часовым мастером Жаном Пельтье (Jean Peltier) в 1834 году, спустя 13 лет после открытия Зеебека, и заключается в том, что при протекании тока через замкнутую цепь, составленную из разнородных металлов или полупроводников (рис.1), в одних спаях происходит выделение, а в других – поглощение тепла. Таким образом, явление Пельтье оказывается обратным явлению Зеебека.

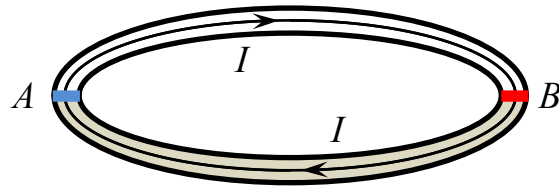


Рис. 1

Величина выделяемого количества тепла δQ и его знак зависит от вида контактирующих веществ, силы тока I и времени dt прохождения тока:

$$\delta Q_{AB} = P_{AB} I dt = -\delta Q_{BA} \quad (1)$$

(индексы указывают, что ток течет от первого звена $A(B)$ ко второму $B(A)$). Коэффициент пропорциональности P_{AB} в выражении (1) называется коэффициентом Пельтье и определяется как $P_{AB} = P_B - P_A$, где P_B , P_A – коэффициенты Пельтье для каждого из контактирующих веществ. В частности, коэффициенты Пельтье для кремниевых (Si) полупроводников p -типа отрицательны, а для n -типа – положительны. Контактным слоем называется тонкий слой контактирующих материалов протяженностью нескольких межатомных расстояний образует т.н. контактный слой).

Контактная разность потенциалов

Опыт показывает, что электроны не могут покинуть проводник (полупроводник) самопроизвольно. В самом деле, если электрон, обладающий средней энергией теплового движения, покидает проводник, в этом месте образуется положительный заряд, препятствующий удалению электрона от поверхности проводника. Поскольку кулоновская сила относится к числу потенциальных, работа внешних сил, необходимая для удаления электрона из проводника, приводит к увеличению его потенциальной энергии. Следовательно, потенциальная энергия электрона вне проводника больше, чем внутри него. Потенциальная энергия электрона в данной точке металла выражается через потенциал φ этой же точки: $U = -e\varphi$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд.

Если полагать потенциальную энергию свободного электрона вне проводника равной нулю, тогда в проводнике будут иметь отрицательные значения. Таким образом, для освобождения электрона из проводника (преодоления энергетического барьера) ему нужно сообщить некоторую энергию.

Работа выхода A_v – минимальная энергия, которую необходимо сообщить электрону для его освобождения из вещества в вакуум. Весьма важным в практическом отношении является то, что работа выхода для конкретных проводников очень чувствительна к состоянию их поверхности. В частности, сильное влияние на величину работы выхода оказывает наличие на поверхности пленок масла или окислов.

В первом приближении свободные электроны в металлическом образце можно рассматривать как идеальный газ фермионов в прямоугольной потенциальной яме с постоянной глубиной U_0 . На энергетической диаграмме собственные значения энергии принято обозначать энергетическими уровнями (рис. 2). В соответствии с принципом Паули электроны проводника заполняют энергетические уровни, начиная с уровня с минимальной энергией. Полагая кратность вырождения каждого уровня равной двум (что соответствует двум разным z-проекциям спина или собственного момента импульса), на каждом из них принято изображать по два электрона с взаимно противоположными спинами.

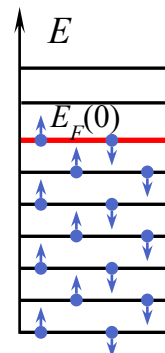


Рис. 2

Уровень Ферми – энергетический уровень, вероятность заполнения которого равна 1/2 при любых температурах $T \neq 0$ К.

В металле при $T \rightarrow 0$ К уровень Ферми будет самым верхним заполненным электронами уровнем (рис. 2). Величина энергии Ферми обозначается $E_F(0)$ при $T \rightarrow 0$ К и, в основном, определяется концентрацией n свободных электронов

$$E_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{\frac{2}{3}}.$$

При $T \rightarrow 0$ К (часто записывают $T = 0$ К) энергия Ферми и для различных металлов составляет около 1,5–7,5 эВ.

Оказывается, что в предельном случае при $T \rightarrow 0$ К, все уровни с энергиями $E \leq E_F(0)$ полностью заполнены, а с энергиями $E > E_F(0)$ – свободны. Таким образом, величина энергии Ферми $E_F(0)$ совпадает с максимальной энергией, которой могут обладать свободные электроны при $T = 0$ К (рис. 2).

На (рис. 3) для модели свободных электронов в металле изображены: работа выхода $A_v = U_0 - E_F$, U_0 – глубина потенциальной ямы; E_F – энергия Ферми.

Поскольку значения U_0 и E_F зависят от рода вещества, то и работа выхода A_v зависит от типа проводника, а также от электрического состояния поверхности.

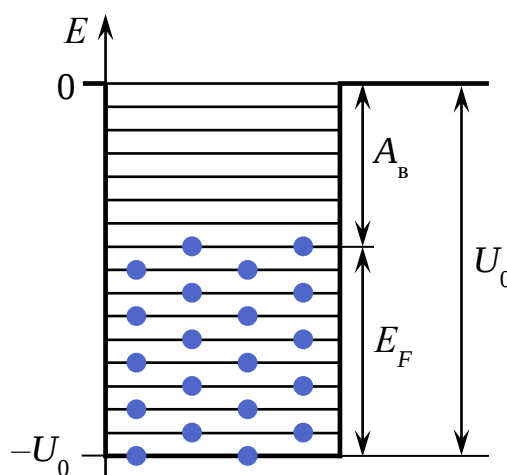


Рис. 3

При соприкосновении разнородных металлов, имеющих одинаковую температуру, из-за разных значений энергии Ферми и работы выхода часть электронов из одного металла переходит в другой. Если $A_{B1} < A_{B2}$ (т. е. уровень Ферми металла 1 расположен выше, чем металла 2), то электроны с более высоких уровней в металле 1 будут переходить на более низкие свободные уровни в металле 2 (рис. 4).

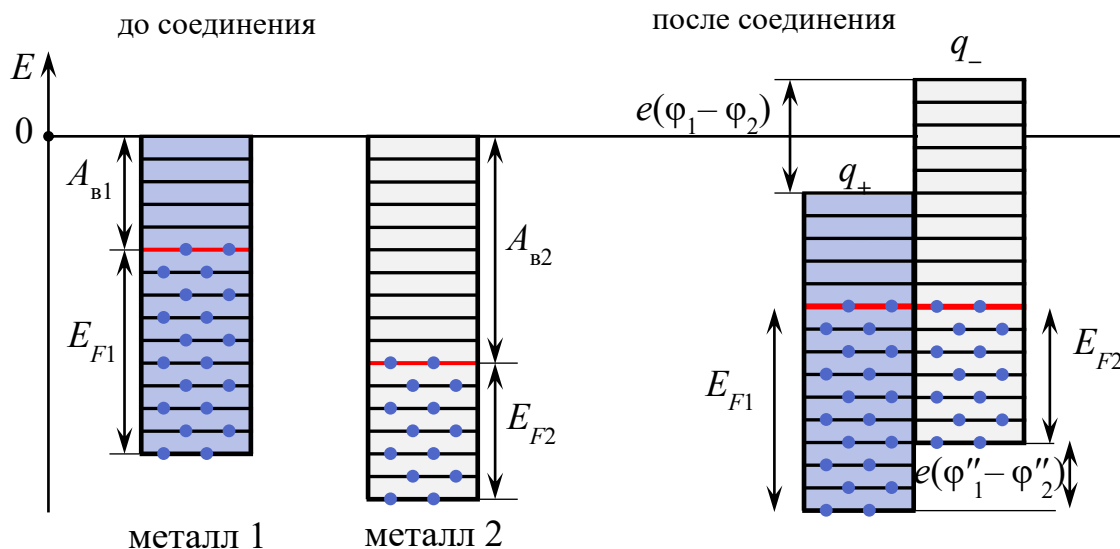


Рис. 4

Если $E_{F1} > E_{F2}$ ($E_{F1}(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n_1)^{\frac{2}{3}}$), то концентрация свободных электронов n_1 в металле 1 больше, чем n_2 в металле 2, что это вызовет диффузию электронов из металла 1 в металл 2. При установлении статистического равновесия направленные диффузионные потоки электронов прекратятся, а уровни Ферми обоих металлов установятся на *одной высоте*. В этом случае один из металлов приобретает избыточный положительный заряд, а другой – отрицательный.

Из рис. 4 видно, что контакт (так в данном случае называется место спая) двух разнородных металлов в условиях термодинамического равновесия может быть количественно охарактеризован:

1) *внутренней контактной разностью потенциалов* $\Delta\phi'_{12}$, равной:

$$\Delta\phi'_{12} = \phi'_1 - \phi'_2 = \frac{1}{e}(E_{F1} - E_{F2});$$

2) *внешней контактной разностью потенциалов* $\Delta\phi_{12}$, равной:

$$\Delta\phi_{12} = \phi_2 - \phi_1 = \frac{1}{e}(A_{B2} - A_{B1}).$$

Внутренняя и внешняя контактная разность потенциалов возникает и при соприкосновении металла и полупроводника, а также двух разнородных полупроводников.

О причинах возникновения явления Пельтье

В силу того, что квантовая энергетическая диаграмма для контакта полупроводников *существенно* отличается от рассмотренного случая, то мы *упрощенно* рассмотрим контактные явления для двух типов материалов.

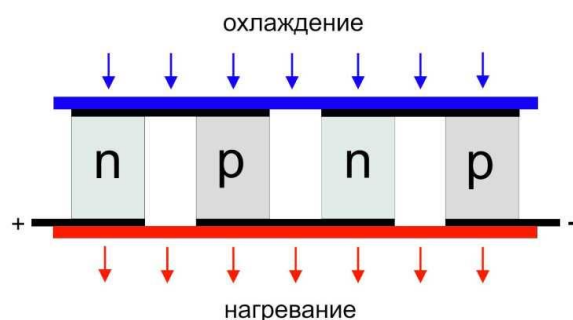
1. Полупроводники с *различными* типами проводимости (рис.1). Если на спае *A* электроны и дырки движутся навстречу друг другу, то они будут рекомбинировать: электрон, находящийся в зоне проводимости *n*-полупроводника, попав в *p*-полупроводник, занимает в валентной зоне место дырки. При этом *высвобождается* энергия, которая требуется для образования свободного электрона в *n*-полупроводнике и дырки в *p*-полупроводнике, а также кинетическая энергия электрона и дырки. Эта энергия сообщается также кристаллической решетке. В результате участки полупроводников, примыкающие к рассматриваемому спаю, будут нагреваться. На спае *B* протекающий ток будет перемещать электроны и дырки от границы между полупроводниками. Убыль носителей тока в пограничной области восполняется за счет попарного рождения электронов и дырок (при этом электрон из валентной зоны *p*-полупроводника переходит в зону проводимости *n*-полупроводника). На образование пары затрачивается энергия, которая заимствуется у решетки. Спай и примыкающие участки полупроводников *охлаждаются*.

2). В случае контакта двух веществ с *одинаковым* видом носителей тока (металл – металл, металл – полупроводник *n*-типа, два полупроводника *p*-типа) причина возникновения эффекта Пельтье следующая. Носители тока (электроны или дырки) по разные стороны от спае имеют различную среднюю энергию (полную). При переходе носителей тока из области, где они обладают большей энергией, в область с меньшей энергией носителей тока происходит выделение энергии. В результате спай и примыкающие участки проводников нагреваются. На другом спае носители тока переходят в область с большей энергией. Недостающую энергию они заимствуют у решетки, что приводит к охлаждению спае и примыкающих участков проводников.

Устройство и принцип действия элемента Пельтье.

При пропускании через термопару тока, происходит поглощение тепла на контакте *n-p* и выделение тепла на *p-n* контакте. В результате, участок полупроводника, примыкающий к *n-p* переходу, будет охлаждаться, а противоположный участок – нагреваться. Если поменять полярность тока, то наоборот, *n-p* участок будет нагреваться, а противоположный – охлаждаться. Для практического применения энергии поглощения тепла одной термопары недостаточно. В термоэлектрическом модуле используется много термопар. Электрически их соединяют последовательно. А конструктивно – так, что охлаждающие и нагревающие переходы расположены на разных сторонах модуля.

Термопары установлены между двух керамических пластин. Соединяются они медными шинами. Количество термопар может достигать до нескольких сотен. От их количества зависит мощность модуля.



Таким образом, в модуле Пельтье, помимо контактов с электронно-дырочным переходом применяются также контакты между металлом (медь) и полупроводником. Процессы в таких переходах зависят работы выхода электронов. Чем меньше работа выхода, тем больше электронов может выйти из данного тела.

Рассмотрим процессы в различных метало-полупроводниковых переходах.

1) Если в контакте металлом (медь) с полупроводником n -типа работа выхода электронов из металла A_M меньше, чем работа выхода из полупроводника A_P , то будет преобладать выход электронов из металла в полупроводник.

Поэтому в слое полупроводника около границы накапливаются основные носители заряда (электроны). Сопротивление этого слоя будет малым при любой полярности приложенного напряжения, и, следовательно, такой переход не обладает выпрямляющими свойствами. Его называют невыпрямляющим (омическим) контактом.



Подобный же невыпрямляющий диод получается в контакте металла с полупроводником p -типа, если работа выхода электронов из полупроводника меньше, чем из металла. В этом случае из полупроводника в металл уходит больше электронов, чем в обратном направлении, и в приграничном слое полупроводника также образуется область, обогащенная основными носителями (дырками), имеющая малое сопротивление. Оба типа невыпрямляющих контактов широко используются в полупроводниковых приборах при устройстве выводов от n - и p -областей. Для этой цели подбирают соответствующие металлы.

2) Если в контакте металлом (медь) с полупроводником n -типа $A_P < A_M$, то электроны будут переходить главным образом из полупроводника в металл и в приграничном слое полупроводника образуется область, обедненная основными носителями, и поэтому имеющая большое сопротивление. Здесь создается довольно высокий потенциальный барьер, высота которого будет существенно меняться в зависимости от полярности приложенного напряжения. Такой переход обладает выпрямляющими свойствами. Подобные переходы в свое время исследовал немецкий ученый В. Шотки и теперь барьеры в таких переходах именуются барьерами Шотки, а диоды с этим барьером - диодами Шотки. В диодах Шотки (в металле, куда приходят электроны из полупроводника) отсутствуют процессы накопления и рассасывания зарядов неосновных носителей, характерные для p - n -переходов.

Поэтому диоды Шоттки обладают значительно более высоким быстродействием, нежели обычные диоды, так как накопление и рассасывание зарядов – процессы инерционные, т. е. требуют времени. Аналогичными свойствами обладает контакт металла с полупроводником p -типа при $A_{\Pi} > A_M$.

О практическом использовании эффекта Пельтье

Для практического использования эффекта поглощения тепла вблизи одного спая и его выделения вблизи другого одной термопары недостаточно. Для этих целей используются специальные устройства – термоэлектрические модули Пельтье – множество последовательно соединенных термопар. Конструктивно данное устройство формируется таким образом, чтобы охлаждающие переходы располагались на одной и той же стороне модуля, а нагревающие переходы – соответственно на другой. Термопары закрепляются на массивной (по сравнению с полупроводниковыми элементами) керамической пластине, имеющей некоторый коэффициент теплопроводности λ и соединяются медными шинами. Количество термопар может достигать до нескольких сотен. От их количества зависит мощность модуля. Разность температур между горячей и холодной сторонами модуля Пельтье может достигать несколько десятков градусов Цельсия. Горячая и холодная стороны модуля Пельтье теплоизолированы.



Термоэлектрические модули Пельтье применяются:

- в небольших бытовых и автомобильных холодильниках;
- в охладителях воды;
- в системах охлаждения электронных приборов;
- в термоэлектрических генераторах.
- при встраивании миниатюрных модулей Пельтье непосредственно в микросхемы процессоров для охлаждения их наиболее критичных структур.



Такое решение способствует лучшему охлаждению за счет снижения теплового сопротивления и позволяет значительно повысить рабочую частоту и производительность процессоров.

В указанных выше областях проявляются следующие достоинства элементов Пельтье:

- отсутствие механически движущихся частей, газов, жидкостей;
- бесшумная работа;
- небольшие размеры;
- возможность обеспечивать как охлаждение, так и нагревание;
- возможность плавного регулирования мощности охлаждения.

Указанным устройствам присущи и некоторые недостатки:

- низкий КПД;
- необходимость в источнике питания;
- высокая стоимость мощных модулей.

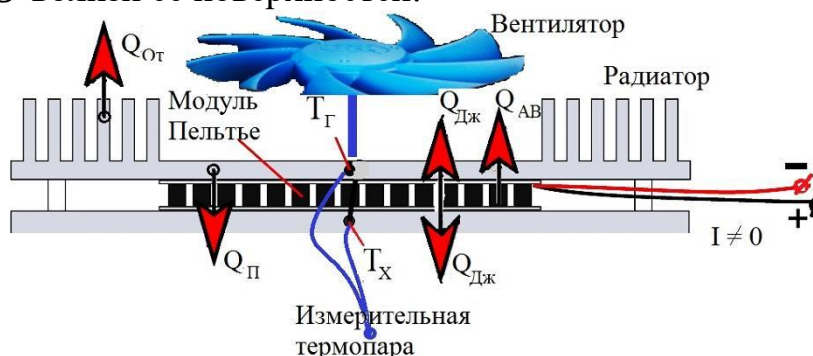
В ходе же практического применения модулей Пельтье следует строго соблюдать ряд условий, о которых далее не будет идти речь. Их невыполнение приводит к деградации модуля или выходу из строя, снижению эффективности системы.

Физические закономерности теплового функционирования модуля Пельтье

При пропускании тока I через термопару энергия источника расходуется не только на создание тепла Пельтье $\delta Q_{AB} = P_{AB} I dt$, но и на рассеяние на ней тепла $\delta Q_{Дж}$, количество которого можно оценить согласно закону Джоуля-Ленца. В горячей части термопары будет выделяться следующее количество тепла: $\delta Q_1 = \delta Q_{Дж} + \delta Q_{AB}$, а в холодной – $\delta Q_2 = \delta Q_{Дж} - \delta Q_{AB}$. Тогда теплота Пельтье может быть выражена как

$$\delta Q_{AB} = (\delta Q_1 - \delta Q_2) / 2. \quad (2)$$

Рассмотрим процесс выравнивания температур «горячей» и «холодной» сторон модуля Пельтье после отключения питания ($I=0$), а, значит, горячей и холодной поверхностей керамической пластины в рамках модели, согласно которой модули Пельтье закреплены в единой массивной (по сравнению с полупроводниковыми элементами) керамической пластине некоторой толщины d_0 и поперечным сечением S вблизи ее поверхностей.



Кроме того, полагаем, что параметр d_0 значительно меньше поперечных размеров самой пластины, а одна из ее сторон, а именно та, что примыкает к «горячей» стороне модуля, всегда находится при постоянной температуре T_r (в нашем случае, близкой к комнатной, так как эта пластина размещена на радиаторе и пр.). Соответственно температура второй стороны пластины совпадает с температурой «холодной» стороны модуля T_x . Для выравнивания температур необходимо достижение на этой стороне также комнатной температуры. Такое состояние обеспечивается тепловым балансом: поглощенное количество теплоты $\delta Q_{п}$ должно равняться отведенному количеству теплоты $\delta Q_{от}$. Элементарное количество тепла $\delta Q_{п}$, поглощаемое холодной стороной устройства, равно,

$$\delta Q_{п} = mc dT_x, \quad (3)$$

где m – масса керамической пластины, c – удельная теплоемкость керамики, dT_x – элементарное изменение температуры «холодной» поверхности керамической пластины.

Элементарное количество тепла δQ_{Om} , проходящего в единицу времени через единичное поперечное сечение однородной пластины, поверхности которой имеют постоянные температуры T_X и T_Γ ($T_\Gamma > T_X$), а толщина d_0 мала по сравнению с поперечными размерами пластины, определяется как $\frac{1}{S} \frac{\delta Q_{Om}}{dt} = \lambda \frac{T_\Gamma - T_X}{d_0}$, где λ – коэффициент теплопроводности материала пластины. Из условия теплового баланса $\delta Q_{II} = \delta Q_{Om}$ получаем

$$mc dT_X = \lambda S \frac{T_\Gamma - T_X}{d_0} dt \quad \text{или} \quad \frac{dT_X}{T_\Gamma - T_X} = k dt$$

Либо

$$\frac{d(T_X - T_\Gamma)}{T_\Gamma - T_X} = k dt, \quad (4)$$

где коэффициент $k = \frac{\lambda S}{mc d_0}$. Тогда $\int_{T_X(0)}^{T_X(t)} \frac{d(T_X(t') - T_\Gamma)}{T_X(t') - T_\Gamma} = -k \int_0^t dt$. В результате получаем, что

$$\ln \frac{|T_X(t) - T_\Gamma|}{|T_X(0) - T_\Gamma|} = -kt \Rightarrow \ln \frac{T_\Gamma - T_X(0)}{T_\Gamma - T_X(t)} = kt. \quad (5)$$

Следовательно, температура холодной пластины будет изменяться во времени по закону:

$$T_X(t) = T_\Gamma + (T_X(0) - T_\Gamma) e^{-kt}. \quad (6)$$

Пусть имеется модуль Пельтье, в состав которого входят N последовательно соединенных полупроводниковых элементов. Рассмотрим уравнение теплового баланса при выключенном питании ($I=0$) в предположении, что поглощенная теплота в точности получена из теплоты Пельтье $\delta Q_i = \delta Q_{AB}$. В этом случае

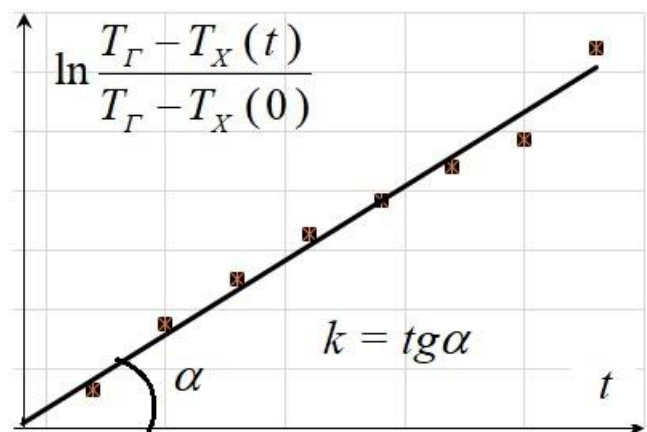
$$N P_{AB} I dt = \lambda \frac{S}{d_0} (T_\Gamma - T_X(0)) dt \quad \text{или} \quad N P_{AB} I dt = k mc (T_\Gamma - T_X(0)) dt. \quad (7)$$

Отсюда получаем соотношение для определения коэффициент Пельтье используемого модуля:

$$P_{AB} = k \frac{mc (T_\Gamma - T_X(0))}{N I}. \quad (8)$$

Коэффициент k , в свою очередь, определяется согласно формуле (5) с помощью графика как тангенс наклона прямой к оси времени:

Построение графика функции $y = \ln \frac{T_\Gamma - T_X(0)}{T_\Gamma - T_X(t)}$ в *Microsoft Excel* дано в ПРИЛОЖЕНИЕ 1.



ЗАДАНИЕ

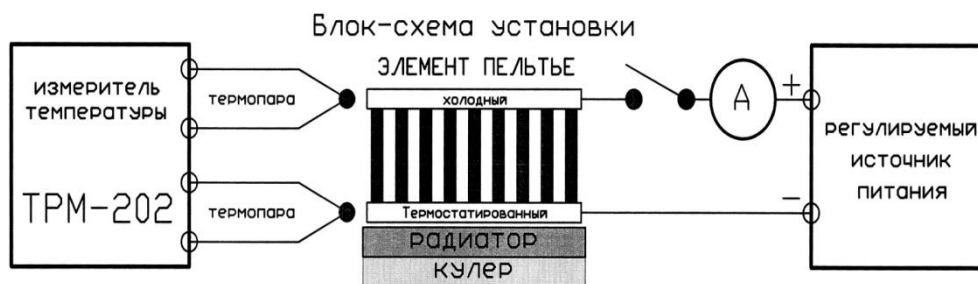
1. Изучить лабораторную установку и методику измерений.
2. Снять необходимые температурные показания для модуля Пельтье.
3. Рассчитать физические параметры исследуемого модуля Пельтье.

О структуре лабораторной установки и назначении ее блоков

Лабораторная установка состоит из вольтметра В7-58/2, измерителя-регулятора температуры ТРМ 202. Включение установки производится с помощью выключателя на боковой панели. Включение тока в модуле Пельтье производится с помощью тумблера на передней панели установки, а установка и регулировка силы тока - с помощью ручки-регулятора на той же панели.



Температура “горячих” и “холодных” спаев модуля Пельтье фиксируется на табло на передней панели установки соответственно в красном и зеленом цвете, соответственно.



Подготовка лабораторной установки к работе

1. Рукоятки регуляторов тока на установке перевести в крайнее левое положение.
2. Подключить лабораторную установку к сети 220 В.
3. Выбрать необходимый режим работы вольтметра В7-58/2:
 - измерение постоянного тока;
 - выставить предел измерения прибора **2000 mA** (результат измерения фиксируется в миллиамперах).

4. Включить тумблер «Сеть» лабораторной установки.
5. Дать прибору «прогреться» в течение **5 минут**.

Режим снятия показаний

1. На установке перевести тумблер регулятора тока в положение **Вкл.** и выставить значение силы тока 600 mA .
2. В процессе нагревания-охлаждения модуля поддерживать регулятором соблюдение установленного в соответствии п.1 токового режима.
3. Дождаться стабилизации температуры горячих и холодных спаев при прохождении тока силой 600 mA . Указанные температуры в последующих расчетах являются параметрами, соответственно: T_r и $T_x(0)$.
4. Выключить регулятором ток в модуле. Начиная с момента выключения тока фиксировать температуру холодного спаев через каждые 5 секунд и вносить полученные значения в таблицу. Процедуру завершить, когда разность $T_r - T_x(t)$ будет составлять порядка $(1-1,5)^{\circ}\text{C}$.
5. Выставить последовательно значения тока 800 mA и 1000 mA и повторить измерения по пунктам 1 – 4. Соответствующие результаты занесите в Соответствующие результаты занесите в Таблицу1.

Таблица 1

$t, \text{ c}$	$T_x(t), ^{\circ}\text{C}$ ($I = 0,6\text{ A}$)	$T_x(t), ^{\circ}\text{C}$ ($I = 0,8\text{ A}$)	$T_x(t), ^{\circ}\text{C}$ ($I = 1\text{ A}$)
0			
5			
10			
...			
	$T_r =$	$T_r =$	$T_r =$

Расчетные задания

1. По результатам экспериментов рассчитайте величины $\frac{T_r - T_x(0)}{T_r - T_x(t)}$ и $\ln \frac{T_r - T_x(0)}{T_r - T_x(t)}$ для **каждой** силы тока I . Полученные значения внесите в Таблицу 2, последовательно увеличивая число столбцов для токов $0,8\text{ A}$ и 1 A .

Таблица 2

$t, \text{ c}$	$\frac{T_r - T_x(0)}{T_r - T_x(t)}, I = 0,6\text{ A}$	$\ln \frac{T_r - T_x(0)}{T_r - T_x(t)}, I = 0,6\text{ A}$
0	1	0
5		
10		
...		

2. Для каждой силы тока I постройте графики зависимости $\ln \frac{T_r - T_x(0)}{T_r - T_x(t)} = k \cdot t$.
3. На основании построенных графиков вычислите коэффициенты k_1, k_2, k_3 для каждой силы тока и его средний среднее значение k .
4. Подставляя среднее значение k в формулу (8) вычислите коэффициент Пельтье P_{AB} .

Значения физических параметров, используемых в ходе расчетов:

$$N = 127;$$

$$S = 1600 \text{ мм}^2;$$

$$d_0 = 0,8 \text{ мм};$$

$$m = 6 \text{ г};$$

$$c = 900 \text{ Дж / кг} \cdot \text{К}.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое физическое явление называется явлением Пельтье?
2. Из каких основных элементов состоит лабораторная установка и каково их назначение?
3. Каковы основные физические причины возникновения явления Пельтье?
4. Почему происходит нагревание (охлаждение) спаев термопары при пропускании через них тока?
5. Почему явление Пельтье называют обратным явлению Зеебека?
6. Какая физическая величина называется коэффициентом Пельтье? В каких единицах измеряется коэффициент Пельтье?
7. Может ли коэффициент Пельтье материала принимать отрицательные значения?
8. Почему в полупроводниках явление Пельтье проявляется в большей степени, чем в проводниках?
9. Находит ли практическое применение явление Пельтье?

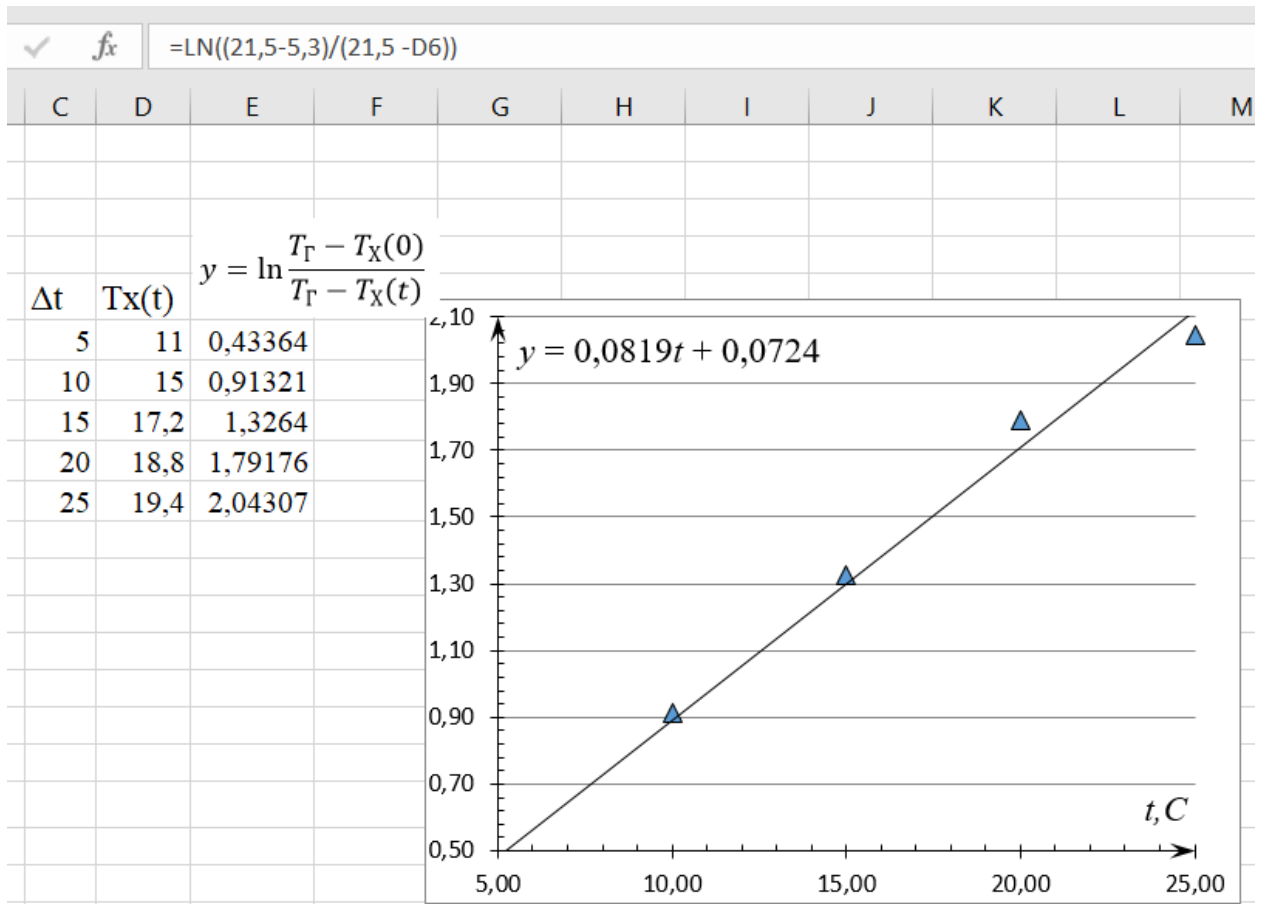
ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.1-3, Наука, 1989; Курс общей физики. Т.1- 5, М., Астрель АСТ, 2003-2004.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс общей физики. М., Высшая школа, 1989.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1-5, М., Наука, 1977-1986.
4. Калашников С.Г. Электричество. М., Наука, 1985.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Построение графика функции $y = \ln \frac{T_{\Gamma} - T_X(0)}{T_{\Gamma} - T_X(t)}$ в *Microsoft Excel*.

1. Ввести данные в виде столбцов для Δt и $T_X(t)$ (данные приведены качестве примера). Выделить курсором ячейку E, справа от значения температуры с вели-



чиной 11. Ввести средствами *Excel* формулу (см. командную строку формул вверху рисунка). Выделить курсором первые ячейки D и E, «протянуть» курсор вниз. Получим численные значения функции для всех температур в третьем столбике.

2. Кликнуть по диаграмме и выбрать данные из второго и третьего столбца. Выбрать «Вставка точечной диаграммы». Результаты будут представлены на диаграмме *MS Excel* в виде множества дискретных маркеров треугольной формы. Кликнуть по маркерам и выбрать «Добавить линию тренда», линейная и «показывать уравнение».

Получаем вид уравнения $y = 0,0819t + 0,0724$, из которого определяем $k = 0,082$ (см. формулу (8)).