

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### «ИЗУЧЕНИЕ ФОТО-ЭДС В ПОЛУПРОВОДНИКАХ»

#### 1. Цель работы

Изучить принцип работы кремниевого солнечного элемента и определить его основные параметры.

#### 2. Теоретическая часть

Полупроводниковые материалы нашли широкое применение для получения электрической мощности от различных источников излучения, в том числе и солнца.

Процесс преобразования оптического излучения в электрическую энергию состоит из нескольких этапов:

1. Генерация электронно-дырочных пар фотонами при их проникновении в объём кристалла. Так как в видимой области спектра для электронно-фотонного взаимодействия в кремнии квантовый выход равен единице, то каждый фотон, поглощенный в кристалле, вызывает образование электронно-дырочной пары.

2. Диффузия электронно-дырочных пар, происходящих благодаря градиенту их концентрации, и собирание неосновных носителей  $p$ - $n$ -переходом или рекомбинация электронно-дырочных пар, не достигающих перехода.

Для возникновения фотоэлектродвижущих сил необходимо разделение зарядов в пространстве. Особенно эффективное разделение неравновесных носителей имеет место в неоднородных полупроводниках и, в частности, в электронно-дырочных переходах.

В области  $p$ - $n$ -перехода существует объемный заряд и объемное поле  $\vec{E}$ , направленное от  $n$ -области к  $p$ -области. Электроны и дырки, генерируемые в  $n$ -области и  $p$ -области на расстояниях, не превышающих длин диффузии  $L_n$  и  $L_p$ , будут разделены полем  $\vec{E}$  так, что неравновесные электроны будут переведены в  $n$ -область, а дырки в  $p$ -область, т.е. контактное поле способствует переходу через область объемного заряда неосновных носителей. Электронная область заряжается отрицательно, дырочная – положительно.

Дифференциальное уравнение диффузии для стационарного случая:

$$\frac{p_n - p}{\tau} + \alpha N \exp(-\alpha x) + D_p \frac{d^2 p}{dx^2} = 0. \quad (4.1)$$

Первый член в уравнении учитывает рекомбинацию избыточных носителей ( $p_n - p$ ) с временем жизни  $\tau$ ; следующий член представляет собой количество генерируемых неосновных носителей, образованных  $N$  фотонами, падающими на единицу площади элемента за единицу времени,  $\alpha$  – коэффициент поглощения материала; последний член учитывает скорость диффузии.

Если такой полупроводник включить в замкнутую цепь, то в ней потечет ток, направленный от  $p$ -области к  $n$ -области, приводящий к уничтожению избыточной концентрации электронов и дырок. Из самого механизма возникновения полей следует, что максимальная фото-ЭДС на  $p$ - $n$ -переходе не может превзойти величину контактной разности потенциалов.

Типичная структура солнечного элемента представлена на рисунке 4.1. Для солнечного элемента рабочая точка на вольтамперной характеристике должна быть выбрана так, чтобы элемент производил возможно большую мощность.

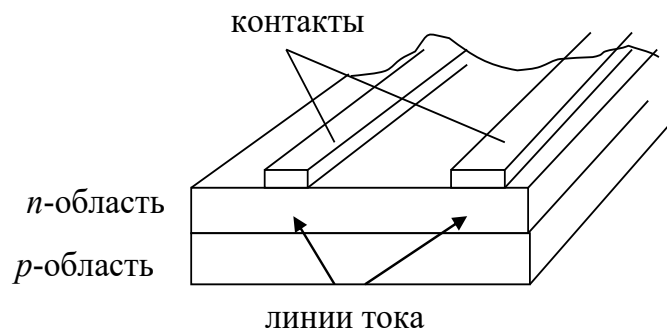


Рисунок 4.1 – Структура солнечного элемента

ВАХ элемента описывается выражением:

$$J = J_0 \left( \exp\left(\frac{eV}{\beta kT}\right) - 1 \right) - J_{кз}, \quad (4.2)$$

где  $J_0$  – темновой ток (для данного элемента  $10^{-6}$  А);  $V$  – разность потенциалов на электродах элемента (напряжение холостого хода);  $J_{кз}$  – ток короткого замыкания элемента.

Из ВАХ следует, что мощность, выделяемая на элементе, равна:

$$|JV| = \left| VJ_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{\beta kT}\right) - 1 \right] - VJ_{K3} \right|. \quad (4.3)$$

Из этого уравнения следует, что максимальная мощность элемента равна:

$$W_{\max} \approx \frac{kT}{e} J_{K3} (r - 1), \quad (4.4)$$

где  $r$  дается уравнением:

$$(r + 1) \exp(r) = \frac{J_{K3}}{J_0}. \quad (4.5)$$

Величина тока короткого замыкания  $J_{K3}$  определяется числом неравновесных пар, разделенных полем  $p$ - $n$ -перехода. Отсюда:

$$J_{K3} = e\beta kI\eta, \quad (4.6)$$

где  $\beta$  – квантовая эффективность преобразования (число электронно-дырочных пар на один поглощенный фотон);  $k$  – коэффициент поглощения полупроводника ( $\text{см}^{-1}$ );  $I$  – интенсивность потока фотонов ( $\text{см}^{-1}\text{с}^{-1}$ );  $\eta$  – коэффициент собирания, определяющий долю носителей, дошедших до  $p$ - $n$ -перехода.

Из уравнения следует, что спектральной характеристикой фотопреобразователя служит спектральная зависимость тока короткого замыкания (рисунок 4.2).

Основным параметром солнечных элементов служит эффективность преобразования, или коэффициент полезного действия, т.е. отношение электрической мощности, выделяемой на элементе, к мощности, падающего излучения. Это достигается высоким уровнем легирования слоев кремния с обеих сторон  $p$ - $n$  перехода до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

### 3. Экспериментальная установка

На рисунке 4.3 приведена схема экспериментальной установки. Излучение от лампы через диафрагму попадает на фотоэлемент. Под фотоэлементом располагается нагревательный элемент для изучения температурной зависимости ВАХ фотоэлемента. Температура нагревательного элемента контролируется цифровым мультиметром. Для изучения эффективности солнечного элемента для различных участ-

ков спектра излучения используются фотофильтры, которые располагаются на поверхность фотоэлемента.

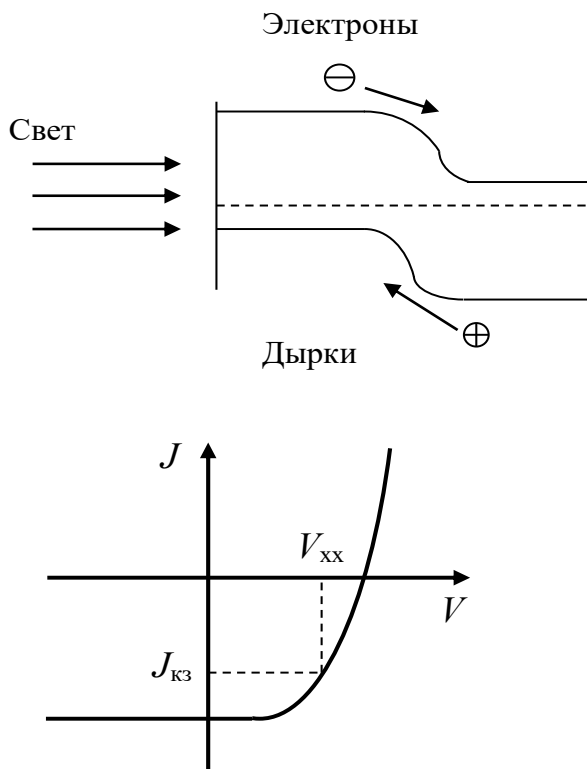


Рисунок 4.2 – Определение тока короткого замыкания и напряжения холостого хода

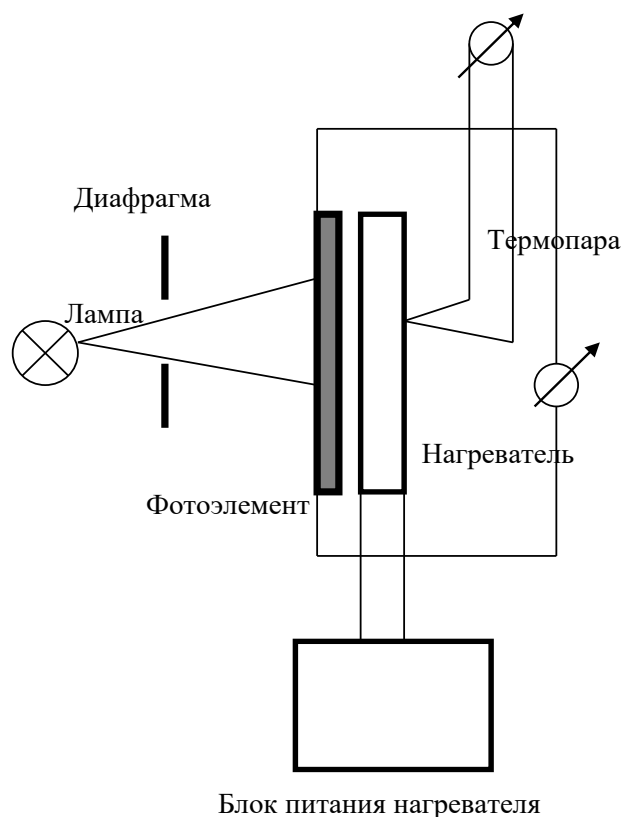


Рисунок 4.3 – Схема экспериментальной установки

#### 4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомиться с экспериментальной установкой на принципиальной схеме и на макете.

Порядок работы:

1. Установить на штативе осветитель и солнечный элемент. Не включая осветитель снять ВАХ солнечного элемента при изменении напряжения от  $1$  до  $-2$  В с шагом  $0,1$  В.

2. Установить на осветителе диафрагму «2,5 см». Включить осветитель в сеть и, изменяя высоту его положения, добиться того, чтобы пятно света не выходило за пределы элемента. При открытой диафрагме плотность светового потока на элементе составит  $0,75 \text{ Вт/см}^2$ . Снова снять ВАХ элемента.

3. Используя ВАХ элемента, рассчитайте мощность, отдаваемую солнечным элементом.

4. Меняя величину отверстия диафрагмы с шагом 0,5 см и повторяя операции п. 2, снять зависимость эффективности преобразования (КПД) от падающей мощности излучения осветителя (в относительных единицах).

5. Используя светофильтры, их спектральные характеристики и спектр излучения лампы, определить эффективность солнечного элемента для различных участков спектра излучения.

6. Рассчитать по формуле (4.4) максимальную мощность солнечного элемента и сравнить ее с измеренной. Объяснить полученный результат.

7. Нагреть фотоэлемент до  $50^\circ\text{C}$  и снова снять ВАХ элемента. Объяснить полученный результат.

### **5. Задание на работу**

1. Построить ВАХ элемента без освещения и с освещением.

2. Построить зависимость КПД от падающей мощности излучения осветителя.

3. Определить КПД солнечного элемента для различных участков спектра излучения.

4. Сравнить теоретическую и экспериментальную максимальную мощность солнечного элемента.

5. Построить зависимость тока короткого замыкания и напряжения холостого тока от температуры.

### **6. Контрольные вопросы**

1. Что такое фото-ЭДС и причины ее возникновения в полупроводниках?

2. Принцип работы элемента и механизм разделения электронно-дырочных пар.

3. Что такое генерация и рекомбинация неосновных носителей в полупроводниках?

4. Нарисуйте наиболее вероятную зависимость КПД солнечного элемента от длины волны излучения и объясните ее основные особенности.

5. Каким образом КПД элемента связан с шириной запрещенной зоны полупроводника?

6. Объясните температурную зависимость  $J_{кз}$ .

### 7. Дополнительный материал

Таблица 4.1 – Показатель поглощения светофильтров  $k(\lambda)$

| $\lambda$ , нм | 300  | 400  | 500   | 600  | 700  | 800   | 900   | 1000  | 1100 |
|----------------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|
| <b>УФС</b>     | 0,04 | 2,18 | 4     | 4    |      |       |       |       |      |
| <b>КС</b>      |      | 3    | 2,0   | 2,0  | 0,22 | 0,06  | 0,008 | 0,008 |      |
| <b>ИКС</b>     |      |      |       | 3    | 2,0  | 1,6   | 0,26  | 0,14  | 0,06 |
| <b>СЗС</b>     |      |      | 0,006 | 0,02 | 0,04 | 0,08  | 0,49  | 1,5   | 2    |
| <b>ОС</b>      |      |      | 1,5   | 0,12 | 0,04 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |      |

Таблица 4.2 – Спектральная плотность излучения ламп накаливания  $r(\lambda)$  при  $T_{цв} = 2856$  К

| $\lambda$ , мкм | $r(\lambda)$ , % | $\lambda$ , мкм | $r(\lambda)$ , % | $\lambda$ , мкм | $r(\lambda)$ , % | $\lambda$ , мкм | $r(\lambda)$ , % | $\lambda$ , мкм | $r(\lambda)$ , % | $\lambda$ , мкм | $r(\lambda)$ , % |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| 0,40            | 5,1              | 0,56            | 34,5             | 0,72            | 73               | 0,88            | 97               | 1,25            | 87               | 1,65            | 56               |
| 0,42            | 18               | 0,58            | 39,5             | 0,74            | 78               | 0,90            | 98               | 1,30            | 83               | 1,70            | 52               |
| 0,44            | 10               | 0,60            | 45               | 0,76            | 82,5             | 0,95            | 99               | 1,35            | 80               | 1,75            | 49               |
| 0,46            | 13               | 0,62            | 50               | 0,78            | 86               | 1,00            | 100              | 1,40            | 75               | 1,80            | 47               |
| 0,48            | 17               | 0,64            | 54,5             | 0,80            | 89               | 1,05            | 99               | 1,45            | 71               | 1,85            | 44               |
| 0,50            | 21               | 0,66            | 59               | 0,82            | 91,5             | 1,10            | 97               | 1,50            | 67               | 1,90            | 42               |
| 0,52            | 25               | 0,68            | 64               | 0,84            | 93               | 1,15            | 94               | 1,55            | 63               | 1,95            | 40               |
| 0,54            | 30               | 0,70            | 68               | 0,86            | 95               | 1,20            | 90,5             | 1,60            | 59               | 2,00            | 36               |

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### «ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ»

#### 1. Цель работы

Изучить работу полупроводникового термопреобразователя с использованием эффектов Зеебека и Пельтье и установить взаимосвязи между коэффициентами термо-ЭДС и Пельтье.

#### 2. Теоретическая часть

**Явлением Зеебека** называют возникновение термо-ЭДС в цепи, составленной из двух различных твердых тел, при наличии разности их температур. Наиболее ярко это явление проявляется в контактах полупроводниковых материалов с металлами.

Дифференциальную термо-ЭДС определяют в виде:

$$\alpha_T = \frac{dE}{dT}. \quad (5.1)$$

Если термоэлектрическая цепь составлена из последовательно соединенных полупроводников  $n$  и  $p$ -типа, то их термо-ЭДС складывается:

$$E_{12} = (\alpha_1 + \alpha_2)\Delta T = \alpha_{12}\Delta T, \quad (5.2)$$

где  $\alpha_{12}$  – коэффициент суммарной дифференциальной термо-ЭДС.

Зависимость  $\alpha_{12} = f(T)$  не имеет универсального характера и зависит от материала и интервала температур.

**Эффект Пельтье** – выделение или поглощение тепла на контакте двух разнородных полупроводников или полупроводника и металла при прохождении через них электрического тока. Количество выделившегося или поглощенного тепла в месте контакта пропорционально прошедшему через контакт количеству электричества:

$$Q_{II} = \pm \Pi_{12} I t, \quad (5.3)$$

где  $\Pi_{12}$  – коэффициент Пельтье.

В случае невырожденного полупроводника:

$$\Pi_{12} = \frac{(2+r)kT - E_F}{It} = \alpha_{12}T, \quad (5.4)$$

где  $T$  – абсолютная температура холодного контакта. В общем случае количество тепла за счет эффекта Пельтье определяется как:

$$UI = I^2R \pm \alpha_{12}TI, \quad (5.5)$$

где  $U$  – падение напряжения на термоэлементе;  $I$  – ток через элемент;  $R$  – электрическое сопротивление элемента.

Физический смысл эффекта Пельтье можно понять из энергетической диаграммы контакта металл–полупроводник (рисунок 5.1).

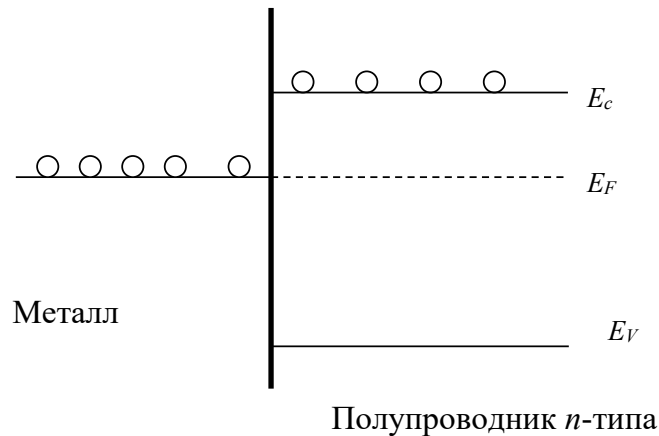


Рисунок 5.1 – Энергетическая диаграмма контакта металл–полупроводник

Рассмотрим для определенности контакт металл–полупроводник  $n$ -типа при работе выхода электронов из металла большей, чем из полупроводника  $\Phi_M > \Phi_{\text{пн}}$ . Причина возникновения этого термоэлектрического эффекта состоит в том, что средняя кинетическая энергия электронов, участвующих в создании электрического тока в металле и полупроводнике, различна. Как уже указывалось, в металле электроперенос осуществляется электронами вблизи поверхности Ферми. В полупроводнике  $n$ -типа ток будет переноситься электронами зоны проводимости. Энергия электронов в зоне проводимости больше, чем энергия электронов в металле на уровне Ферми, на величину  $E_c - E_F$ . Под действием внешнего электрического поля, направленного так, что осуществляется переход электронов из полупроводника в металл, более высокоэнергетические электроны полупроводника, перейдя в металл, будут опускаться до



уровня Ферми и отдавать при столкновениях с атомами решетки металла свою избыточную энергию. Выделяющееся при этом тепло и есть теплота Пельтье. Так как электроны приходят в тепловое равновесие в результате небольшого числа столкновений в непосредственной близости контакта, то практически вся теплота Пельтье выделяется на самом контакте. При противоположном направлении внешнего электрического тока электроны металла могут перейти в полупроводник, только преодолев энергетический барьер  $E_c - E_F$ . Для этого они должны получить энергию от решетки, вследствие чего металл в области контакта охлаждается.

Коэффициенты  $\alpha_{12}$ ,  $P_{12}$  и  $\tau_T$  связаны между собой термодинамическими соотношениями, и поэтому достаточно определить один из них, например,  $\alpha_{12}$ . Из кинетического уравнения Больцмана для невырожденного полупроводника с одним типом носителей получаем:

$$\alpha_n = -\frac{k}{e} \left( \frac{5}{2} + t + \ln \frac{N_C}{n} \right), \quad (5.6)$$

$$\text{и } \alpha_p = \frac{k}{e} \left( \frac{5}{2} + t + \ln \frac{N_V}{p} \right), \quad (5.7)$$

где  $t$  – показатель степени, определяемый механизмом рассеяния. В частности, при рассеянии на акустических колебаниях решетки  $t = 1/2$ , а при рассеянии на ионизированной примеси  $t = 3/2$ .

### 3. Экспериментальная установка

Для изучения работы термоэлектрического генератора и холодильника собирается схема, показанная на рисунке 5.2. Термоэлектрическая батарея на основе сплавов ( $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,4}\text{Te}_{0,1}$  и  $\text{Te}_{2,87}\text{Se}_{0,125}$ ) собрана в моноблок из 38 чередующихся элементов с проводимостью  $n$  и  $p$ -типа. Все элементы в электрической схеме включены последовательно, а по тепловому потоку параллельно. Термоэлектрическая батарея, для охлаждения тепловыделяющих спаев, расположена на металлическом теплоотводе с развитой поверхностью. Батарея с помощью проводов соединена с источником питания. Протекающий через батарею ток контролируется с помощью амперметра.

Величина термо-ЭДС контролируется с помощью милливольтметра. Измерения температуры проводят с помощью электронного цифрового термометра.

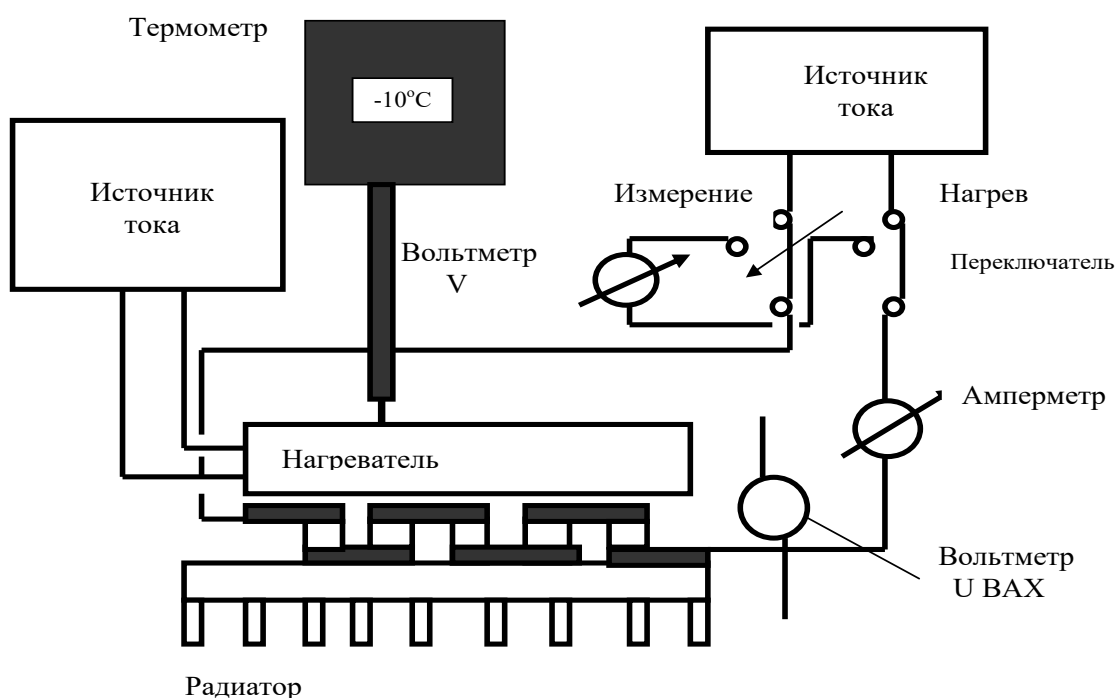


Рисунок 5.2 – Экспериментальная установка

#### 4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомиться с экспериментальной установкой на принципиальной схеме и на макете.

Порядок работы:

1. Выключатель на радиаторе поставить в положение «Изм», на вольтметре установить предел измерений.

2. Блок нагревателя разместить на тетради или книги и подключить к источнику питания. Температуру нагревателя контролировать цифровым термометром.

3. При достижении на нагревателе температуры  $30^{\circ}\text{C}$  поместить его на поверхность термоэлемента и через 30 секунд замерить величину термо-ЭДС. Снять нагреватель с элемента и при достижении  $T = 40^{\circ}\text{C}$ , вновь провести измерения термо-ЭДС

и таким же образом провести измерения при  $50^{\circ}\text{C}$ . Затем отключить нагреватель от источника питания.

4. Построить зависимости  $E_T = f(T)$  и  $\alpha_{12} = f(T)$ .

5. Переключатель на радиаторе поставить в положение «Нагрев». Сменить полярность выводов на вольтметре. Установить по амперметру минимальное значение тока и прогреть термоэлемент в течении 2 минут. По вольтметру  $U_{\text{ВАХ}}$  зафиксировать падение напряжения на термоэлементе.

6. Переключатель на радиаторе перевести в положение «Изм» и зарегистрировать максимальное показание вольтметра  $V$ . Вновь перевести переключатель в положение «Нагр» и, установив новое значение тока, через 2 минуты повторить предыдущую операцию. Повторив измерения несколько раз и используя зависимость  $E_T = f(T)$ , построить зависимость  $T = f(I)$ .

### **5. Задание на работу**

1. Построить зависимости  $E_T = f(T)$  и  $\alpha_{12} = f(T)$ .

2. Построить зависимость  $T = f(I)$ .

3. Для максимальной хладопроизводительности найти по приведенным формулам коэффициент и теплоту Пельтье.

4. Построить ВАХ термоэлемента (прямую ветвь).

5. Построить на одном графике зависимость теплоты Пельтье и теплоты Джоуля-Ленца от силы тока и определить режим максимальной хладопроизводительности.

### **6. Контрольные вопросы**

1. Каковы механизмы эффектов Зеебека и Пельтье?

2. Почему в полупроводниках эффекты проявляются в большей степени, чем в металлах?

3. Какова связь между коэффициентом Пельтье и термо-ЭДС?

## **ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

### ***1. Оформление отчета***

Отчет по лабораторной работе оформляется в электронном виде согласно требованиям ОС ТУСУР 01-2013 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления».

### ***2. Содержание отчета***

Обязательными элементами отчета являются:

1) титульный лист, содержащий название вуза, кафедры, название и номер лабораторной работы, наименование дисциплины, по которой выполнена работа, № группы и ФИО студентов, входящих в подгруппу, дату исполнения, ФИО преподавателя, год;

2) основная часть, к которой относятся цель работы, лабораторное задание, полученные по работе результаты, оформляемые в табличном, графическом или другом виде, ответы на контрольные вопросы;

3) выводы по результатам работы, которые являются важной частью отчета и подлежат защите.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

### *1. Основная литература*

1. Физика конденсированного состояния: учебное пособие для вузов / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 294 с.

### *2. Дополнительная литература*

1. Смирнов С. В. Физика твердого тела: учебное пособие. – Томск, ТГУ, 2003. – 276 с.

2. Физика твердого тела. Под редакцией Верещагина И. К. – М.: Высшая школа, 2001. – 238 с.

3. Протасов Ю. С., Чувашев С. Н. Твердотельная электроника. – Изд. МГТУ им. Баумана, 2003. – 189 с.

4. Чупрунов Е. В. Кристаллография: Учебник для вузов / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фадеев. – М.: Физматлит, 2000. – 496 с.

5. Гуртов В. А., Осауленко Р. Н. Физика твердого тела для инженеров: учебное пособие / ред.: Л. А. Алешина. – М.: Техносфера, 2007. – 518 с.

6. Павлов П. В. Физика твердого тела: Учебник для вузов / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов. – 3-е изд., стереотип. – М.: Высшая школа, 2000. – 496 с.